



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Sid Oksala

Bussipysäkkien ympärivuotinen verkkovirrasta riippumaton valaistus uusiutuvalla energialla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

6.4.2019

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Sid Oksala Bussipysäkkien ympärivuotinen verkkovirrasta riippumaton valaistus uusiutuvalla energialla 38 sivua + 2 liitettä 6.4.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikan koulutusohjelma
Ammatillinen pääaine	Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaaja	Lehtori Vesa Linja-aho
<p>Ilmaston muuttuessa hiilineutraalien energiavaihtoehtojen kehittäminen on entistä tärkeämpää. Helsingin alueella on tuhansia bussipysäkkejä, joista valtaosa on valaistu perinteisillä menetelmillä. Tämän työn tavoite on kehittää ympäristöystävällinen ja verkkovirrasta riippumaton tapa valaista bussipysäkkejä yhteistyössä JCDecaux Finlandin kanssa. Prototyypin on määrä tyydyttää JCDecaux Finlandin vaatimukset ja pysyä toimintakuntoisena ympäri vuoden Suomen ilmastossa.</p> <p>Uusiutuvat energianlähteet tuottavat harvoin sähköä jatkuvasti, joten ne yhdistetään yleensä energiavarastoon. Työssä selvitettiin ensin eri vaihtoehtoja Helsingin bussipysäkeille sopivista energian varastointiratkaisuista. Tutkimus osoittaa, että paras vaihtoehto näistä on sellainen, joka yhdistää monikideaurinkopaneeleja ja varavoimatarkoitukseen suunniteltuja lyijyakkuja. Seuraavaksi kokeiltiin laboratorio-olosuhteissa, kuinka valitut komponentit toimivat pakkaslämpötiloissa.</p> <p>Lopuksi mallinnettiin prototyyppi, joka kykenee tuottamaan ja varastoimaan tarpeeksi energiaa pysyäkseen toimintakuntoisena ympäri vuoden. Prototyyppi koostuu seuraavista osista: monikidepaneeleista, joiden maksimiteho on 270 W, 12 V:n lyijyakuista, joiden maksimikapasiteetti on 950 Ah, MPPT-tekniikalla toimivasta lataussäätimestä, joka kykenee 30 A:n latausvirtaan, 10 W:n LED-valaisimesta sekä liike- ja hämärätunnistimesta. Tutkimus myös ehdottaa mahdollisia jatkokehitysideoita, joita voidaan harkita sen jälkeen, kun prototyyppiä on ensin testattu Helsingin bussipysäkeillä talvella 2019–2020.</p>	
Avainsanat	Valaistus, aurinkoenergia, energian varastointi

Author Title Number of Pages Date	Sid Oksala Off-grid Solutions for Illuminating Bus Stops in the Helsinki Region Using Renewable Energy 38 pages + 2 appendices 6 April 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Program	Automotive Engineering
Professional Major	Automotive Design
Instructor	Vesa Linja-aho, Senior Lecturer
<p>Climate change makes finding environmentally sustainable alternatives for carbon-based energy more important than ever. The Helsinki region has thousands of bus stops, the majority of which are lit up using conventional methods. This thesis carried out in collaboration with JCDecaux Finland, aims to find an environmentally sustainable, off grid solution for lighting up bus stops. The solution will satisfy the restrictions set by JCDecaux Finland and it will function in the Finnish climate.</p> <p>Renewable energy is usually unable to produce power seamlessly, so it is often coupled with a power bank. The thesis begins by researching the possible methods of generating and storing renewable energy which are suitable for the Helsinki bus stops. It shows that the best option is one designed around polycrystalline solar panels and UPS style lead-acid batteries. The thesis then tests in the Metropolia laboratories how these technologies function in subzero temperatures. It models a prototype capable of generating and storing enough energy to remain functional around the year. This prototype comes in the form of polycrystalline panels with a total rated capacity of 270 W, 12 V lead-acid batteries with a maximum capacity of 950 Ah, a MPPT style solar charge controller rated for 30 A, a 10 W LED, and a motion sensor. The thesis concludes with ideas for further research and suggests that these could be developed once the prototype has undergone real world testing in the winter of 2019-2020.</p>	
Keywords	lighting; solar power; off-grid

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	JCDecaux'n prototyyppi	2
3	Vaihtoehtojen kartoitus	5
3.1	Selvitys akkuvaihtoehtoista	5
3.1.1	Akkuvalinnan kriteerit	5
3.1.2	Selvitys nikkeliakkuvaihtoehtoista	6
3.1.3	Selvitys lyijyakkuvaihtoehtoista	7
3.2	Selvitys akkukapasiteetin tarpeesta	8
3.3	Selvitys aurinkopaneelivaihtoehtoista	9
3.4	Selvitys vaihtoehtoisista energianlähteistä aurinkovoiman rinnalla	10
4	Laskennallinen arvio energiankulutuksesta ja -tuotosta	11
4.1	Laskennallinen arvio valaistuksen energian kulutuksesta	11
4.2	Laskennallinen arvio aurinkopaneelin talviaikaisesta tuotosta	16
4.3	Laskennallinen arvio talven nettoenergiantarpeesta	19
4.3.1	Energiantarve 90 W:n paneelitehon järjestelmälle	19
4.3.2	Energiantarve 180 W:n paneelitehon järjestelmälle	20
4.3.3	Energiantarve 270 W:n paneelitehon järjestelmälle	22
4.3.4	Energiantarve 360 W:n paneelitehon järjestelmälle	23
5	Komponenttien testaus	25
5.1	Testien toteutus	25
5.2	10 W:n LED-valaisimen kytkentä akkuun lataussäätimen kautta	26
5.3	90 W:n monikideaurinkopaneelin kytkentä akustoon PWM-säätimellä	28
5.4	90 W:n monikideaurinkopaneelin kytkentä akustoon MPPT-säätimellä	30
	Prototyypin esittely	33
5.5	Prototyypissä käytetyt akut	33
5.6	Prototyypissä käytetty lataussäädin	34

5.7	Prototyypissä käytetyt aurinkopaneelit	35
5.8	Prototyypin energiankulutuksen ja tuoton arvio talvikaudelta	35
6	Yhteenveto	37
	Lähteet	38
	Liitteet	
	Liite 1. Kytkenäkaavio	
	Liite 2. Akun ohjekirja	

Lyhenteet

MPPT	Maximum Power Point Tracking. Aurinkopaneelijärjestelmän lataussäädin, joka etsii korkeimman mahdollisen lataustehon.
PWM	Pulse With Modulation. Pulssinleveysmodulaatio.
UPS	Uninterrupted Power Supply. Keskeyttämätön virransyöttö.

1 Johdanto

Ilmastokriisin uhatessa nykypäivän ongelmiin etsitään kiireellä ympäristöystävällisempiä ratkaisuja. Tämä on nähtävissä elämämme joka aspektissa ruokatottumuksista julkiseen liikenteeseen. Lähestulkoon kaikilla aloilla pyritään ottamaan käyttöön kestävän kehityksen periaatteen mukaisia toimintatapoja ja menetelmiä. Yksi esimerkki tästä on perinteisten energiamuotojen korvaaminen uusiutuvalla energialla. Haastetta vaikeuttaa se, että ratkaisujen tulisi olla ympäristöystävällisen lisäksi myös luotettavia ja taloudellisesti kannattavia. Tämän opinnäytetyön tavoite on yhteistyössä JCDecaux Finland Oy:n kanssa kehittää luotettava, kestävä, taloudellisesti kannattava ja ennen kaikkea ympäristöystävällinen ratkaisu pääkaupunkiseudun bussipysäkkien valaisuun.

JCDecaux on ranskalainen ulkomainontaan keskittynyt yritys, joka perustettiin vuonna 1964. Sen jälkeen JCDecaux on kasvanut nopeasti, ja sillä on nykyään toimintaa yli 80 valtiossa. [1.] Suomessa JCDecaux aloitti toimintansa vuonna 1989 kun se osti 40 % suomalaisesta ulkomainontayrityksestä Maximediasta. Vuonna 2001 Maximediasta tuli JCDecaux Finland Oy. [2.] Suomessa JCDecaux tunnetaan kenties parhaiten pysäkkikatoksistaan. Katokset juontavat juurensa 60-luvun loppupuolelle, ja nykyään JCDecauxlla on tuhansia pysäkkikatoksia ympäri Suomea. Pysäkkikatokset tarjoavat arvokasta ulkomainontatilaa ja tästä johtuen ovat taloudellisesti kannattavaa liiketoimintaa.

Bussipysäkeille on asennettu valaistus, joka lisää pysäkkien viihtyvyyttä ja turvallisuutta pimeällä. Tähän asti valaistus on toiminut verkkovirralla. Verkkovirtakaapelit tuodaan pysäkeille maanalaisesti. Kaivu- ja sähköasennustyöt ovat työläitä, aiheuttavat merkittävää haittaa liikenteelle ja ennen kaikkea tulevat kalliiksi. Tämän jälkeen juoksevaksi kuluksi muodostuu sähköliittymän hinta, joka muodostuu merkittäväksi kulueräksi pitkän ajan kuluessa. Vuoden 2018 talvella JCDecaux kehitti prototyypin, jonka tarkoituksena oli valaista bussipysäkkejä ympärivuotisesti aurinkoenergialla, jota varastoitiin lyijyakuun. Tämä prototyyppi asennettiin noin kymmeneen pysäkkiin ympäri pääkaupunkiseutua. Vähävaloinen talviaika osoittautui ongelmalliseksi, sillä aurinkopaneeli ei tuottanut tarpeeksi sähköä valaistusta varten eikä akun kapasiteetti ollut tarpeeksi suuri kompensimaan paneelin heikkoa tuottoa. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kehittää

JCDecaux'n luomaa prototyyppiä ja saada siitä toimiva ja luotettava ratkaisu bussipysäkkien ympärivuotiseen valaistukseen.

2 JCDecaux'n prototyyppi

JCDecaux'n prototyyppi koostui 100 Ah:n akusta, 90 W:n aurinkopaneelista ja 10 W:n LED-valaisimesta. Prototyypin tarkempi osalista löytyy taulukosta 1. Kesällä prototyyppi toimi erinomaisesti, mutta marraskuun ja maaliskuun välisenä aikana sen akkukapasiteetti tai aurinkopaneelin tuotto ei riittänyt lampun energiantarpeen kattamiseen. Akkua jouduttiin vaihtamaan talven pimeimpinä aikoina kolmen viikon välein. Tämä oli sekä epäkäytännöllistä että kallista.

Taulukko 1. JCDecaux'n alkuperäisen prototyypin osalista.

Sähkönumero	Osa	Hinta (€)	Huomioita
8745056	Akkukotelo	16,90	
26 183 69	Lyijyakku	270,00	Jännite: 12 V Kapasiteetti: 100 Ah tai 1200 Wh
	Aurinkopaneeli	100,00	Teho: 90 W Malli: Monikide Astekulma: 45 Suuntaus: Etelä
	Paneelin jalka	183,00	
	Lataussäädin	35,00	Malli: PWM Maksimiteho: 150 W Lepovirrankulutus: 0,03 A
	Liiketunnistin	93,00	Malli: Compact MD-C360i Sekä liike- että hämätunnistin Lepovirrankulutus: 0,01 A
	Katon muutostyöt	175,45	Mm. paneelin jalustan kiinnitys, ja akkukotelon paikan luonti
	Pientarvike	30,00	Sisältää: liittimiä, johtimia, sulakkeen, yms.
	LED-valaisin	NA	Teho: 10 W Mitattu virrankulutus: 0,90 A – 0,80 A
	Yhteensä:	903,35 + valaisimen hinta	

Bussipysäkin talvivalaistuksen ongelman ydin on, että JCDecaux'n luoman prototyypin yksi 90 W:n aurinkopaneeli ei yksinään tuota tarpeeksi energiaa bussipysäkin valaistukseksi talvella. Tämän lisäksi tällä hetkellä käytössä olevan 100 Ah:n akun kapasiteetti ei nykyisellä latausteholla riitä talvikuukausien läpi. Tutustumalla nykyisen järjestelmän

komponentteihin (valaisin, liiketunnistin ja akunhallintajärjestelmä) ja niiden markkinoilla oleviin vaihtoehtoihin käy ilmi, että virrankulutusta ei juuri saa laskettua nykyisestä. Ongelma ei siis ratkea niinkään leikkaamalla kulutusta vaan nostamalla sekä akkukapasiteettia että talviajan energiantuottoa. Mahdolliset ratkaisut voidaan käytännössä jakaa kolmeen eri kategoriaan: valittu akkuteknikka ja -kapasiteetti, aurinkopaneelien määrä ja sijainti sekä muut mahdolliset sähköntuottotavat.

JCDecaux'n kehittämän prototyypin ja viime talvella kerättyjen tietojen perusteella voidaan laskea suuntaa-antavasti, kuinka paljon energiaa tarvitaan valaisemaan bussipysäkki talven läpi. 10 W:n LED-valaisimen virrankulutus on laskennallisesti 0,83 A ja käytännön mittausten mukaan vaihtelee välillä 0,80 A – 0,90 A. Liiketunnistin ja lataussäädin kuluttavat yhteensä noin 0,04 A. Aurinkopaneeli osoitti etelään, ja se oli 45 asteen kallistuskulmassa. Talviaikaan aurinkopaneelin voidaan olettaa tuottavan 5 Wh – 20 Wh päivässä, jos se ei ole lumen peitossa. Jotta lumen kertymistä voidaan välttää, aurinkoenergia-asiantuntija Janne Käpylehdon mukaan aurinkopaneeleille vaaditaan vähintään 60 asteen kallistuskulma, joten on mahdollista, että aurinkopaneelit eivät tuota näinkään paljon. [3.] Bussipysäkin valojen toimintaa on tarkkailtu ja akku on jouduttu vaihtamaan noin kolmen viikon välein täyteen ladattuun akkuun. Vaihtohetkellä akku on ollut tyhjä, joten akku on kestänyt alle kolme viikkoa. Tarkemman tiedon puuttuessa oletetaan, että akku on kestänyt kaksi täyttä viikkoa. Tällöin pätee seuraava:

Liiketunnistimen ja lataussäätimen teho on

$$0,04 \text{ A} * 12 \text{ V} = 0,48 \text{ W}$$

jolloin niiden käyttämä energia kahden viikon aikana on

$$0,48 \text{ W} * 336 \text{ h} = 161,3 \text{ Wh} \approx 160 \text{ Wh.}$$

Tällöin 1200 Wh:n akkuun jää 1040 Wh LED-valaisimen polttamiseen kahden viikon aikana.

LED-valaisin palaa 10 W:n teholla, joten voidaan laskennallisesti todeta, että kahden viikon aikana LED-valaisin voi palaa

$$\frac{1200 \text{ Wh} - 161,3 \text{ Wh}}{10 \text{ W}} = 103,87 \text{ h}/2 \text{ viikkoa} = 7,42 \text{ h/vrk} = 7 \text{ h } 25 \text{ min/vrk}$$

Tämä tarkoittaa, että LED-valaisin palaa arviolta noin 7 h 25 min päivässä. Tulevien las-
kujen vuoksi tämä tullaan pyöristämään seitsemään ja puoleen tuntiin.

Tämä tarkoittaa, että päivän energiankulutus on seuraava:

$$7,5 \text{ h} * 10 \text{ W} + 24 \text{ h} * 0,48 \text{ W} = 86,52 \text{ Wh.}$$

Ongelmia syntyy siis niinä kuukausina, joina aurinkopaneeli tuottaa päivässä keskimää-
rin alle tämän määrän sähköenergiaa (valon puutteesta johtuen marras- ja joulukuu, ja
lumesta johtuen tammi- ja helmikuu).

Näille neljälle kuukaudelle (marras–helmikuu), LED-valaisimen laskennallinen kulutus on
siis 12 voltin järjestelmässä seuraava:

$$86,52 \text{ Wh} * 30 \text{ pv} * 4 \text{ kk} = 10382 \text{ Wh} = 865,2 \text{ Ah.}$$

Todellisuudessa LED-valaisin todennäköisesti kuluttaa vähemmän kuin laskelmassa on
oletettu. Marraskuun alussa tai helmikuun lopussa päivät ovat merkittävästi pidempiä
kuin joulukuun lopussa. Päivän ollessa pidempi ja luonnollisen valon määrän suurempi
LED-valaisin palaa merkittävästi vähemmän vuorokauden aikana ja täten kuluttaa vä-
hemmän energiaa.

3 Vaihtoehtojen kartoitus

3.1 Selvitys akkuvaihtoehtoista

Uusiutuvien energialähteiden suurin ongelma on niiden epäsäännöllisyys. Esimerkiksi tilanteet, jossa tarvitaan aurinkovoimalla tuotettua sähköä vain ja ainoastaan, kun aurinko paistaa, ovat hyvin harvinaisia. Tämä ongelma pätee lähes kaikkiin uusiutuviin energialähteisiin, ja tämän takia niitä yleensä käytetään joko hybridijärjestelmissä tai energiavaraston kanssa. Koska tuotettu energiamuoto on sähkö ja valittu valaisin on sähköllä toimiva LED-valaisin, on luonnollista valita energiavarastoksi perinteinen sähkökemiallinen akku.

3.1.1 Akkuvalinnan kriteerit

Eri akkukemioita on useita, ja ensimmäinen tehtävä on valita niistä sopiva. Käytännössä vaihtoehdot rajoittuvat litium-, nikkeli- tai lyijyakkuihin. Litiumioniakut ovat nykyään suosittu vaihtoehto. Ne ovat kevyitä ja pieniä, mutta ne ovat usein kalliita ja vaativat, että lataus tapahtuu 0 °C:n ja 40 °C:n välisessä lämpötilassa [4, s. 151]. Jos käytetään edullisia Li-ion-akkuja, esimerkiksi LiFePo₄-akkuja (alk. 5 €/Ah 12 V:n järjestelmässä), akkukapasiteettia tarvitaan merkittävästi enemmän. Tämä johtuu siitä, että kapasiteetin tulee riittää hämävien päivien lisäksi niille päiville, joina akun lämpötila pysyy nollan alapuolella. Suomen ilmastossa tämä lisää vaadittavaa akkukapasiteettia merkittävästi, mikä tulee hyvin kalliiksi. Toinen vaihtoehto olisivat nikkeli-pohjaiset akut, jotka ovat käyttöominaisuuksiltaan lupaavampia. Ne ovat lyijyakkua hieman kalliimpia, mutta niillä on monia hyviä puolia, kuten syklikestävyys. Kolmas vaihtoehto on perinteinen lyijyakku. Muihin ratkaisuihin verrattuna lyijyakut ovat edullisia (jopa 1 €/Ah 12 V:n järjestelmässä), ja niitä voi ladata lähes lämpötilasta riippumatta. Lyijyakkujen suurin ongelma on niiden fyysinen koko. Lyijyakut ovat esimerkiksi Li-ion-akkuja merkittävästi raskaampia, ja muotonsa puolesta niiden sovittaminen pieneen tilaan voi olla haastavaa. Jotta lyijyakut saataisiin bussipysäkin kattoon sisään huomaamattomasti, tämä todennäköisesti tarkoittaisi kalliiden lyijyakkujen käyttöä (noin 4–5 €/Ah).

Akkutekniikan valitsemiseen on useita kriteereitä. Näistä merkittävimmät ovat akkujen lämmönsieto-ominaisuudet, hinta, suhteellinen koko ja paino, itsepurkautumisaika ja

saatavuus. Näistä kriteereistä johtuen litiumakut voidaan nopeasti hylätä vaihtoehtona. Ne ovat kalliita, ja ne pitäisi ladata 0 °C:n ja 40 °C:n lämpötila-alueella, tai muuten ne vaurioituvat. Tämä ei suunnitellussa käyttötarkoituksessa ole aina mahdollista. Lyijyakujen lisäksi jäljelle jäävät akut voidaan luokitella niiden elektrodien materiaalien perusteella. Negatiivinen elektrodi koostuu yleensä joko kadmiumista, raudasta tai sinkistä ja positiivinen taas nikkeli- tai hopeaoksidista. Hopeaoksidit ovat hyvin toimivia mutta niiden elinkaari on lyhyt ja niitä käytetäänkin pääasiassa vain sotilaskäytössä [4, s. 142]. Ne voidaan siis myös poissulkea. Jäljelle jäävät vaihtoehdot ovat joko nikkeli- tai lyijy-akut.

3.1.2 Selvitys nikkeliakkuvaihtoehdoista

Nikkeli-kadmiumakut ovat olleet suhteellisen menestynyt akkukemia. Niillä on korkeampi energiatiheys kuin lyijyakuilla: lyijyakun energiatiheys on n. 35 Wh/kg, kun taas nikkeli-kadmiumakun on n. 60 Wh/kg. Nikkeli-kadmiumakkuja voidaan myös ladata ja purkaa laajalla lämpötila-alueella, parhaimmillaan –30 °C:n ja 70 °C:n välillä. [4, s. 134.] Nikkelikadmiumakkujen suurin ongelma on kadmiumin myrkyllisyys sekä ihmisille että ympäristölle. Tästä johtuen ne on kielletty lähes kaikissa käyttökohteissa EU-direktiivissä 2006/66/EY, joka astui voimaan syyskuussa 2008 [5].

Nikkeli-rauta-akut ovat olleet käytössä pitkään johtuen niiden korkeasta luotettavuudesta. Niitä voi yli- ja aliladata, syväpurkaa ja jopa kytkeä oikosulkuun ilman, että ne juuri vaurioituvat. Lämpötilan laskiessa niiden kapasiteetti laskee, ja tämän takia niitä harvoin käytetään –15 °C:n alapuolella. Niiden suurin ongelma on niiden huollontarve. [6, s. 25.1.] Kyseisessä käyttötarkoituksessa kuukausittainen huollon tarve; lähinnä elektrolyytin määrän tarkistus ja lisäys tuottaisi vaikeuksia.

Nikkeli-sinkkiakut on kehitetty samoihin aikoihin kuin nikkeli-rauta-akut. Toisin kuin nikkeli-rauta-akut, ne ovat merkittävästi alttiimpia vaurioitumiselle. Tästä huolimatta niillä on mahdollista korvata nikkeli-kadmiumakut johtuen niiden korkeasta energiatiheystään, noin 50 – 60 Wh/kg, pienistä ympäristövaikutuksista ja suljetusta, huoltovapaasta mallista. Ne toimivat parhaiten 10 °C:n ja 30 °C:n välissä, mutta pysyvät toimintakykyisenä myös tämän lämpötila-alueen ulkopuolella. [6, s. 31.1.] Tällä hetkellä tämän akkutyypin suurin ongelma on saatavuus. Yleisin muoto, jossa nikkeli-sinkkiakkuja valmistetaan, on

noin 900 – 2000 mWh:n AA-paristo. Vaikka ne ovatkin uudelleen ladattavia ja sen kanalta toimisivat hyvin kyseisessä käyttötarkoituksessa, niitä tarvittaisiin hyvin suuri määrä, mikä tuottaisi hankaluuksia niiden asennuksen ja huollon yhteydessä.

Jäljelle jäävä nikkelpohjainen akku on nikkeli-metallihydridiakku. Korkeasta energiatiheydestään johtuen se on toiminut vaihtoehtona nikkeli-kadmiumakuille monissa käyttökohteissa, kuten puhelimissa ja tietokoneissa. Ajan myötä nikkeli-metallihydridiakut ovat kuitenkin hävinneet litiumioniakuille, joilla on vielä korkeampi energiatiheys. Niiden suurin ongelma kyseisessä käyttökohteessa on niiden tarkat vaatimukset latauksen ja purkauksen suhteen. [6, s. 29.1.] Aurinkoenergian tuoton epäsäännöllisyys todennäköisesti lyhentäisi akkujen elinikää merkittävästi.

3.1.3 Selvitys lyijyakkuvaihtoehdoista

Lyijyakut ovat helposti saatavia ja edullisia. Ne sietävät latausta ja purkausta melkein lämpötilasta riippumatta ja niitä saa kaiken kokoisina ja muotoisina. Niiden suurimmat ongelmat ovat, että ne ovat melko raskaita ja, että varaustasosta riippuen niiden elektrolyytti voi olla altis jäätymiselle, jolloin akku vaurioituu pysyvästi. GNB:n tuottaman tutkimuksen mukaan täydessä varauksessa oleva lyijyaku jäätyy vasta noin -70 °C :ssa, mutta tyhjä lyijyaku jäätyy jo noin -7 °C :ssa. Saman tutkimuksen mukaan 50 %:n varauksessa oleva lyijyaku jäätyy noin -32 °C :ssa. [7, s. 38.]

Jotta voidaan taata, että lyijyaku pysyy toimintakuntoisena talven läpi, täytyy järjestelmässä olla tarpeeksi akkukapasiteettia, jotta LED-valaisin palaa ja akkujen varaustaso ei putoa liian matalalle. Tämä tarkoittaa, että prototyyppiin jouduttaisiin asentamaan suuri määrä lyijyakkuja, mikä nostaa prototyypin painoa merkittävästi. Tästä huolimatta uskon, että lyijyakut ovat paras akkuvaihtoehto tähän käyttötarkoitukseen. Ratkaisu on todennäköisesti käyttää UPS-käyttöön suunniteltuja päätynapa-akkuja. Ne ovat usein kapasiteetiltaan suuria ja muodoltaan kohteeseen sopivia.

3.2 Selvitys akkukapasiteetin tarpeesta

Tarvittava akkukapasiteetti on riippuvainen sekä virran kulutuksesta että ulkoisista tekijöistä, lähinnä lämpötilasta. Jos oletetaan tässä vaiheessa käytävän lyijyakkuja, niin alhaisilla lämpötiloilla niiden kapasiteetti laskee, ja kun niitä puretaan, niiden jäätyislämpötila nousee. Täten kapasiteettia täytyy olla tarpeeksi kestäämään sekä kuluttajien sähköenergian tarve että Suomen ankarat ilmasto-olosuhteet.

Talvella 2018–2019 100 Ah:n lyijyakkuja vaihdettiin noin kolmen viikon välein. Laskin tämän tiedon perusteella, että arvioitava sähkövarauksen kulutus talven aikana on noin 850 Ah. Tämän lisäksi tarvitaan riittävästi varausta, jotta järjestelmällä on riittävä varmuuskerroin ja että akkujen jäätympiste ei nouse liikaa. Mikäli lyijyakku pääsee jäätymään, se ei luovuta sähköenergiaa ja on erittäin todennäköisesti korvattava uudella. Jotta akuston toiminta voidaan taata talven läpi myös harvinaisissa mutta mahdollisissa kovissa pakkasissa, on sen varaustaso pidettävä aina yli 50 %:n. Tämän perusteella voidaan laskea, että jos tarvitaan 850 Ah varausta kuluttajia varten, niin tarvitaan yhteensä noin 1700 Ah varausta, jotta akut eivät jäädy ja varmasti pysyvät toimintakuntoisena. Tämän lisäksi on otettava huomioon, että kylmissä olosuhteissa akun varaustaso laskee. On siis mahdollista, että 1700 Ah ei vielä riitä takaamaan lyijyakkujen toimintakuntoa talven läpi. Akkuvalmistajat ovat myös esittäneet huolia siitä, että akkujen elinikä tässä käyttökohteessa saattaa olla erittäin lyhyt. Tällöin herää kysymys, onko taloudellisesti kannattavaa kustantaa valtava akusto, jos sen joutuu uusimaan parin vuoden välein.

Tämä vaihtoehto koostuisi siis vähintään 1000 Ah:n akustosta ja todennäköisesti useammasta 90 W:n aurinkopaneelistä, jotta massiivista akustoa saadaan ladattua. Aurinkopaneelien hinta ja tilantarve eivät juuri tuota vaikeuksia, mutta valtava akusto on ongelmallisempi. Jos valitaan esimerkiksi SLO:lta tilattuja POWERSAFE 12V190F 190Ah-malliset akut, joiden ohjehinta on 482 €/kpl, niin kyljellään asennettuna 5 kappaletta vaatisi noin 0,17 m² tilaa ja painaisi yli 250 kg. Tämä vaatisi rakenteellisia muutoksia bussipysäkin kattoon ja varmistusta siitä, että akut selviävät ankarista talviolosuhteista. Muutamaa kappaletta tulee testata laboratorioissa ensin.

3.3 Selvitys aurinkopaneelivaihtoehdoista

Toinen osa projektia on selvittää, mikä on paras tapa hyödyntää aurinkoenergiaa. Muutamalla aurinkopaneelien määrää ja sijoitusta voidaan vaikuttaa merkittävästi tuotetun energian määrään. JCDecaux on esittänyt, että paneelit halutaan mahdollisimman litteästi kattoa vasten, jotta ne olisivat huomaamattomia. Käytännössä niihin vaaditaan vähintään 15 asteen kulma, jotta lumi, vesi ja roskat eivät kerry niiden päälle. Mikäli aurinkopaneelien asennosta ja sijainnista ei olla valmiita joustamaan, aurinkopaneelien määrän kasvattamisesta on pienempi hyöty, sillä lumen peitossa paneelit eivät tuota sähköä niiden määrästä riippumatta. Jos aurinkopaneelien asennosta ollaan valmiita joustamaan, ne kannattaisi asettaa katolle 60 asteen kulmaan. Tällöin kesällä tuotettu energia on hieman pienempi, mutta lumen aiheuttama haitta pienenee oleellisesti. Kasvattamalla aurinkopaneelien määrää jopa talvella voidaan saada merkittävä määrä energiaa tuotettua. Tällöin suhteellisen kallista akkukapasiteettia voidaan laskea. Mikäli ollaan valmiita hyväksymään tämän ratkaisun aiheuttamat ulkonäkömuutokset, se vaikuttaisi lupaavalta vaihtoehdolta. Tämä olisi ratkaisu, joka todennäköisesti toimisi myös Pohjois-Suomessa, missä lumi on ongelma vielä pidempään.

Yksi menetelmä ratkaista aurinkopaneelien ongelma olisi korvata bussipysäkin seinät joko kokonaan tai osittain läpikuultavilla ns. bipolaaripaneeleilla, jotka kykenevät lataamaan paneelin kummaltakin puolelta. Tällöin jokaiseen pysäkkiin saataisiin merkittävä määrä aurinkopaneeleja, joihin lumi, jää ja roskat eivät juuri vaikuta. Koska niihin ei kerry lunta tai jäätä, ne kykenevät tuottamaan energiaa myös niinä kuukausina, jolloin lumi ja jää ovat yleisesti ongelma. Tällä menetelmällä saataisiin myös kasvatettua paneelien pinta-alaa, jolloin heikosta valosta riippumatta saataisiin aikaiseksi hyvä latausteho. Paneelit pystysuoraan asennettuna eivät tietenkään tuota yhtä paljon kuin valon kannalta optimaalisessa 45 asteen kulmassa, mutta koska niiden määrää saadaan kasvatettua hyvin suureksi, tällä ei ole juuri merkitystä.

Vaihtoehtoisesti katto voitaisiin korvata aurinkopaneeleilla. Jos katto korvattaisiin bipolaaripaneeleilla ja asetettaisiin noin 30 asteen kulmaan, niin vaikka katon päällä olisi lunta, sen alapintaan heijastuisi riittävästi valoa merkittävän lataustehon aikaansaamiseksi. [3.]

Molemmat ovat teoriassa mielenkiintoisia ideoita, mutta myös niihin liittyy ongelmia. Ensimmäisessä vaihtoehdossa ongelmana on sen alttius vandalismille. Bussipysäkkien lasiseiniä rikotaan tai sotketaan harmillisen usein, mikä luonnollisesti heikentää aurinkopaneelin tuottavuutta. Toisen vaihtoehdon ongelma on pysäkin kattoon vaadittavat radikaalit muutokset.

3.4 Selvitys vaihtoehtoisista energianlähteistä aurinkovoiman rinnalla

Viimeinen ratkaisu on lisätä muita energialähteitä pysäkille. Yksi tapa olisi vaihtaa akkuja talven mittaan täyteen ladattuihin, mutta tässä on useita ongelmia. Koska on todennäköistä, että käytettävänä akkutekniikkana tulee olemaan lyijyakku, on hyvin epätodennäköistä, että akkujen vaihto olisi tehtävissä kevyesti ja kätevästi. Joko akkuja olisi muutama, jolloin yksi akku painaisi kymmeniä kiloja, tai niitä olisi useita, jolloin niiden suuri määrä tekisi niiden vaihdosta epäkäytännöllistä. Järjestelmässä, jossa akkuja vaihdetaan, tulee ongelmalliseksi myös akkukapasiteetin koko. Jos kapasiteetti on pieni, akkuja täytyy vaihtaa tiheään, mikä on kallista. Jos kapasiteetti on suuri, akut itsessään ovat kalliita ja niiden vaihto vaikeampaa. Vaihto verkkovirrasta ladattuihin akkuihin, joita kuljetetaan edestakaisin myös, vähentäisi bussipysäkin valaistuksen ympäristöystävällisyyttä.

Toinen tapa lisätä bussipysäkin valaisuun käytettäviä energialähteitä olisi ottaa aurinkopaneelien lisäksi käyttöön jokin toinen energiantuottomenetelmä. Tyypillisin kandidaatti olisi tuulivoima, mutta siinä on useita ongelmia. Niin sanotut huoltovapaat voimalat, kuten Windside-merkkinen tuulivoimala, maksavat paljon, ja huollettavia tuulivoimaloita taas täytyy nimensä mukaisesti huoltaa vuosittain. Suurin ongelma tuulivoiman käytössä on kuitenkin se, että valtaosa bussipysäkeistä ei sijaitse tuulivoimalalle sopivalla paikalla. Koska pysäkit ovat yleisesti rakennetuilla alueilla, on tuuli hyvin turbulენტista. [3.] Tämä ongelma ratkeaisi laittamalla tuulivoimala jonnekin, missä ilmavirtaus on enemmän laminaarista. Sopiva sijainti kuitenkin todennäköisesti olisi joko hyvin korkealla tai kaukana bussipysäkeistä. Tämä ymmärrettävästi tuottaa myös ongelmia. Tuulivoimalat ovat myös varsin huomiota herättäviä eivätkä monien mielestä sovi katukuvaan. Tuulivoima on hyvä uusiutuva energianlähde, mutta valitettavasti siitä on vaikeata tehdä yleispätevää ratkaisua tähän tarkoitukseen.

Kolmas vaihtoehtoinen energianlähde olisi metanolipolttokenno. Esimerkiksi yritys nimeltä Efoy valmistaa metanolipolttokennoa, joka monitoroi akun napajännitettä ja kytkeytyy päälle, kun jännite putoaa kynnysjännitteen alle. Tällöin se lataa akkua 40 W:n teholla, eli 80 Ah:n päivässä. Polttokennon kulutus on 0,9 l/kWh, ja polttokennoa saa joko 5 l:n tai 10 l:n säiliöllä. 10 l:n säiliöllä kenno tuottaisi siis 11 kWh energiaa. Tämä riittäisi helposti koko talven, jolloin polttoainetta täytyisi lisätä vain kerran vuodessa. Polttokennon tuottamaa hukkalämpöä voitaisiin myös hyödyntää akun lämmittämiseen. Tämän lisäksi koska akun varaustila pysyy jatkuvasti korkealla, on sen jäätyminen riski merkittävästi pienempi. Polttokenno itse on jokseenkin kallis (ovh. 3000 €), mutta sen käyttämä polttoaine on edullista ja polttokennon käyttö tarkoittaisi merkittävästi pienemmän akkukapasiteetin tarvetta, mikä puolestaan säästäisi rahaa. Polttokenno ratkaisee monia ongelmia, mutta ei sekään ole vailla omia hankaluuksiaan. Polttokennon ja metanolisäiliön sijoittaminen bussipysäkkiin huomaamattomasti on vaikeaa, ja metanolin käyttö ei ole hiilineutraalia sähköä.

4 Laskennallinen arvio energiankulutuksesta ja -tuotosta

Tarkkaa arviota bussipysäkin valaistuksen kulutuksesta ja aurinkopaneelin sähkötuo-
tuotosta on vaikeata laskea, sillä se on riippuvainen hyvin monesta asiasta. JCDecaux'n
prototyypin ja yleisesti saatavan datan perusteella voidaan kuitenkin laskea karkea arvio.

4.1 Laskennallinen arvio valaistuksen energian kulutuksesta

Tiedämme, että JCDecaux'n prototyypissä 100 Ah akku kesti 2–3 viikkoa. Jos pyöristetään
alaspäin ja oletetaan, että se kesti 2 viikkoa, niin se tarkoittaa, että valo palaa noin
7,5 tuntia päivässä (ks. luku 2). Oletetaan, että tämä tapahtui talven pimeimpänä aikana
eli joulukuun loppupuolella. Tällöin voidaan turvallisesti olettaa, että kun päivä pitenee ja
valon määrä lisääntyy, hämärätunnistimella varustettu LED-valaisin palaa vähemmän
aikaa. Alla olevassa taulukossa (taulukko 2) näkyy päivän pituus Helsingissä lokakuun
puolivälistä maaliskuun puoliväliin.

Taulukko 2. Päivän pituus Helsingissä lokakuun puolivälistä maaliskuun puoliväliin [8]

Päivämäärä	Päivän pituus
30.9.2019	11 h 29 min
15.10.2019	10 h 11 min
31.10.2019	8 h 39 min
15.11.2019	7 h 33 min
30.11.2019	6 h 30 min
15.12.2019	5 h 53 min
31.12.2019	5 h 57 min
15.1.2020	6 h 39 min
31.1.2020	7 h 50 min
15.2.2020	9 h 08 min
28.2.2020	10 h 19 min
15.3.2020	11 h 47 min
31.3.2020	13 h 17 min

Koska järjestelmä toimii liiketunnistimen avulla, valo luonnollisesti palaa enemmän, kun bussipysäkillä oleskellaan usein, esimerkiksi ruuhka-aikoina. Ruuhka-ajan ajankohtaa ja tarkkaa vaikutusta energiankulutukseen on kuitenkin vaikea arvioida tarkasti. Jos laskuissa oletetaan, että valo palaa tasaisesti koko pimeän ajan läpi, saadaan yläkanttiin oleva arvio. Tämä on suotavampaa prototyypin kehityksen kannalta kuin arvio, joka on alakanttiin. Käytännössä tämä tarkoittaisi, että jos päivän pituus on 5 tuntia 53 minuuttia, pimeän ajan pituus on 18 tuntia 7 minuuttia, ja tällöin valo palaa keskimäärin 25 minuuttia joka tunti. Tästä saadaan parempi arvio siitä, kuinka kauan LED-valaisin palaa pimeällä, mikä on nähtävissä seuraavassa taulukossa (Taulukko 3).

Taulukko 3. Pimeän ajan pituus ja arvio ajasta, jonka LED-valaisin palaa pimeällä Helsingissä lokakuun puolivälistä marraskuun puoliväliin. Taulukon arvot ovat korkeammat kuin em. arvot pyöristyksestä johtuen.

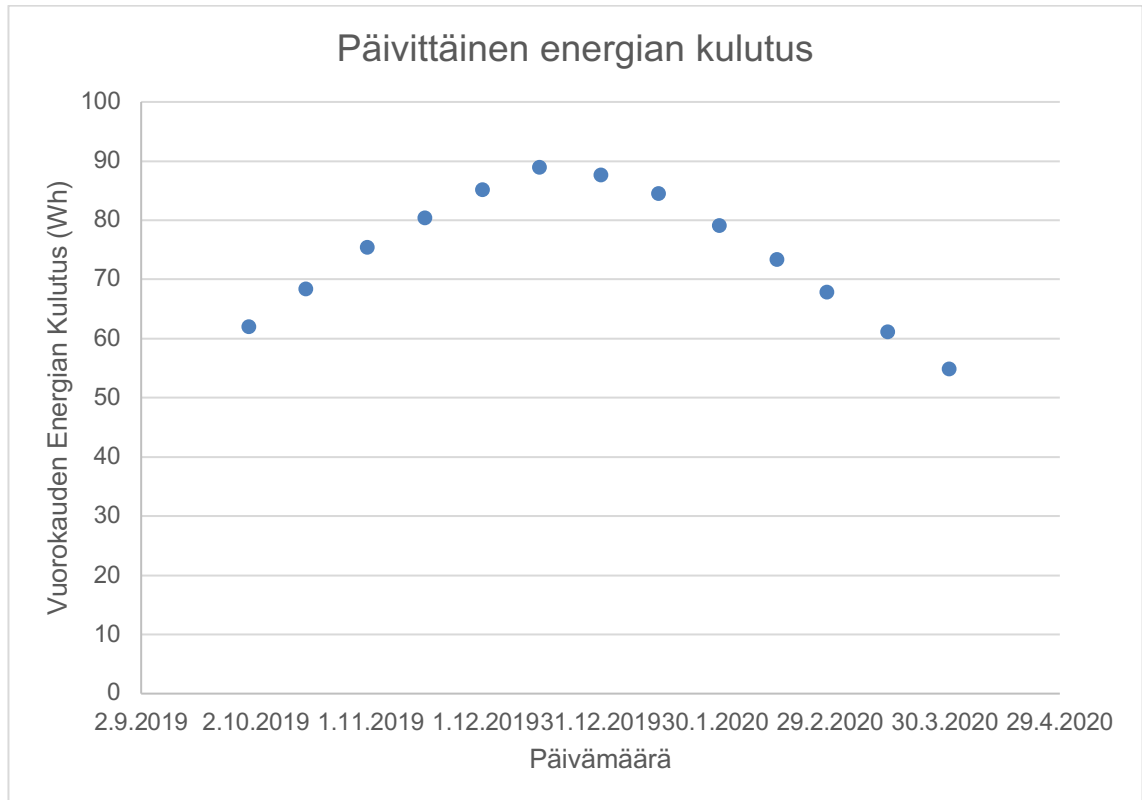
Päivämäärä	Pimeän ajan pituus	Arvioitu aika jonka LED-valaisin palaa (suluissa sama luku desimaalimuodossa laskuja varten)
30.9.2019	12 h 31 min	5 h 13 min (5,21 h)
15.10.2019	13 h 49 min	5 h 28 min (5,80 h)
31.10.2019	15 h 21 min	6 h 27 min (6,45 h)
15.11.2019	16 h 27 min	6 h 55 min (6,91 h)
30.11.2019	17 h 30 min	7 h 21 min (7,35 h)
15.12.2019	18 h 07 min	7 h 37 min (7,61 h)
31.12.2019	18 h 03 min	7 h 35 min (7,58 h)
15.1.2020	17 h 21 min	7 h 17 min (7,29 h)
31.1.2020	16 h 10 min	6 h 47 min (6,79 h)
15.2.2020	14 h 52 min	6 h 14 min (6,24 h)
28.2.2020	13 h 41 min	6 h 45 min (5,75 h)
15.3.2020	12 h 13 min	5 h 08 min (5,13 h)
31.3.2020	10 h 43 min	4 h 33 min (4,55 h)

Tämän perusteella laskettu arvio siitä, kuinka kauan LED-valaisin palaa eri ajankohtina marraskuun alusta helmikuun loppuun, on aiempaa tarkempi. Siten voidaan arvioida myös prototyypin energiantarve tarkemmin kuin ennen. Riippumatta siitä, kuinka kauan LED-valaisin palaa, hämärätunnistin ja akunhallintajärjestelmä kuluttavat aina saman verran energiaa, 5,76 Wh. Tiedämme, että LED-valaisin käyttää 0,8 A – 0,9 A virtaa palaessaan. Oletetaan käytöksi maksimivirta 0,9 A, jonka perusteella lasketaan kulutukselle seuraava arvio.

Taulukko 4. Päivän pituuteen perustuva arvio prototyypin energiantarpeesta.

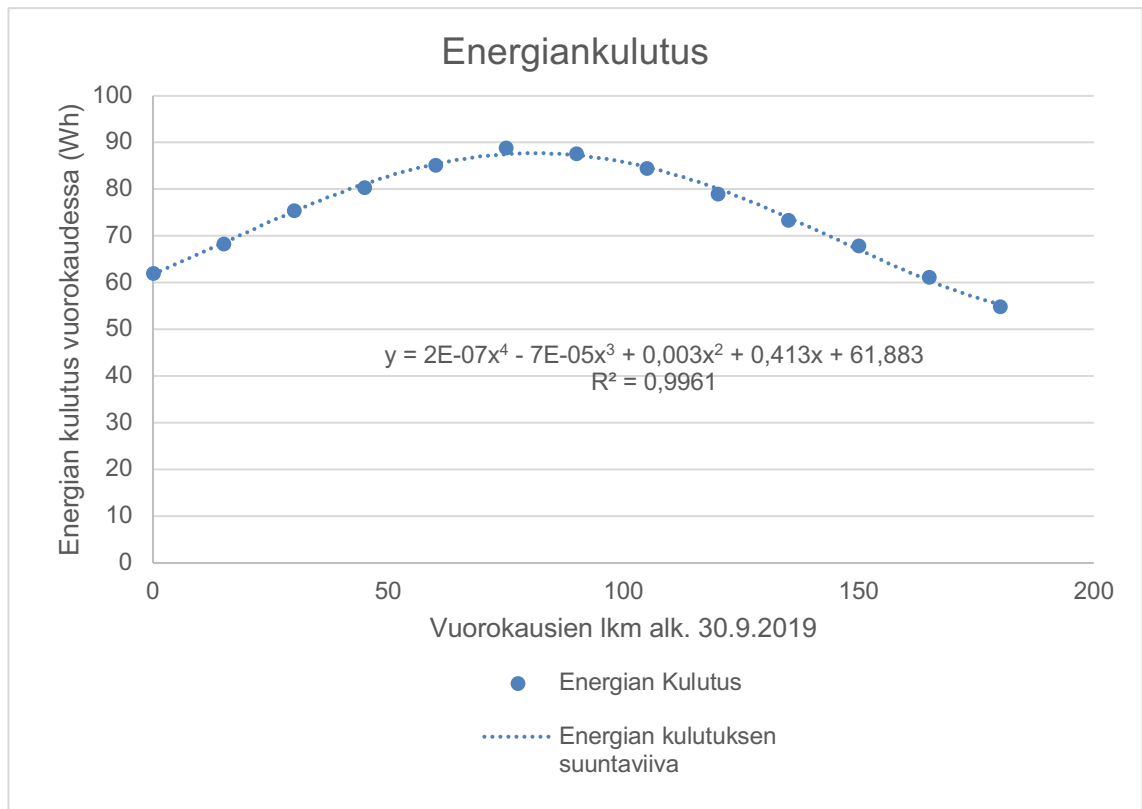
Päivämäärä	Lepovirran kulutus vuorokaudessa	LED-valaisimen kulutus vuorokaudessa	Prototyypin kokonaiskulutus vuorokaudessa
30.9.2019	5,76 Wh	56,27 Wh	62,03 Wh
15.10.2019	5,76 Wh	62,64 Wh	68,40 Wh
31.10.2019	5,76 Wh	69,66 Wh	75,42 Wh
15.11.2019	5,76 Wh	74,63 Wh	80,39 Wh
30.11.2019	5,76 Wh	79,38 Wh	85,14 Wh
15.12.2019	5,76 Wh	83,19 Wh	88,95 Wh
31.12.2019	5,76 Wh	81,86 Wh	87,62 Wh
15.1.2020	5,76 Wh	78,73 Wh	84,47 Wh
31.1.2020	5,76 Wh	73,33 Wh	79,09 Wh
15.2.2020	5,76 Wh	67,39 Wh	73,39 Wh
28.2.2020	5,76 Wh	62,10 Wh	67,86 Wh
15.3.2020	5,76 Wh	55,40 Wh	61,16 Wh
31.3.2020	5,76 Wh	49,14 Wh	54,90 Wh

Edellisen taulukon datan perusteella piirretty kuvaaja (kuva 1) havainnollistaa prototyypin energiankulutusta talviaikaan. Käyttäen tätä informaatiota lasketaan joka kuukaudelle prototyypin kokonaisenergiakulutus.



Kuva 1. Laskennallinen arvio päivittäisestä energiankulutuksesta.

Kunkin kuukauden energiankulutus on yksittäisten päivien energiankulutusten summa kuukauden ajalta. Tämän voi myös laskea käyttämällä integraalia. Tätä varten voidaan approksimoida kuvaajaa polynomilla kuvan 2 mukaisesti.



Kuva 2. Päivittäisen energiankulutuksen kuvaaja, jossa myös suuntaviiva ja sen kaava.

Kuvassa 2 nähdään saman kuvaaja kuin kuvassa 1, minkä lisäksi siinä näkyy suuntaviiva. Suuntaviivan R^2 -arvoksi on laskettu 0,9961. Tämä tarkoittaa, että suuntaviiva seuraa pisteitä 99,6 %:n tarkkuudella. Suuntaviivan yhtälö on seuraava:

$$y = 2 * 10^{-7}x^4 - 7 * 10^{-5}x^3 + 0,003x^2 + 0,413x + 61,883$$

Kuvaajan x -akseli on yksinkertaistettu laskentaa varten. Kuvaajan x -akselilla esitetään kuluneiden vuorokausien määrä laskenta-ajan alusta. Piste $x = 0$ kuvastaa ajankohtaa 30.9.2019. Käyttäen äsken saatua kaavaa ja integraalia lasketaan jokaisen kuukauden kulutus, joka esitetään taulukossa 5.

Taulukko 5. Talvikuukausien kulutus laskettuna käyttäen energiankulutuksen suuntaviivaa ja integraalia.

Kuukausi	Energian kulutus (Wh)
1.– 31.10.2019	2131,59
1.– 30.11.2019	2430,12
1.– 31.12.2019	2667,97
1.– 31.1.2020	2487,54
1.– 28.2.2020	1820,58
1.– 31.3.2020	1380,20

Talviaikaista energiankulutusta voidaan arvioida monella tavalla. Voidaan olettaa, että talvella LED-valaisin palaa joka päivä laskettu 7 tuntia 25 minuuttia, jolloin päivittäiseksi energiankulutukseksi saadaan noin 85 Wh, ja kuukausittaiseksi noin 2600 Wh. Kulutus on arvioitu käyttäen suurimpia mahdollisia kulutuksia ja on siten todennäköisesti huomattavasti todellista suurempi.

Sen sijaan, että arvioidaan LED-valaisimen palavan 7 h 25 min joka päivä, voidaan yrittää luoda tarkempia malleja, kuten edellinen, integraaliin perustuva malli. Ongelma kuitenkin on, että koska dataa on viime talvelta hyvin niukasti, on tarpeetonta kehittää tarkempia malleja, koska malli ei voi koskaan olla tarkempi kuin sen pohjana olevat lähtötiedot. Tämä luonnollisesti heikentää mallien tarkkuutta merkittävästi. Suunnitelmat perustuvat laskettuihin malleihin, joissa on varmistettu varmuuskertoimen olevan riittävän suuri, jotta prototyyppi varmasti toimii. Tämän prototyypin toiminnasta kerättyä dataa voidaan tulevaisuudessa hyödyntää mallien tarkentamiseen ja prototyypin parantamiseen.

4.2 Laskennallinen arvio aurinkopaneelin talviaikaisesta tuotosta

Aurinkopaneelin tuottoa on hyvin vaikea arvioida, koska se on riippuvainen hyvin monesta asiasta. Tuottoon vaikuttaa sään lisäksi muun muassa paneelien kulma ja suunta, sijainti, talviaikaan lumen määrä ja se, puhdistetaanko lunta paneelin päältä talven aikana. Jotta saadaan mahdollisimman tarkka arvio aurinkopaneelin talviaikaisesta tuotosta, käytössä pitäisi olla dataa erikseen jokaiselta asennuskohteelta. Tätä ei valitettavasti kuitenkaan ole käytännössä mahdollista saada työn kuluessa.

On olemassa verkkosivustoja, kuten sunnyportal.com, joihin ihmiset, yritykset ja organisaatiot keräävät tietoja omista aurinkovoimaloistaan. Tällä hetkellä nämä ovat paras tapa

arvioida aurinkopaneelien tuottoa talviaikaan. Taulukossa 6 on neljän eri pääkaupunkiseudun aurinkovoimalan tuotot marraskuusta maaliskuuhun. Taulukossa ilmoitetaan voimalan koko tuotto kultakin kuukaudelta ja sen alla suluissa tuotto suhteutettu 90 W paneelitehoon. Kaikilla voimaloilla lokakuun tuotto oli riittävän korkea LED-valaisimen polttamiseksi, joten lokakuu on jätetty pois taulukosta.

Taulukko 6. Eri aurinkovoimaloiden tuotto Suomessa [9]

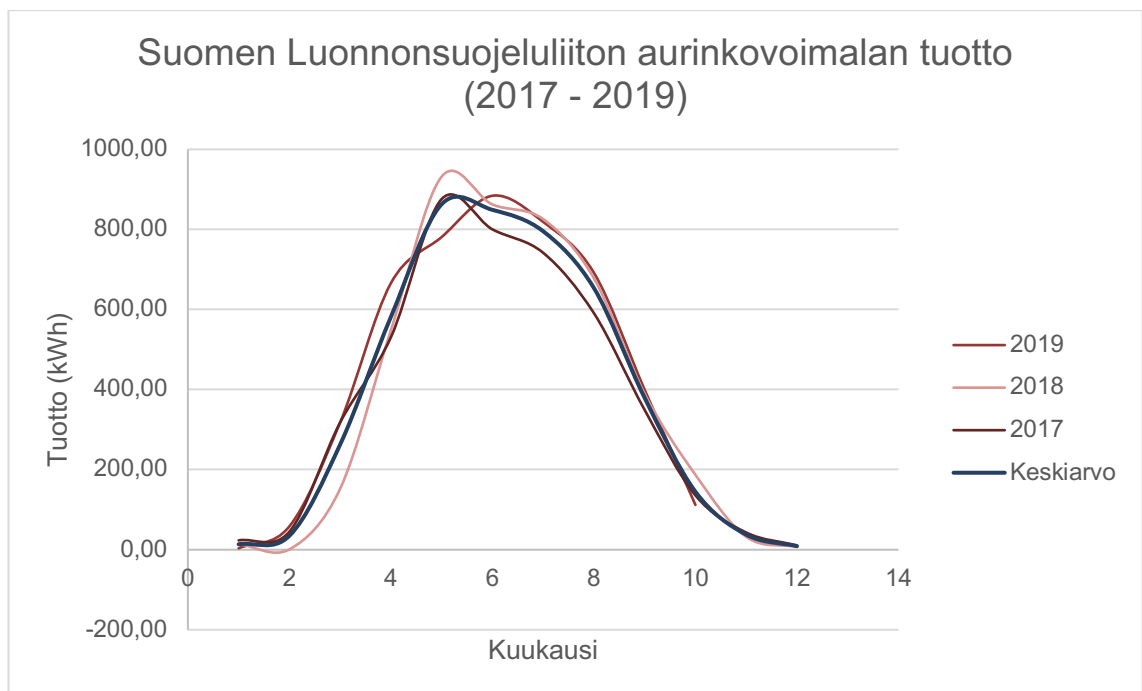
Voimala: Kuukausi	Luonnonsuojeliitto, 2018, 5200 Wp	Rukanlaki 3b, 2018, 4500 Wp	Laurinko, 2018, 3060 Wp	Kotivalo, 2018, 4500 Wp
Marraskuu	32,21 kWh/kk, (557,40 Wh/kk)	30,19 kWh/kk, (603,90 Wh/kk)	12,74 kWh/kk, (374,70 Wh/kk)	29,32 kWh/kk, (586,50 Wh/kk)
Joulukuu	7,06 kWh/kk, (122,14 Wh/kk)	8,23 kWh/kk, (164,61 Wh/kk)	3,28 kWh/kk, (96,41 Wh/kk)	6,73 kWh/kk, (134,54 Wh/kk)
Tammikuu	13,72 kWh/kk, (237,46 Wh/kk)	15,75 kWh/kk, (314,96 Wh/kk)	5,60 kWh/kk, (164,61 Wh/kk)	12,45 kWh/kk, (248,93 Wh/kk)
Helmikuu	0,86 kWh/kk, (14,84 Wh/kk)	9,37 kWh/kk, (187,32 Wh/kk)	29,97 kWh/kk, (881,44 Wh/kk)	84,91 kWh/kk, (1698,20 Wh/kk)
Maaliskuu	152,35 kWh/kk, (2636,86 Wh/kk)	290,87 kWh/kk, (5817,46 Wh/kk)	131,43 kWh/kk, (3865,70 Wh/kk)	314,54 kWh/kk, (6290,83 Wh/kk)

Suomen Luonnonsuojeluliiton voimala sijaitsee Lauttasaarella järjestön toimiston katolla. Se on perustettu vuonna 2016 ja sen maksimipaneeliteho on 5200 W. Talviaikaan voimalalta ei luoda lunta, ja paneelit osoittavat etelään. Tämä tekee siitä hyvän vertauskohteen tämän projektin aurinkopaneeleille. Eroja luonnollisesti kuitenkin on, esimerkiksi Luonnonsuojeluliiton paneelit ovat jyrkemmässä kulmassa kuin bussipysäkkien paneelit, ja koska ne sijaitsevat toimiston katolla, ne eivät koskaan ole esimerkiksi puiden varjossa. Taulukossa 7 on aurinkovoimalan tuottodataa vuodesta 2017 alkaen. Taulukkoon on laskettu kuukausittaisen tuoton keskiarvo ja suhteutettu se bussipysäkin 90 W:n paneelitehoon.

Taulukko 7. Suomen Luonnonsuojeluliiton aurinkovoimalan tuotto (kWh) kuukausittain, tuoton keskiarvo kolmelta vuodelta, ja tämä keskiarvo suhteutettuna 90 W paneelitehoon.

	Vuosi				
Kuukausi	2019	2018	2017	Keskiarvo	Suhteutettu keskiarvo
Tammikuu	3,50	13,72	23,34	13,52	0,234
Helmikuu	58,34	0,86	45,09	34,76	0,602
Maaliskuu	317,93	152,35	317,97	262,75	4,548
Huhtikuu	665,85	548,26	530,76	581,62	10,067
Toukokuu	781,06	932,05	875,95	863,02	14,937
Kesäkuu	884,14	862,35	800,19	848,89	14,692
Heinäkuu	818,87	825,87	741,68	795,47	13,768
Elokuu	691,73	678,16	590,86	653,58	11,312
Syyskuu	399,20	389,27	349,02	379,16	6,562
Lokakuu	111,86	187,05	135,66	144,86	2,507
Marraskuu		32,21	42,98	37,60	0,651
Joulukuu		7,06	10,68	8,87	0,154

Kuvassa 3 havainnollistetaan voimalan tuottoa. Kuvaajassa näkyy kolmen vuoden vuosittainen tuotto sekä niiden keskiarvo.



Kuva 3. Suomen luonnonsuojeluliiton aurinkovoimalan tuotto vuosilta 2017–2019 ja tuottojen keskiarvo.

Käyttämällä suhteutettua tuottoarviota ja laskettua teoreettista energiantarvetta voidaan laskea nettoenergiavaje kunkin kuukauden lopussa. Tämän avulla voidaan arvioida, kuinka paljon akkukapasiteettia ja paneeleja tarvitaan.

4.3 Laskennallinen arvio talven nettoenergiantarpeesta

Seuraavaksi lasketaan talven nettoenergiantarve eri järjestelmillä, joissa on yhdestä neljään 90 W:n monikideaurinkopaneelia.

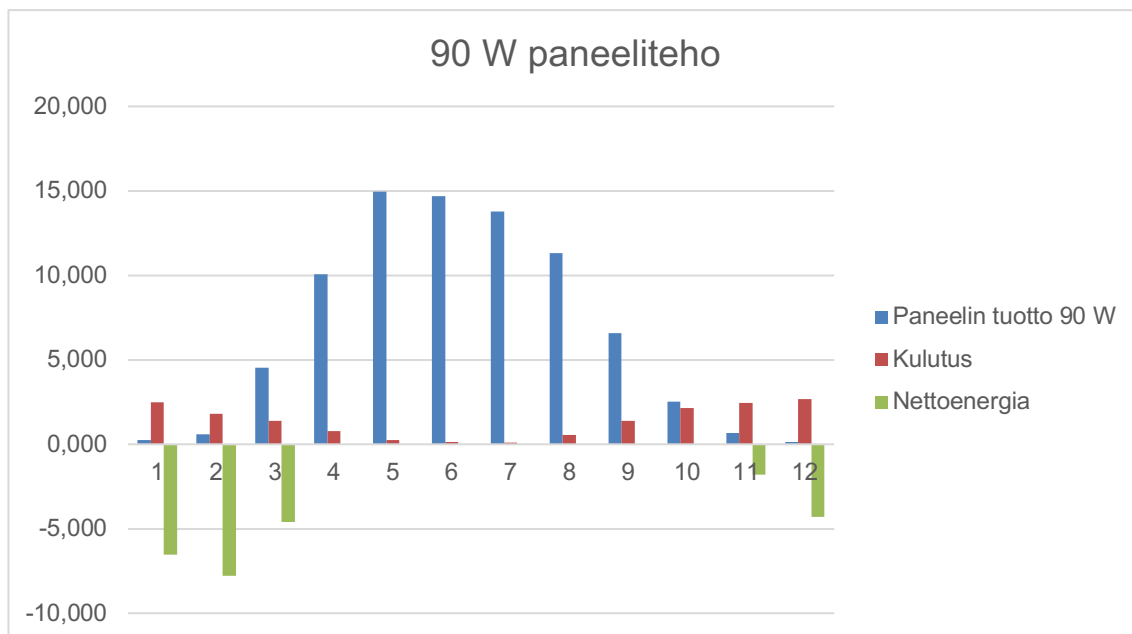
4.3.1 Energiantarve 90 W:n paneelitehon järjestelmälle

Seuraava on laskennallinen arvio talven nettoenergiantarpeesta, jos käytössä on yksi 90 W:n monikideaurinkopaneeli. Kaikki laskut on suoritettu edellä esitetyn datan perusteella.

Taulukko 8. Järjestelmän tuotto, kulutus ja netto energia jokaisen kuukauden lopussa, joka perustuu järjestelmään, jossa on käytössä yksi 90 W:n monikideaurinkopaneeli.

Kuukausi	Tuotto	Kulutus (kWh)	Nettoenergia 90 W (kWh)
1	0,234	2,488	-6,547
2	0,602	1,821	-7,766
3	4,548	1,380	-4,599
4	10,067	0,789	0,000
5	14,937	0,235	0,000
6	14,692	0,204	0,000
7	13,768	0,198	0,000
8	11,312	0,548	0,000
9	6,562	1,374	0,000
10	2,507	2,132	0,000
11	0,651	2,430	-1,779
12	0,154	2,668	-4,294

Taulukon dataa on havainnollistettu kuvassa 4.



Kuva 4. Järjestelmän tuoton, kulutuksen ja nettoenergian kuvaaja, joka perustuu yhden 90 W:n aurinkopaneelin tuottoon.

Kuten taulukosta käy ilmi, talven nettoenergiavaje on suurimmillaan 7,8 kWh. Jotta tämä vaje voidaan kompensoida akustolla, tarvitaan vähintään tämän kokoinen akusto. 12 V:n järjestelmällä tämä olisi 647,2 Ah akusto. Tämä arvio ei vielä ota huomioon mitään varmuuskerrointa taikka akun potentiaalista jäätymistä alhaisilla varaustasoilla.

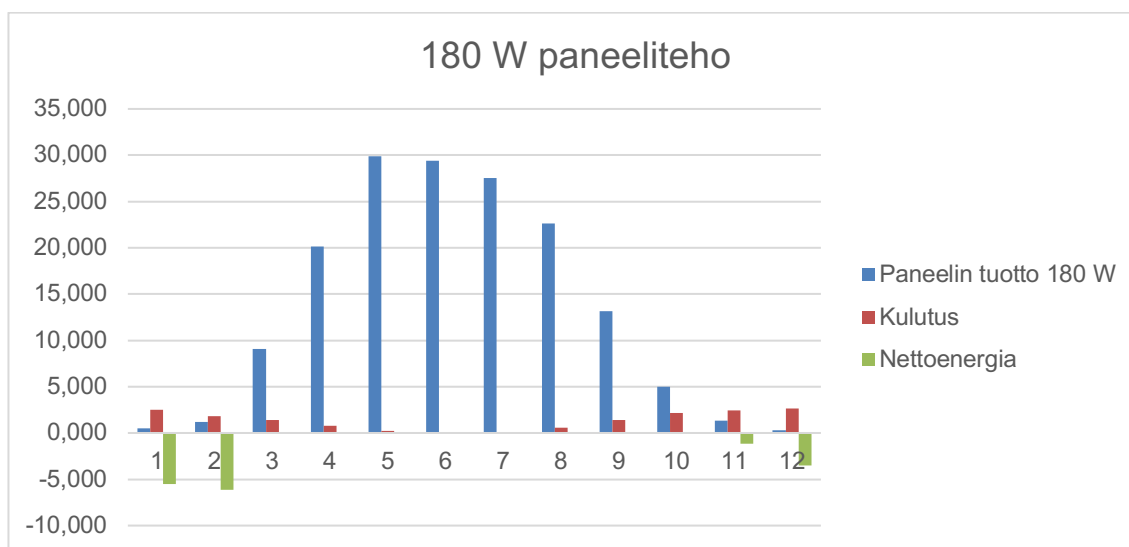
4.3.2 Energiantarve 180 W:n paneelitehon järjestelmälle

Taulukossa 9 on esitetty laskennallinen arvio talven nettoenergiantarpeesta, jos käytössä on kaksi 90 W:n monikideaurinkopaneelia. Kaikki luvut on laskettu samoin kuin edellisessä luvussa.

Taulukko 9. Järjestelmän tuotto, kulutus ja nettoenergia kunkin kuukauden lopussa järjestelmässä, jossa on käytössä kaksi 90 W:n monikideaurinkopaneelia.

Kuukausi	180 W:n tuotto (kWh)	Kulutus (kWh)	Nettoenergia 180 W (kWh)
1	0,468	2,488	-5,509
2	1,203	1,821	-6,126
3	9,095	1,380	0,000
4	20,133	0,789	0,000
5	29,874	0,235	0,000
6	29,385	0,204	0,000
7	27,536	0,198	0,000
8	22,624	0,548	0,000
9	13,125	1,374	0,000
10	5,014	2,132	0,000
11	1,301	2,430	-1,129
12	0,307	2,668	-3,490

Taulukon dataa on havainnollistettu kuvassa 5.



Kuva 5. Järjestelmän tuoton, kulutuksen ja nettoenergian kuvaaja, joka perustuu kahden 90 W:n aurinkopaneelin tuottoon.

Kuten taulukosta näkyy, talven nettoenergiavaje on suurimmillaan 6,1 kWh. Jotta tämä vaje voidaan kompensoida akustolla, tarvitaan jälleen vähintään tämänkoinen akusto. 12 V:n järjestelmällä tämä olisi 510,5 Ah:n akusto. Laskelma ei jälleen ota huomioon

mitään varmuuskerrointa tai akun potentiaalista jääymistä alhaisilla varaustasoilla. Lisäämällä yksi 90 W:n monikideaurinkopaneeli vaaditaan akkukapasiteettia noin 1500 Wh vähemmän jo ennen varmuuskertoimia. Yksi 90 W:n monikideaurinkopaneeli on merkittävästi halvempi kuin 1500 Wh akkukapasiteettia. Kuvaajasta huomaamme myös, että kahdella paneelilla talven nettoenergia on miinuksella vain neljän kuukauden ajan. Tämä tarkoittaa, että akut ovat kovan rasituksen alla lyhyemmän aikaa ja niiden elinikä on täten todennäköisesti pidempi.

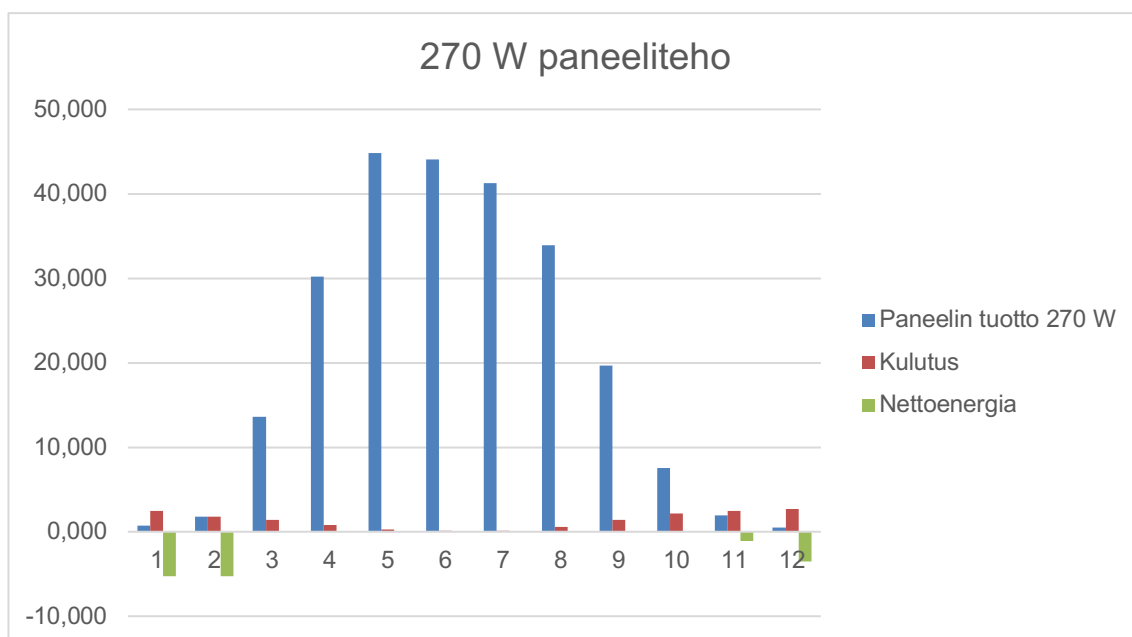
4.3.3 Energiantarve 270 W:n paneelitehon järjestelmälle

Taulukossa 10 on esitetty laskennallinen arvio talven nettoenergiatarpeesta, jos käytössä on kolme 90 W:n monikideaurinkopaneelia. Kaikki luvut on laskettu samoin kuin edellisissä luvuissa.

Taulukko 10. Järjestelmän tuotto, kulutus ja nettoenergia jokaisen kuukauden lopussa perustuen järjestelmään, jossa on käytössä kolme 90 W:n monikideaurinkopaneelia.

Kuukausi	360 W:n tuotto (kWh)	Kulutus (kWh)	Nettoenergia 270 W (kWh)
1	0,936	2,488	-5,275
2	2,407	1,821	-5,291
3	18,190	1,380	0,000
4	40,266	0,789	0,000
5	59,748	0,235	0,000
6	58,770	0,204	0,000
7	55,071	0,198	0,000
8	45,248	0,548	0,000
9	26,250	1,374	0,000
10	10,029	2,132	0,000
11	2,603	2,430	-1,129
12	0,614	2,668	-3,490

Taulukon dataa on havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 6. Järjestelmän tuoton, kulutuksen ja nettoenergian kuvaaja perustuen kahden 90 W:n aurinkopaneelin tuottoon.

Kolmella aurinkopaneelilla talven nettoenergiavaje on suurimmillaan 5,3 kWh. Jotta tämä vaje voidaan kompensoida akustolla, niin tarvitaan vähintään tämänkoinen akusto. 12 V:n järjestelmällä tämä olisi 440,9 Ah:n akusto. Lisäämällä yksi aurinkopaneeli saadaan vaadittavaa akkukapasiteettia vähennettyä 1000 Wh. On myös merkittävää, että kolmella aurinkopaneelilla helmikuun tuotto ja kulutus alkavat olla hyvin lähellä toisiaan. Toisin sanoen järjestelmä kykenee jo helmikuussa tuottamaan melkein tarpeeksi sähköä omiin tarpeisiinsa. On myös hyvä huomata paneelien suuri tuotto kesäkuukausien aikana. Kesäkuukausien tuottoa voi yrittää hyödyntää esimerkiksi myymällä sitä niillä pyysäkeillä, joille on jo vedetty verkkovirta. Tämä vaatisi invertterin asennuksen pysäkille ja tutkimuksen siitä, onko tämä aiheutuvien kustannusten jälkeen edelleen taloudellisesti kannattavaa.

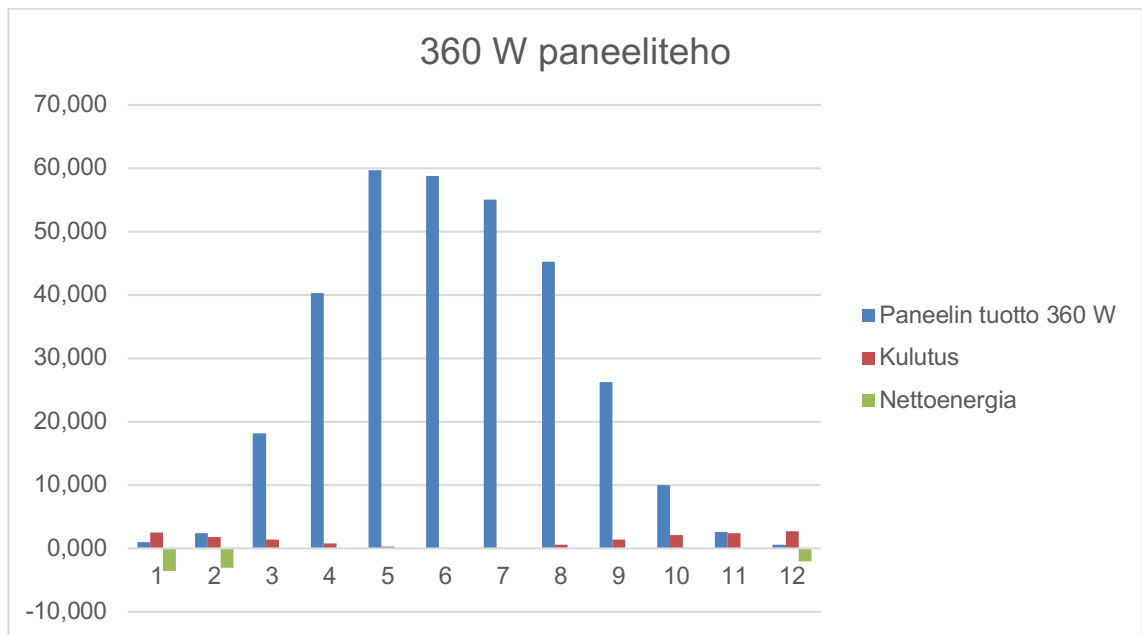
4.3.4 Energiantarve 360 W:n paneelitehon järjestelmälle

Taulukossa 11 on esitetty laskennallinen arvio talven nettoenergiatarpeesta, jos käytössä on kolme 90 W:n monikideaurinkopaneelia. Kaikki luvut on laskettu samoin kuin edellisissä luvuissa.

Taulukko 11. Järjestelmän tuotto, kulutus ja nettoenergia jokaisen kuukauden lopussa perustuen järjestelmään, jossa on käytössä kolme 90 W:n monikideaurinkopaneelia.

Kuukausi	360 W:n tuotto (kWh)	Kulutus (kWh)	Nettoenergia 360 W (kWh)
1	0,936	2,488	-3,605
2	2,407	1,821	-3,019
3	18,190	1,380	0,000
4	40,266	0,789	0,000
5	59,748	0,235	0,000
6	58,770	0,204	0,000
7	55,071	0,198	0,000
8	45,248	0,548	0,000
9	26,250	1,374	0,000
10	10,029	2,132	0,000
11	2,603	2,430	0,000
12	0,614	2,668	-2,054

Taulukon dataa on havainnollistettu seuraavassa kuvaajassa (kuva 6).



Kuva 7. Järjestelmän tuoton, kulutuksen ja nettoenergian kuvaaja perustuen perustuu kahden 90 W:n aurinkopaneelin tuottoon.

Kuten taulukosta näkyy, talven nettoenergiavaje on suurimmillaan 3,6 kWh. 12 V:n järjestelmällä tarvittaisiin vähintään 300,4 Ah:n kokoinen akusto kompensoimaan tätä vajetta. Tällä paneelimäärällä järjestelmä tarvitsee merkittävästi pienempää akustoa ja akkuja tarvitaan vain joulukuun ja helmikuun väliselle ajalle. Tämä lyhyempi käyttöaika todennäköisesti pidentäisi akkujen elinikää. Taas kerran kesäkuukausien energiantuotto on merkittävästi suurempi kuin kulutus. Tämä energia kannattaisi yrittää hyödyntää jollakin tavalla.

5 Komponenttien testaus

Komponenttien valinnassa on tärkeää muistaa, että kehitettävän prototyypin tulee selviytyä Suomen talviolosuhteissa. Etelä-Suomen talvessa on mahdollista, että lämpötila laskee jopa $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$:seen ja Pohjois-Suomessa se on säännöllistä. Elektroniikan toiminta näissä lämpötiloissa ei ole mitenkään itsestään selvää, joten se on erittäin tärkeää testata ennen kuin prototyyppi otetaan käyttöön. Suomen talviolosuhteita simuloitiin arkkipakastimella, jonne testattavat komponentit sijoitettiin. Näin testattiin sekä akkujen että lataussäätimen toimintaa hyvin kylmissä olosuhteissa. Suomen talvi on tietenkin ankara muillakin tavoilla kuin lämpötilan puolesta, ja esimerkiksi lumi, kosteus ja suola voivat hyvinkin vaikuttaa komponenttien elinikään ja toimivuuteen. Näitä on kuitenkin merkittävästi vaikeampaa simuloida realistisesti, mutta niiden vaikutus on lämpötilaan verrattuna vähemmän merkittävä.

5.1 Testien toteutus

Pakastimessa testattiin 5 kappaletta Enersys SBS EON 190F -akkuja, joille tehtiin ensin ohjeiden mukainen 24 tunnin komissiolataus. 5 kappaletta akkuja, joiden yhteismassa oli noin 300 kg ja lämpötila noin $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, laitettiin pakastimen sisälle. 19 tuntia myöhemmin akkujen lämpötilaksi mitattiin $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Akkujen napajännitteiksi mitattiin tällöin 13,13–13,34 V akusta riippuen.

Akuilla ja pakastimella tehtiin kolme testiä: ensimmäisessä kytkettiin Enersys SBS EON 190F -akut PWM-lataussäätimen ja 10 W:n LED-valaisimeen, toisessa kytkettiin yksi

90 W:n monikideaurinkopaneeli PWM-säätimen kautta kahteen rinnankytkettyyn Enersys SBS EON 190F -akkuun ja kolmannessa kytkettiin yksi 90 W:n monikideaurinkopaneeli MPPT-säätimen kautta kahteen rinnankytkettyyn Enersys SBS EON 190F -akkuun. Kaikissa testeissä akut kytkettiin toisiinsa ja lataussäätimiin 2,5 mm²:n johtimilla, joiden pituudet pidettiin mahdollisimman lyhyinä. LED-valaisin kytkettiin lataussäätimeen lampun mukana tulleilla merkittävästi pienemmillä johtimilla.

5.2 10 W:n LED-valaisimen kytkentä akkuun lataussäätimen kautta

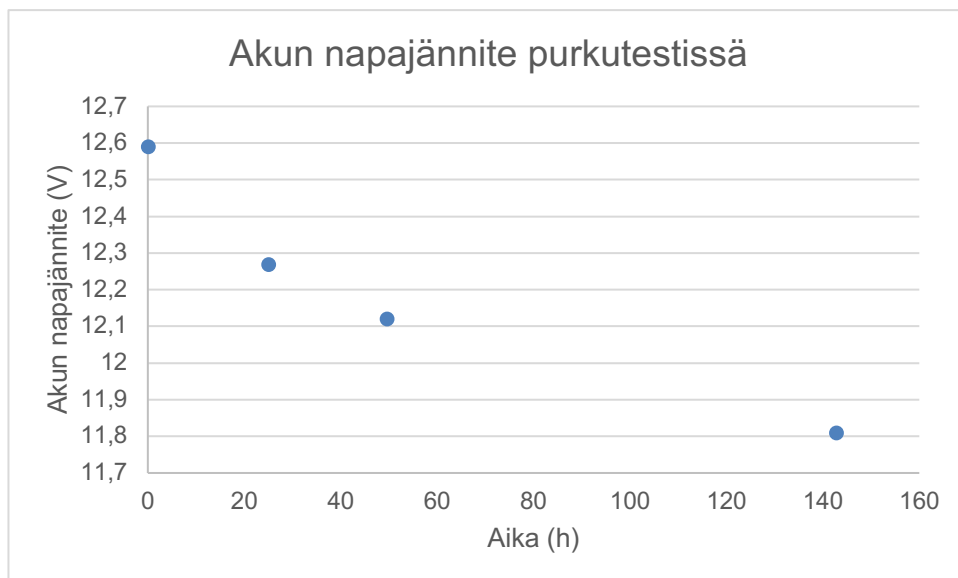
Testin tavoitteena oli selvittää kaksi asiaa: ensinnäkin kuinka kauan 190 Ah:n Enersys SBS EON 190F -akulla voi polttaa 10 W:n LED-valaisinta alle -25 °C:n lämpötilassa, ja toiseksi, vaurioittaako kova pakkanen akkua sen ollessa tyhjä. LED-valaisin kytkettiin akkuun PWM-lataussäätimen kautta, sillä näin tapahtuu prototyypissäkin, mutta myös koska säätimessä on akkuvahdi, joka katkaisee virrankulutuksen, kun akun napajännite putoaa alle 11,1 V:n. On tärkeää tietää, riittääkö jännitekynnys suojaamaan akkua jäämiseltä kovissa pakkasissa. Akku sijaitsee pakastimen sisällä, mutta sekä LED-valaisin että PWM-säädin olivat sen ulkopuolella. Ne jätettiin käytännön syistä pakastimen ulkopuolelle, sillä lämpötilan ei pitäisi vaikuttaa merkittävästi kummankaan komponentin virrankulutukseen.

Testin aikana tarkkailtiin arkkupakastimen lämpötilaa, akkujen napajännitettä ja niiltä lähtevää virtaa. Mittaukset tehtiin yleismittarilla. Testin tulokset ovat kirjattu seuraavaan taulukkoon 12.

Taulukko 12. 10 W:n LED-valaisimen kytkentä PWM-säätimen kautta Enersys SBS EON 190F -akkuun. Arkkupakastimen lämpötilaa, akun napajännite, akusta otettu virta ja muut huomiota vaativat seikat kirjattu ylös testin aikana.

Päivämäärä ja aika	Arkkupakastimen lämpötila	Akun napajännite	Akulta otettu virta	Huomioita
6.8.2019 klo 14.00	-13 °C	12,59 V	0,95 A	LED-valaisin kytketty päälle
7.8.2019 klo 15.00	-25 °C	12,27 V	0,89 A	LED-valaisin palaa edelleen
8.8.2019 klo 15.30	-29 °C	12,12 V	0,86 A	LED-valaisin palaa edelleen
12.8.2019 klo 12.45	-31 °C	11,81 V	0,80 A	LED-valaisin palaa edelleen
14.8.2019 klo 12.00	-30 °C	12,17 V	0,00 A	LED-valaisin lakannut palamasta, lataussäädin katkaissut virran kulutuksen, kuormituksen pudotessa jännite noussut, akku edelleen toimintakuntoinen.

Järjestelmän todettiin olevan vielä toimintakuntoinen 12.8.2019 klo 12.45, mutta 14.8.2019 klo 12.00 mennessä akun varaustaso oli pudonnut riittävän alhaiseksi ja lataussäädin oli katkaissut virran kulutuksen. Tästä voidaan laskea, että akku kesti vähintään 142 h 45 min ja korkeintaan 190 h 0,8 – 0,95 A:n purkuvirralla. Arvioin purkuvirraksi näiden keskiarvon eli 0,88 A. Tällöin akun todellinen kapasiteetti on 125,6 Ah – 167,2 Ah. Tällöin keskiarvo on 146,6 Ah kapasiteettia siten, että akku säilyy toimintakuntoisena vielä 30 °C:n pakkasessa. Testin tulokset näkyvät kuvassa 8.



Kuva 8. Purkutestin tulokset

5.3 90 W:n monikideaurinkopaneelin kytkentä akustoon PWM-säätimellä

Testin tavoitteena oli selvittää, miten PWM-lataussäädin toimii pienillä lataustehoilla ja kylmissä olosuhteissa. Testi suoritettiin ensin siten, että akusto (joka koostui kahdesta Energys SBS EON 190F -akusta) oli pakkasessa ja säädin huoneenlämmössä, ja myöhemmin siten, että sekä akku että säädin olivat pakkasessa. Aurinkopaneeli oli sisällä huoneenlämmössä ikkunaa vasten. Tällä tavalla pystyttiin simuloimaan Suomen vähävaloista talvea. Tämä testi tehtiin myös PWM-säätimen ja MPPT-säätimen toiminnan vertaamiseksi. Tulokset on kirjattu seuraavaan taulukkoon 13.

Taulukko 13. 90 W:n monikideaurinkopaneelin kytkentä PWM-säätimen kautta kahteen Enersys SBS EON 190F -akkuun. Arkkupakastimen lämpötila, akun napajännite, aurinkopaneelin tuottama virta, akun latausvirta ja muut huomiota vaativat seikat on kirjattu taulukkoon testin aikana.

Päivämäärä ja aika	Arkkupakastimen lämpötila	Akun napajännite	Aurinkopaneelin tuottama virta	Akun latausvirta	Huomioita
6.8.2019 klo 15.00	-12 °C	13,24 V	0,11 A	0,09 A	Akku näyttää lataavan hyvin heikosta paneelituotosta huolimatta
7.8.2019 klo 15.00	-25 °C	14,42 V	0,08 A	0,06 A	Akku näyttää lataavan hyvin heikosta paneelituotosta huolimatta
8.8.2019 klo 15.30	-29 °C	13,75 V	0,01 A	0,00 A	Lataussäädin ilmoittaa, että akku on täynnä. Aurinkopaneelit kytketty pois, jotta akut purkautuvat hieman.
12.8.2019 klo 13.00	-30 °C	13,00 V	0,15 A	0,13 A	Aurinkopaneeli kytketty takaisin säätimeen, ja lataus aloitettu.
12.8.2019 klo 14.00	-30 °C	14,15 V	0,21 A	0,19 A	Akku näyttää lataavan hyvin heikosta paneelituotosta huolimatta
12.8.2019 klo 16.00	-31 °C	14,25 V	0,15 A	0,13 A	Säädin siirretty pakkaseen mittauksen jälkeen. Lämpötila nousi operaation aikana -14 asteeseen.
14.8.2019 klo 12.00	-30 °C	14,20	0,04 A	0,03 A	Säädin pakkasessa, latausteho heikko
16.8.2019 klo 13.00	-30 °C	14,20 V	0,02 A	0,01 A	Säädin pakkasessa, latausteho heikko
21.8.2019 klo 12.00	-31 °C	14,18 V	0,02 A	0,00 A	Säädin pakkasessa, latausteho heikko

Kokeilun tulos on ennen kaikkea, että PWM-säädin ei toimi riittävän hyvin kylmissä olosuhteissa. Kun säädin laitettiin pakkaseen akkujen kanssa, sen latausteho romahti sääolosuhteista riippumatta. Latausteho on todennäköisesti parempi, jos paneeli olisi suo-

rassa auringonpaisteessa, mutta paneelin sijainti vähävaloisessa ympäristössä yhdistettynä kylmän lämpötilan kanssa kylmään lämpötilaan johtaa hyvin heikkoon lataustehoon. Tämä ymmärrettävästi tuottaa ongelmia Suomen talvessa.

5.4 90 W:n monikideaurinkopaneelin kytkentä akustoon MPPT-säätimellä

Kokeessa pyrittiin selvittämään, miten MPPT-säädin toimii pakkasessa. Prototyypissä käytetään MPPT-tekniikkaa hyödyntävää lataussäädintä, joten on tärkeä tietää, miten se selviytyy kylmistä lämpötiloista. Testissä käytetty säädin oli Victron Energy BlueSolar charge controller MPPT 100 30. Testi suoritettiin siten, että ensin vain akusto (joka koostui kahdesta Enersys SBS EON 190F akusta) oli pakkasessa, ja myöhemmin siten, että sekä akusto että säädin olivat pakkasessa. Säätimen pitäisi pystyä kompensoimaan lämpötilavaihteluja, joten oli tärkeätä nähdä, toimiiko tämä käytännössä. Tulokset on esitetty taulukossa 14.

Taulukko 14. 90 W:n monikideaurinkopaneelin kytkentä MPPT-säätimen kautta kahteen Ener-sys SBS EON 190F -akkuun. Arkkupakastimen lämpötila, akun napajännite, aurinkopaneelin tuottama virta, akun latausvirta ja muut huomiota vaativat seikat kirjattu ylös testin aikana.

Päivämäärä ja aika	Arkkupakastimen lämpötila	Akun napajännite	Aurinkopaneelin tuottama virta	Akun latausvirta	Huomioita
8.8.2019 klo 15.30	-29 °C	13,51 V	0,12 A	0,07 A	Säädin todettu toimivan, aurinkopaneeli kytketty pois, jotta akut purkautuvat hieman
12.8.2019 klo 13.00	-30 °C	12,88 V	0,17 A	0,12 A	Aurinkopaneeli kytketty takaisin säätimeen, ja lataus aloitettu. MPPT-säätimen virrankulutus korkeampi kuin PWM-säätimen.
12.8.2019 klo 14.00	-30 °C	13,77 V	0,22 A	0,17 A	Akku näyttää lataavan hyvin heikosta paneelituotosta huolimatta.
12.8.2019 klo 16.00	-31 °C	13,66 V	0,17 A	0,12 A	Säädin siirretty pakkaaseen mittauksen jälkeen. Lämpötila nousi operaation aikana -14 asteeseen.
14.8.2019 klo 12.00	-30 °C	13,48	0,20 A	0,16 A	Säädin pakkaudessa, latausteho merkittävästi parempi kuin PWM-säätimellä. Aurinkopaneelin sijainti molemmilla sama.
16.8.2019 klo 13.00	-30 °C	13,39 V	0,17 A	0,13 A	Säädin pakkaudessa, latausteho merkittävästi parempi kuin PWM-säätimellä. Aurinkopaneelin sijainti molemmilla sama.
21.8.2019 klo 12.00	-31 °C	13,31 V	0,13 A	0,08 A	Säädin pakkaudessa, latausteho merkittävästi parempi kuin PWM-säätimellä. Aurinkopaneelin sijainti molemmilla sama.

Testissä havaittiin, että MPPT-säätimen latausteho on merkittävästi parempi heikoissa olosuhteissa kuin PWM-säätimen. Kun säädin on pakkasessa ja paneeli heikossa valossa, järjestelmä kykenee silti lataamaan akkuja merkittävästi paremmalla teholla kuin vastaavissa olosuhteissa oleva PWM-säädin. Testissä kävi myös ilmi, että MPPT-säätimen lepovirran kulutus on merkittävästi korkeampi kuin PWM-säätimen. Testin tulos oli prototyypin suunnittelun kannalta tärkeä, sillä nyt tiedämme, että MPPT-säädin toimii merkittävästi paremmin kylmissä olosuhteissa. Valitettavasti testissä käytetty Victron Energy BlueSolar charge controller MPPT 100 30 ei sovellu tähän käyttötarkoitukseen, sillä siitä puuttuu akkuvahtiominaisuus. Käyttötarkoituksessa on tärkeää, että akkujen syväpurkautumista vältetään viimeiseen asti, vaikka se tarkoittaisi, että bussipysäkit ovat pimeänä hetken aikaa. Akkujen syväpurkautuminen heikentää niiden elinikää merkittävästi ja altistaa ne jäätymisriskille. Tämän takia akkuvahtiominaisuus on tässä prototyypissä hyvin tärkeä.

Prototyypin esittely

Prototyyppiin valittiin järjestelmä, joka toimii puhtaasti aurinkopaneelien tuottamalla energialla. Akkuja ladataan kesällä ja puretaan tarvittaessa talvella. Systemin akusto on mitoitettu tarpeeksi suureksi, jotta se kestää talven läpi ja varaustaso pysyy niin korkealla, että pakkasen ei tuota ongelmia. Prototyyppiin valitut komponentit on esitelty taulukossa 15. Kytkenäkaavio löytyy liitteestä 1.

Taulukko 15. Prototyypin osalista.

Osa	Lukumäärä	Hinta per kpl (€)	Yhteishinta (€)	Mitat (mm)	Paino per kpl (kg)	Paino yhteensä (kg)
10 W:n LED-valaisin	1 kpl	NA		NA	NA	NA
Liiketunnistin Compact MD-C360i	1 kpl	93	93	NA	NA	NA
SolarXon Monikide-aurinkopaneeli 90 W	3 kpl	100	300	1005 x 676 x 35	10	30
Epever Epsolar Triron 3210NDS2	1 kpl	143	143	158 x 238 x 62,7	1,35	1,35
Energys SBS EON 190F	5 kpl	368	1840	561 x 125 x 316	60,0	300
Yhteenlaskettuna			2376			331,35

5.5 Prototyypissä käytetyt akut

Prototyyppiä varten testattu akku on Energysin Powersafe SBS EON 190F -akku. Prototyyppiin tulee niitä yhteensä 5 kappaletta. Akut sijoitetaan pysäkin katon sisään ja kytketään rinnakkain. Niiden yhteenlaskettu kapasiteetti on 950 Ah tai 11,4 kWh. Tämä akku valittiin sen hyvän toimivuuden ja saatavuuden takia. Se suoriutui testeistä hyvin: se sekä purkaa että lataa pieniä tehoja kovassakin pakkasessa.

Purkaustestissä akkua purettiin 10 W LED-valaisimella $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$:n pakkasessa. Se poltti LED-valaisinta noin viikon, minkä jälkeen sen jännitetaso putosi niin alas, että akunhallintajärjestelmä katkaisi akun purkauksen. Tässä vaiheessa akun napajännite oli 12,17 V ja $31\text{ }^{\circ}\text{C}$:n pakkasesta huolimatta akku oli vielä toimintakuntoinen. Tässä testissä yhden akun käytettävissä olevaksi kapasiteetiksi osoittautui noin 145 Ah. Tämä tarkoittaa, että 5 tällaisella akulla on 725 Ah:n kapasiteetti siten, että kuluttajana on 10 W:n LED-valaisin ja akkujen toimintakunto voidaan edelleen taata kylmissä lämpötiloissa.

Toinen akkuvaihtoehto, joka Enersysillä oli tarjolla, oli Powersafe SBS XC -akku. Tämä akku on suunniteltu kestävämpään syklistä käyttöä ensimmäistä vaihtoehtoa paremmin ja täten se soveltuisi tähän kohteeseen paremmin. Tämä vaihtoehto kuitenkin hylättiin tässä vaiheessa sen saatavuuteen liittyvien ongelmien takia. Mikäli prototyyppiä jatkokehitetään, tätäkin akkuvaihtoehtoa kannattaa jälleen harkita.

Mikäli prototyypin kehitystä jatketaan, akkuja kannattaa kilpailuttaa ylipäänsä. Projektin aikana saatiin esimerkiksi Akkupojat OY:ltä kilpailevan tarjouksen 180 Ah:n Ritar-pääty-napa-akuista (malli Ritar RA12-180F). Nämä akut voisivat myös soveltua tähän tarkoitukseen. Tarjous oli hinnaltaan kilpailukykyinen (1250 € viiden akun paketista), mutta tuli valitettavasti liian myöhään prototyypin testauksen kannalta.

5.6 Prototyypissä käytetty lataussäädin

Prototyypin suunniteltu lataussäädin on MPPT-tekniikkaa hyödyntävä Epever Epsolar Triron 3210NDS2. MPPT-tekniikalla toimiva lataussäädin kykenee tuottamaan enemmän energiaa paneeleista kuin PWM-tekniikalla toimiva lataussäädin. Sen tuottama hyöty kompensoi riittävästi sen hieman kalliimpaa hintaa. Kyseisessä säätimessä on myös akkuvahdi, jonka katkaisujännite on 11,1 V kuormitettuna. Akun jännitteen saavuttaessa tämän rajan säädin katkaisee kulutuksen akulta, jolloin kuormittamattomana sen jännite nousee noin 12,2 V:iin. Tämä jännitetaso on riittävän korkea, että akku selviää Suomen talven kylmistä lämpötiloista.

5.7 Prototyypissä käytetyt aurinkopaneelit

Prototyyppiin on suunniteltu kolme 90 W:n SolarXOn-monikideaurinkopaneelia. Ne asetetaan 15 asteen kulmaan, etelään päin suunnattuna, mahdollisimman matalalle. Täten ne hylkivät vettä ja likaa, mutta pysyvät mahdollisimman huomaamattomina. Niiden asennuksessa tulee huomioida, että ne eivät kestä kovin raskasta kuormaa. Täten jos ne asennetaan ilman, että niitä tuetaan keskeltä, on mahdollista, että ne vaurioituvat lumen takia. Tämä riippuu täysin siitä, miten tehokkaasti ne keräävät lunta. Mikäli tämä osoittautuu prototyypin käytön aikana ongelmaksi, ratkaisuna voi olla parempi tuenta, jyrkempi kulma tai vaihto niin sanottuihin venepaneeleihin.

Mikäli prototyyppiä jatkokehitetään, yksikidepaneeli on yksi harkitsemisen arvoinen vaihtoehto. Joissain kohteissa ne voivat tuottaa monikidepaneelia enemmän energiaa, mutta ne ovat kalliimpia ja usein vaativat aivan erilaisen tuennan. Toinen vaihtoehto, jota kannattaisi harkita, on paneelitehon lisääminen. Esimerkiksi yksi 100 W:n aurinkopaneeli lisää saattaisi pienentää vaadittavaa akkukapasiteettia merkittävästi. Mikäli näin monta paneelia saadaan mahtumaan bussipysäkin katolle ja hyväksytään niiden aiheuttama visuaalinen haitta, uskon, että tällainen ”neljän paneelin järjestelmä” laskisi prototyypin hintaa ja parantaisi sen luotettavuutta merkittävästi.

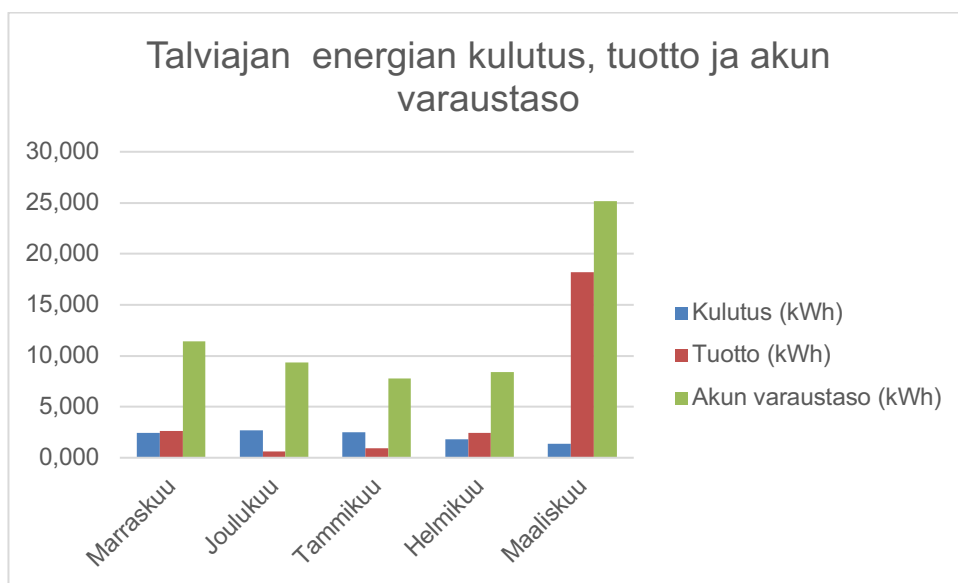
5.8 Prototyypin energiankulutuksen ja tuoton arvio talvikaudelta

Arviot prototyypissä käytettävän järjestelmän tuotosta ja kulutuksesta ovat peräisin aiemmin käytetyistä laskennallisista arvioista (ks. luku 4). Näihin perustuen olen kuitenkin mallintanut järjestelmän talviaikaisen kulutuksen ja tuoton ottaen huomioon valitun akuston varaustason ja energiankulutuksen vaihtelu ja valittujen paneelien tuotto. Tulokset on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Arviot talviajan energiankulutuksesta ja -tuotosta sekä sen vaikutuksesta akkukapasiteettiin.

Kuukausi	Kulutus (kWh)	Tuotto (kWh)	Akun varaustaso (kWh)
Marraskuu	2,430	2,603	11,400
Joulukuu	2,668	0,614	9,346
Tammikuu	2,488	0,936	7,794
Helmikuu	1,821	2,407	8,380
Maaliskuu	1,380	18,190	25,190

Taulukon tiedot on havainnollistettu kuvassa 9.



Kuva 9. Prototyypin talviajan energiankulutus, energiantuotto ja akun varaustaso.

Kuvaajassa käytetyt arvot ovat arvioita ja todellisuudessa saattavat tietenkin muuttua. Prototyyppiin nyt suunniteltu akkukapasiteetti vaikuttaa suurelta ottaen huomioon paneelien tuotto ja LED-valaisimen kulutus, mutta akkujen valinnassa on pyritty varmistamaan riittävän suuri varmuuskerroin ja takaamaan, että prototyyppi varmasti toimii kaikissa olosuhteissa. Mikäli prototyyppi toimii, sitä voidaan käyttää tiedon keräämiseen, mikä helpottaa prototyypin jatkokehittämistä merkittävästi.

6 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli kehittää JCDecaux Finland Oy:n kanssa yhteistyössä järjestelmä, jolla voitaisiin valaista bussipysäkkejä ympärivuotisesti verkkovirrasta itsenäisesti.

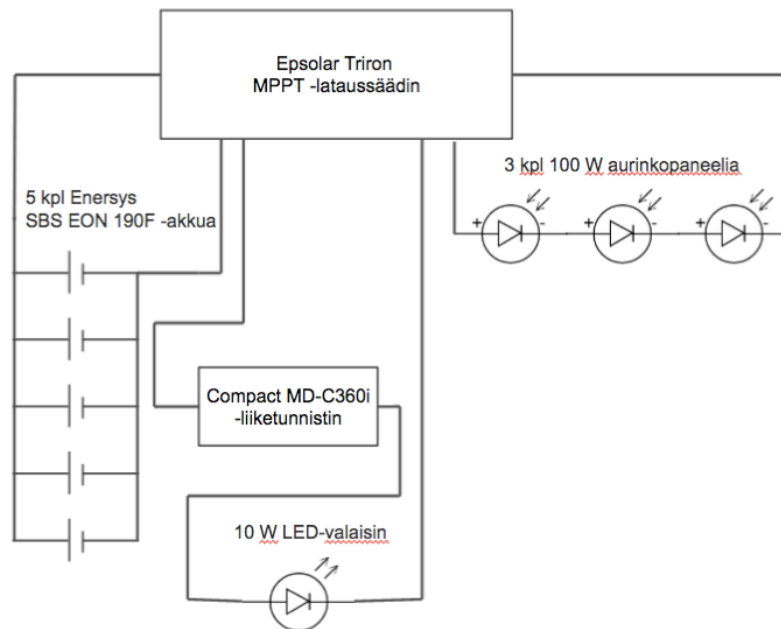
JCDecaux'n vaatimukset prototyypin suhteen olivat, että järjestelmä toimii mahdollisimman itsenäisesti talven läpi, se muuttaa bussipysäkin ulkonäköä mahdollisimman vähän ja että ratkaisu on ympäristöystävällinen. Prototyyppi noudattaa näitä kaikkia vaatimuksia mahdollisimman tarkasti.

Työssä tutkittiin ensin, mitkä komponentit todennäköisesti selviäisivät Suomen ankarista talviolosuhteista, minkä jälkeen valittujen komponenttien talviaikainen toimivuus testattiin Metropolia Ammattikorkeakoulun laboratoriossa. Lopullinen prototyyppi suunniteltiin ja luovutettiin JCDecauxille asennettavaksi talveen 2019–2020 mennessä. Kuusi prototyyppiä asennettiin talveksi eri puolille pääkaupunkiseutua ja niitä testataan talven aikana. Järjestelmän kehittämistä jatketaan, kun prototyypin käytännön toiminta talven aikana on selvitetty.

Lähteet

- 1 History. Verkkoaineisto. JCDecaux Group. <<https://www.jcdecaux.com/group/history>>. Luettu 15.10.2019.
- 2 JCDecaux Suomessa. Verkkoaineisto. JCDecaux Finland Oy. <<https://www.jcdecaux.fi/About>>. Luettu 15.10.2019.
- 3 Kämpylehto, Janne. 2019. Tietokirjailija, energia-asiantuntija. Puhelinkeskustelu 3.6.2019.
- 4 Dell, Ronald M. & Rand, David A. J. 2001. Understanding Batteries. Cambridge: The Royal Society of Chemistry
- 5 Document 32006L0066. Verkkoaineisto. Eur-Lex. <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fi/TXT/?uri=CELEX%3A32006L0066>>. Luettu 7.11.2019.
- 6 Linden, David & Reddy, Thomas B. 2002. Handbook of Batteries. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- 7 Handbook for Stationary AGM-VRLA Batteries. 2016. Network Power, Application Engineering.
- 8 Auringon nousu- ja laskuajat Suomessa. Verkkoaineisto. Osmo Moisio. <<http://www.moisio.fi/taivas/aurinko.php?paikka=Helsinki&dy=15&mn=3&yr=2020>>. Luettu 22.10.2019.
- 9 Publicly Available PV Systems. Verkkoaineisto. SMA Solar Technology AG. <<https://www.sunnyportal.com/Templates/PublicPagesPlantList.aspx>> Luettu 13.11.2019.

Prototyypin kytkentäkaavio



Akun ohjekirja

	No smoking, no naked flames, no sparks		Clean all acid splash in eyes or on skin with plenty of clean water. Then seek medical help. Acid on clothing is to be washed with water
	Electrical hazard		Read instructions
	Electrolyte is corrosive		Re-cycle scrap batteries. Contains lead
	Shield eyes		Warning: Risk of fire explosion, or burns. Do not disassemble, heat above 60°C, or incinerate. Avoid any short circuit.
	Danger		Metallic parts under voltage on the battery, do not place tools or items on top of the battery

California Proposition 65 Warning – Battery posts, terminals and related accessories contain lead and lead compounds, chemicals known to the State of California to cause cancer and reproductive harm. Wash hands after handling.

PowerSafe® SBS® EON Technology® batteries are supplied in a charged condition, and are capable of extremely high short circuit currents. Take care to avoid short-circuiting terminals of opposite polarity.

1. Receiving

Upon receipt of a shipment, check that the items delivered are undamaged and match the carrier's Bill of Lading. Report any damage or shortages to the carrier. EnerSys® is not responsible for shipment damage or shortages that the receiver does not report to the carrier.

2. Storage

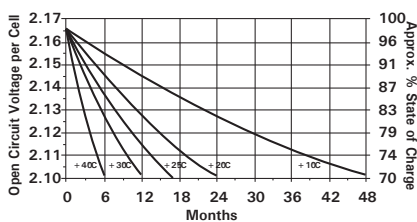
2.1 Storage Conditions and Time

If a battery cannot be immediately installed it should be stored in a clean, cool, dry area.

During storage monoblocs and cells lose capacity through self-discharge.

High temperature increases the rate of self-discharge and reduces the storage life.

The chart below shows the relationship between open-circuit voltage (OCV) and storage time at various temperatures.



2.2 Refresh Charge

Monoblocs and cells must be given a freshening charge when the OCV approaches the equivalent of 2.10 Volts per cell or when the maximum storage time has been reached. Freshening charge should be by means of constant voltage charge set between 2.29 and 2.40Vpc with current limit 0.1C₁₀ A for 24 hours. Recommended OCV audit intervals are given in the table below.



Instruction Sheet

Temperature (°C/ °F)	Storage Time (Months)	OCV Audit Interval (Months)
+10 / +50	48	6
+15 / +59	34	6
+20 / +68	24	4
+25 / +77	17	4
+30 / +86	12	3
+35 / +95	8.5	2
+40 / +104	6	2

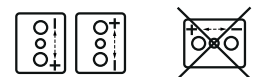
2.3 Commissioning Charge

Before conducting a capacity discharge or commencing cycling, the battery must be given a commissioning charge. In float applications the commissioning charge shall consist of 7 continuous days of float charge at the recommended float voltage (2.29Vpc at 20°C) with no load connected to the battery. In hybrid applications the commissioning charge shall consist of 24 hours charge at a voltage equivalent to 2.40 Volts/cell with no load connected.

3. Installation

Whatever your application, PowerSafe SBS EON Technology blocs and cells can be mounted in any orientation except inverted. However, in cyclic/hybrid applications, EnerSys recommend to install DIN-sized SBS EON Technology 2V cells in horizontal orientation. In such configuration the instructions below must be complied with.

- Do not use terminal posts to lift or handle cells.
- Do not install the cells in such a way that the box-lid bond is resting on a runner.
- Always ensure that the arrow on the lid of each unit is pointing in vertical orientation.



The battery compartment/room must have adequate ventilation to limit hydrogen accumulation to a maximum of 1% by volume of free air.

Each monobloc/cell is supplied with the terminal/connector fasteners.

On each monobloc/cell the positive terminal is identified by a "+" symbol. Install the batteries in accordance with the instructions and/or layout drawing, taking care to ensure correct terminal location and polarity.

Connect the blocs/cells with the connectors and fasteners provided. Tighten the fastener set bolt(s) / nut(s) to the fastening torque level indicated on the product label. Place the insulating covers in position immediately after tightening the fasteners.

4. Operation

PowerSafe® SBS® EON Technology® monoblocs and cells retain the long float life and storage characteristics of traditional PowerSafe SBS monoblocs and cells with the added benefit of improved cyclic ability in both float voltage and fast charge modes.

4.1 Stand by / Float Operation

Constant voltage chargers are recommended. The charging voltage should be set at the equivalent of 2.29Vpc at 20°C/68°F or 2.27Vpc at 25°C/77°F.

Operation at temperatures higher than 20°C will reduce life expectancy. Life is reduced by typically 50% for every 10°C rise in temperature. To offset the impact of higher temperatures compensation to the float voltage should be applied.

The recommended float voltage temperature compensation is:

	Temperature (°C / °F)							
	10/50	15/59	20/68	25/77	30/86	35/95	40/104	
Recommended	2.33	2.31	2.29	2.27	2.25	2.23	2.21	
Minimum	2.31	2.29	2.27	2.25	2.23	2.21	2.21	

Due to the very low internal resistance, PowerSafe SBS EON monoblocs and cells will accept unlimited current during recharge but for cost and practical purposes in float applications where recharge time to repeat duty is not critical, the rectifier current can be limited to the load plus 0.1C₁₀ Amps.

4.2 Cyclic Operation

In addition to the long life characteristics inherent in traditional PowerSafe SBS TPPL designs, EON Technology has been developed to provide high performance in applications where the battery is subjected to repeated cyclic duty or where power reliability is tested by high temperatures and harsh conditions combined with remote locations.

In cyclic applications the charging voltage should be set at the equivalent of 2.40Vpc cell at 20°C/68°F, with the rectifier current limit set to a minimum of 0.1C₁₀ A (EON Technology is designed to accept unlimited in rush currents without causing damage to the internal electro chemistry).

The optimal cyclic performance is achieved by returning the battery to full state of charge between discharge cycles. It is possible to operate SBS EON Technology monoblocs and cells in partial state of charge condition, however, in such situations it is very important to ensure that the battery is periodically returned to full state charge to maintain battery state of health. It is recommended to contact your EnerSys® representative to obtain additional information and guidance for such special applications.

In systems where control of charge factor is not possible, it may be possible to estimate time to full state of charge by using the calculation:

$$\text{Recharge time (hrs)} = 2 * ((0.8 \times \text{discharged Ah}) / \text{current limit}) + 1$$

The recommended compensation for charge voltage in cyclic applications is:

	Temperature (°C / °F)							
	10/50	15/59	20/68	25/77	30/86	35/95	40/104	
Vpc	2.44	2.42	2.40	2.38	2.36	2.34	2.32	

5. Maintenance

In practice, the user usually specifies the maintenance schedule based on site criticality, location and manpower.

However, the following may be used as a suggested maintenance schedule.

• Monthly (record all readings)

Measure the battery string voltage. If necessary, adjust the float voltage to the correct value.

• Every six months (record all readings)

Measure the battery string voltage. If necessary, adjust the float voltage to the correct value.

Measure individual bloc/cell voltages. The blocs/cells should be within 5% of the average.

Inspect for contamination by dust, loose or corroded connections. If necessary isolate the string/bloc/cell and clean with a damp soft cloth. Warning - Do NOT use any type of oil, solvent, detergent, petroleum-based solvent or ammonia solution to clean the battery containers or lids. These materials will cause permanent damage to the battery container and lid and will invalidate the warranty. Contact EnerSys® if you have any questions regarding maintenance.

6. Disposal

PowerSafe SBS EON Technology batteries are recyclable. Scrap batteries must be packaged and transported in accordance with prevailing transportation rules and regulations.

Scrap batteries must be disposed of in compliance with local and national laws by a licensed or certified lead acid battery recycler.



www.enerSYS-emea.com

EnerSys
World Headquarters
2366 Bernville Road
Reading, PA 19605
USA
Tel: +1 610 208 1991
+1 800 538 3627
Fax: +1 610 372 8613

EnerSys EMEA
EH Europe GmbH
Löwenstrasse 32
8001 Zürich
Switzerland
Tel: +41 44 215 74 10

EnerSys Asia
152 Beach Road
Gateway East Building
Level 11
189721 Singapore
Tel: +65 6508 1780

Contact:

© 2013 EnerSys. All rights reserved.
Trademarks and logos are the property of EnerSys and its affiliates unless otherwise noted.

Publication No. EN-SBS-EON-IS-008 - December 2013 - Subject to revisions without prior notice. E.&G.E.

