

**LYIJYAKKU HITAAN SÄHKÖMOOTTORIVENEEN
ENERGIAVARASTONA**
**Lead-acid battery as energy storage in a low-velocity
electric boat**
Jyrki Jantunen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Jyrki Jantunen

Lyijy Akku hitaan sähkömoottoriveneen energiavarastona

2021

Kandidaatintyö.

20 s.

Tarkastaja: professori Juha Pyrhönen

Avainsanat: Lyijy Akku, uppoumarunko, sähkömoottorivene

Valtioneuvosto on asettanut tavoitteeksi puolittaa liikenteen kasvihuonepäästöt vuoteen 2030 mennessä. Vuonna 2018 liikennepäästöistä 4 % oli vesiliikenteen tuottamaa. Huviveneily oli vesiliikenteen suurin häkä- ja hiilivety päästöjen tuottaja ja toiseksi suurin hiilidioksidipäästöjen tuottaja. Näitä päästöjä on mahdollista pienentää sähköistämällä huviveneilyä. Litiumakkujen ollessa kalliita ja litiumin riittävyyden kyseenalaisuuden takia on tärkeää tarkastella muita vaihtoehtoja litiumakuille.

Tämä kandidaatintutkielma on kirjallisuuskatsaus, jossa selvitetään, onko lyijyakkujen käyttö hitaan sähkömoottoriveneen energiavarastona halvempaa kuin litiumakkujen. Työssä myös selvitetään mikä lyijyakkutyypistä sopii parhaiten veneen energiavarastoksi, mitä turvallisuuteen liittyviä riskejä on lyijy akun käytössä ja miten aurinkopaneelit tulisi ottaa huomioon akuston kannalta. Tutkimusaineistona käytetään alan kirjallisuutta, tieteellisiä julkaisuja ja verkkoaineistoa.

Lyijyakuista koostuvat akustot ovat huomattavasti halvempia kuin litiumakut, hintaeron ollessa jopa vajaat 1 000 €/kWh. Lyijyakkujen varjopuolen on puolestaan niiden massa. Lyijy akuston massa voi olla jopa yli 450 kg enemmän kuin vastaavan litiumakuista koostuvan akuston massa, riippuen lyijyakkutyypistä. Lyijyakkuihin liittyy myös turvallisuusriskejä. Niistä vapautuvat vetykaasut ovat palo- ja räjähdysturvallisuusriskeä, ellei akut pääse tuuletumaan. Avoimia lyijyakkua käytettäessä akun elektrolyytin läikkyminen on myös yksi turvallisuusriskeä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT
School of Energy Systems
Electrical Engineering

Jyrki Jantunen

Lead-acid battery as energy storage in a low-velocity electric boat

2021

Bachelor's Thesis.

20 p.

Examiner: professor Juha Pyrhönen

Key words: Lead-acid battery, displacement hull, electric boat

The Finnish government has set a goal to halve the greenhouse gas emissions by 2030. In 2018 4 % of the greenhouse gas emissions released by traffic were created by water traffic. Leisure boating created the most carbon monoxide and hydrocarbon emissions. It is possible to reduce these emissions by electrifying leisure boating. It is important to examine other options to lithium batteries because they are expensive, and the availability of lithium is questionable.

This bachelor's thesis is a literature review to find out if lead-acid batteries are cheaper than lithium batteries as an energy storage for low-velocity electric boats. It is also examined which type of lead-acid battery fits a low-velocity electric boat the best, what kinds of hazards there are related to using lead-acid batteries as energy storage in a boat and what considerations there are related to solar panels from the batteries' perspective.

It was found out that lead-acid batteries are significantly cheaper than lithium batteries with price difference being almost 1 000 €/kWh for certain types of lead-acid batteries. On the bad side lead-acid batteries are heavier than lithium batteries. The mass of an equivalent lead-acid battery can be over 450 kg depending on the type of lead-acid battery used. There are also hazards related to lead-acid batteries. Hydrogen gasses released from the batteries cause a fire or even explosive hazard unless the batteries can be vented. When using open lead-acid batteries there is also the danger of spilling acidic electrolyte.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1. Johdanto.....	6
2. Lyijyakuista	8
2.1 Lyijyakkutyypit	8
2.2 Lyijyakkujen turvallisuus	11
3. Veneilyn vaatimukset akulle ja akkutyypin valinta.....	13
4. Lyijyakun taloudellisuus verrattuna litiumakkuun	15
5. Yhteenveto.....	18
Lähteet	19

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

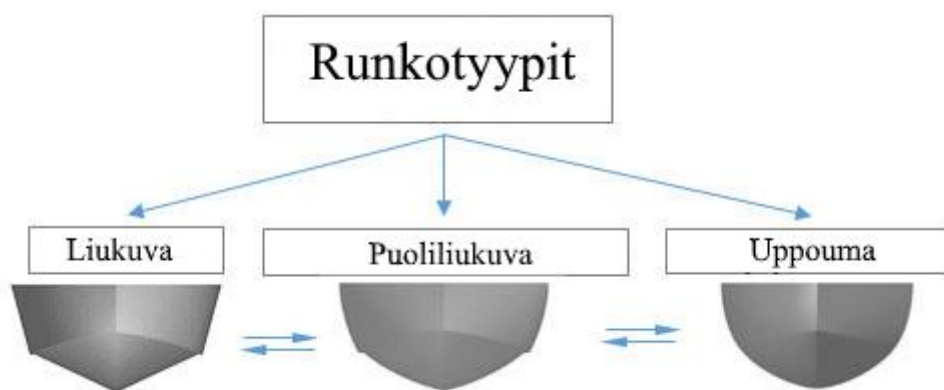
AGM	Imeytetty lasikuitumatto (absorbent glass mat)
DoD	Purkaussyvyys (depth of discharge)
EU	Euroopan unioni
HTP	Haitalliseksi tunnettu pitoisuus
Ni-MH	Nikkelimetallihydridi
SLI	Käynnistysakku (starting, lighting and ignition)
VRLA	Suljettu lyijyakku (Valve regulated lead–acid)

1. JOHDANTO

Valtioneuvosto on asettanut tavoitteeksi puolittaa liikenteen kasvihuonepäästöt 2030 mennessä, mitä varten tarvitaan paljon erilaisia keinoja (Valtioneuvosto, 2020). Vuonna 2018 Suomen kasvihuonekaasuista noin viidennes oli liikennepäästöjä, joista 4 % oli vesiliikenteen tuottamaa (Traficom, 2021). Huviveneily on Suomessa vesiliikenteen suurin hiilimonoksidi- ja hiilivetypäästöjen tuottaja ja toiseksi suurin hiilidioksidipäästöjen tuottaja (VTT, 2020). Huviveneilyn päästöjä olisi mahdollista pienentää sähköistämällä huviveneitä. Markkinoilla on tarjolla litium- ja lyijyakuilla toimivia sähköisiä perämootoreita.

Litiumakut ovat sähkö- ja hybridiajoneuvoissa yleisin akkutyyppi. Ne korvaavat aiemmin laajalti käytetyt nikkelimetallihydridiakut (Ni-MH), koska litiumakkujen ominaisenergia ja ominaisteho ovat suurempia kuin Ni-MH-akuissa (Iclodean et al., 2017). Litiumakuissa on kuitenkin ongelmana niiden korkea hinta muihin akkutyyppeihin verrattuna. Myös litiumin riittävyys liikenteen sähköistyessä on kyseenalaista (Vikström et al., 2013). Herää kysymys, voisiko jotain muuta akkutyyppiä käyttää litiumakkujen asemasta. Lyijyakit ovat halvempi vaihtoehto litiumakkuihin verrattuna niiden kilowattitunti hinnan ollessa alhaisempi (Anuphapharadorn et al., 2014). Lyijyakit ovat myös veneilykäytössä jo yleisiä soutuveneiden sähköisten perä- ja etumootoreiden energialähteinä. Lyijyakkuja on erityyppisiä erilaisiin käyttötarkoituksiin. Lyijyakkujen käyttöä sähköisen kulkuneuvon virtalähteenä tulevaisuudessa varjostaa niiden mahdollinen kieltö Euroopan unionissa (EU) (Vesa, 2017).

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää, onko lyijyakkujen käyttö energiavarastona halvempaa kuin litiumakkujen 6 m – 7 m pitkälle uppoumarunkoiselle sähkömoottoriveneelle, jossa on aurinkopaneeli kiinnitettynä akun latausta varten. Tähän pyritään vastaamaan selvittämällä ensiksi lyijyakkujen ominaisuuksia ja venekäytön asettamia vaatimuksia niille. Uppoumarunkoisessa veneessä venettä kannatteleva noste syntyy veneen uppoumasta, eli veneen rungon syrjäyttämästä vesimäärästä. Uppoumarunkoveneen uppouman takia veneen nopeuden nostaminen runkonopeuden yli lisää jyrkästi tehon tarvetta, minkä takia uppoumarunkoa käytetään hitaissa veneissä, kuten soutuveneissä ja hitaissa moottoriveneissä. (Karnerva, 2019) Uppoumarunkoiset veneet kulkevat tyypillisesti 7 kn – 9 kn (Finnboat, viitattu 2021). Kuvassa 1.1 esitellään veneiden erilaisten runkotyyppien poikkileikkauksia.



Kuva 1.1. Poikkileikkauksia erilaisista veneen runkotyypeistä. Uppoumarunkoisien veneiden pohja on pulomainen ja eroaa siten liukuvasta ja puoliliukuvasta runkotyyppistä (Khan et al., 2017, muokattu).

Tutkimuksessa pyritään vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

1. Minkä tyyppinen lyijy Akku sopisi parhaiten veneilykäyttöön?

2. Mitä turvallisuusriskejä lyijyakun käytössä voi olla ja miten ne pitäisi ottaa huomioon?
3. Miten aurinkopaneelit tulisi ottaa huomioon akuston kannalta?

Tutkimus toteutetaan kirjallisuuskatsauksena. Aineistona käytetään tieteellisiä julkaisuja ja kirjallisuuslähteitä, mutta lisäksi aiheeseen liittyviä aikakauslehtiä ja verkkosivuja. Tutkimuksessa tutustutaan myös markkinoilla valmiina oleviin ratkaisuihin.

2. LYIJJYAKUISTA

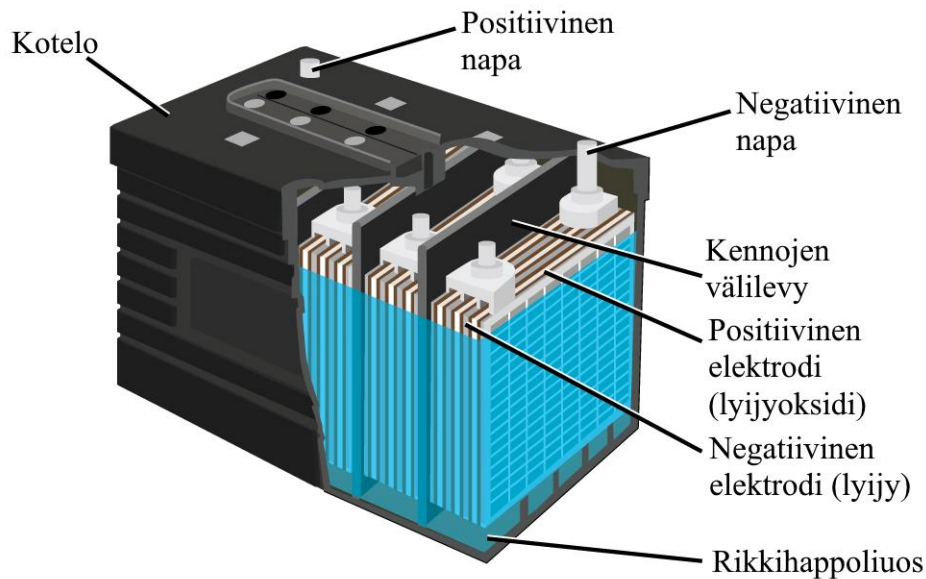
Vuonna 1859 Gaston Planté keksi lyijyakun, kun hän pinosi lyijylevyjä laimennettuun rikkihappoon. Vaikka hän ei ollut maailman ensimmäinen akkukeksijä, hän kuitenkin keksi ensimmäisen käytännössä toimivan akun. (Kurzweil, 2010) 1870-luvulla sähkömagneettisten generaattorien yleistyessä lyijyakkuja alettiin käyttää kulutuspiikkien tasaukseen. Niitä ladattiin öisin kulutuksen ollessa pientä. 1980-luvulla keksittiin niin sanotut suljetut lyijyakut (VRLA), joissa elektrolyytti on imeytetty johonkin aineeseen. Nykyisin lyijyakut ovat yleisin akkutyyppi noin 70 % markkinaosuudella vuonna 2008. (Reddy & Linden, 2011)

Yksinkertaisimmillaan lyijyakkujen toiminta perustuu kahden lyijylevyn sähkökemialliseen hapettumis- ja pelkistymisreaktioon, joiden välissä oleva rikkihappovesiliuos toimii elektrolyytinä. Positiivisella elektrodilla lyijyoksidin pelkistyy reagoiessa rikkihapon kanssa muodostaen lyijysulfaattia, vetyä ja happea. Negatiivisella elektrodilla lyijy hapettuu reagoiessa rikkihapon kanssa muodostaen lyijysulfaattia ja vetyä. Reaktiossa negatiivisella elektrodilla vapautuvat elektronit kulkevat ulkoista piiriä pitkin kohti positiivista elektrodia kuorman läpi, kuljettaen energiaa kuormalle. Negatiivisella elektrodilla vapautunut vety kulkeutuu elektrolyytissä positiiviselle elektrodille reagoiessa siellä muodostuneen vedyn ja hapen kanssa muodostaen vettä (Pavlov, 2017).

Sähköisiltä ominaisuuksiltaan lyijyakut ovat huonompia esimerkiksi litiumakkuihin verrattuna. Lyijyakkujen ominaisenergia on tyypillisesti keskimäärin 40 Wh/kg, joka on huomattavasti vähemmän kuin esimerkiksi litiumakkujen keskimääräinen 125 Wh/kg (Manzetti & Mariasiu, 2015). Käynnistykseen tarkoitetut lyijyakut kestävät yleensä vain noin 500 lataus sykliä, mutta syväpurkaukseen tarkoitetut voivat kestää jopa 2000 lataus sykliä, riippuen tyypistä. Mitä suurempi purkaussyvyys on, sitä vähemmän lataus syklejä akut kestävät. (Reddy & Linden, 2011) Lyijyakun varauksen täydellinen tyhjeneminen passivoi akun, eikä sitä voi enää ladata. Tilanteen korjaamiseksi siihen tulee lisätä rikkihappoa.

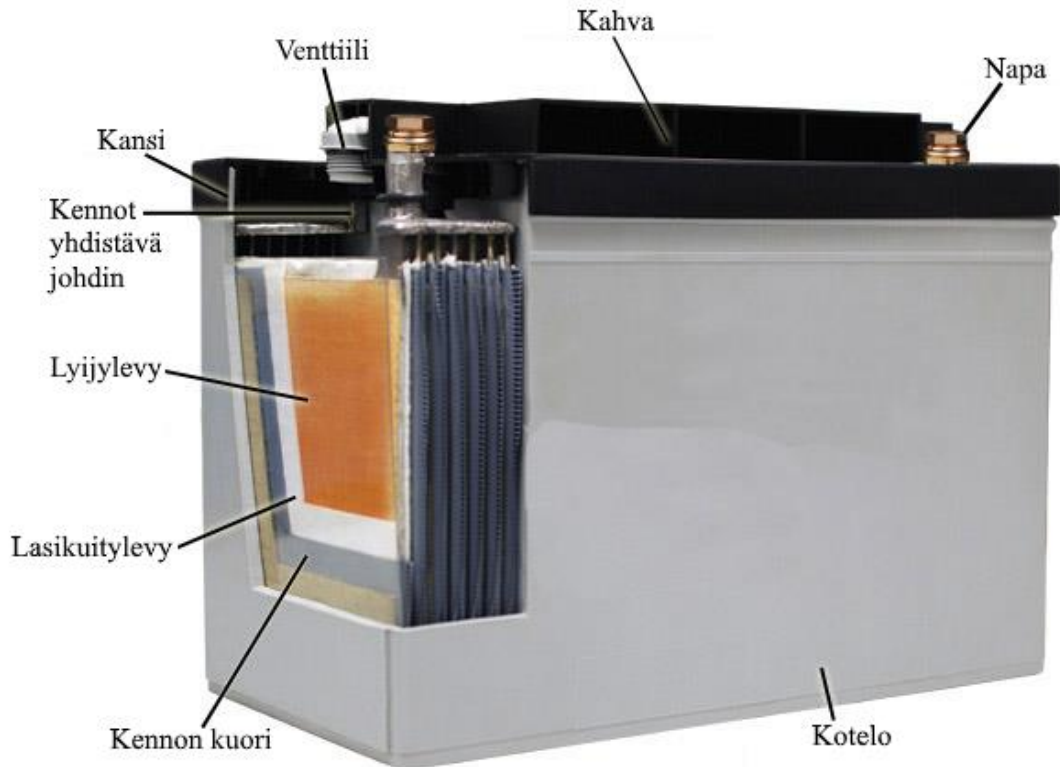
2.1 Lyijyakkutyypit

Lyijyakut voidaan jakaa rakenteen mukaan avoimiin ja suljettuihin akkuihin. Avoimissa lyijyakuissa elektrolyytti on akussa nestemäisenä vapaasti eikä ole suljettu ulkoilmasta, jolloin akusta haihtuu happea ja vetyä akun ollessa ylläladattuna. Tämän takia avoimiin lyijyakkuihin tarvitsee väliajoin lisätä akkuvettä. (Rand et al., 2004) Avoimen lyijyakun rakenne on esiteltyä kuvassa 2.1.



Kuva 2.1. Avoimen lyijyakun poikkileikkaus (Flowers et al., 2021, muokattu).

Suljetuissa lyijyakuissa elektrolyytti on geelimäisenä imeytettynä silikaattiin tai lasikuituun imeytettynä (AGM). Suljettuihin lyijyakkuihin ei tarvitse lisätä vettä, koska niistä eivät pääse happikaasut karkaamaan suljetun rakenteen ja elektrolyytin imeytyksen avulla saavutetun nopean happikierron ansiosta. (Reddy & Linden, 2011) Suljetut lyijyakut eivät kuitenkaan ole nimensä mukaisesti aivan täysin suljettuja. Niissä on venttiili, joka päästää joissain tilanteissa akkuun muodostuneen liiallisen vetykaasun ulos liian suuren paineen estämiseksi. Vaikka suljetun lyijyakun rakenne on erilainen kuin avoimen, sen kemialliset reaktiot ovat samat kuin avoimessa. (Rand et al., 2004) Kuvassa 2.2 on esitelty AGM-akun rakenne.



Kuva 2.2. AGM-akun leikkauskuva (Prostar China, Viitattu 21.5.2021, muokattu).

Lyijyakut ovat vielä jaoteltavissa eri tyyppeihin niiden käyttökohteen perusteella. Nämä tyytit ovat paikallaan olevat-, syväpurkaus- ja käynnistysakut (SLI). Käynnistysakuissa on pyritty minimoimaan akun sisäinen resistanssi, jotta siitä saatava virta olisi mahdollisimman suuri ajoneuvoa käynnistäessä, minkä takia niiden lyijylevyt ovat ohuita ja huokoisia. SLI akkuja ei ole suunniteltu kestäämään syväpurkausta ja niiden käyttöikä on yleensä lyhyt sellaisessa käytössä. (Reddy & Linden, 2011)

Syväpurkausakut ovat puolestaan suunniteltu kestäämään syväpurkausta ja paljon lataussyklejä, minkä takia niiden lyijylevyt ovat paksumpia. Syväpurkausakut voivat kestää jopa 2000 lataussykliä. Syväpurkausakkuja käytetään sähköisissä työkaluissa, kuten trukeissa. Matkaajoon tarkoitetuissa ajoneuvoissa SLI akut ovat kuitenkin yleisempiä, koska paksujen levyjen takia syväpurkausakut ovat painavampia, jonka takia niiden ominaisenergia on pienempi. Paikallislyijyakut on suunniteltu olemaan pitkiä aikoja huoltovapaita hyvän syväpurkauskeston lisäksi, minkä takia avoimissa on liiallisesti elektrolyyttiä. Liiallisen elektrolyytin takia paikallaan oleviin avoimiin akkuihin ei tarvitse lisätä vettä niin usein, mutta se lisää niiden massaa entisestään huonontaan ominaisenergiaa. Paikallisakussa hyvä ominaisenergia ei kuitenkaan ole oleellinen asia, koska niiden ei tarvitse olla liikuteltavissa. (Reddy & Linden, 2011)

Suljetuissa lyijyakuissa ominaisenergia on samaa luokkaa kuin avoimissa, mutta muuten suljetut lyijyakut eroavat ominaisuuksiltaan avoimista lyijyakuista. Suljetut SLI akut kestävät enemmän lataussyklejä kuin avoimet SLI-akut samalla purkaussyvyydellä, geeliakkujen ollessa vielä kestävämpiä kuin AGM-akut, kuten taulukosta 1 nähdään. Geeliakkujen huonona puolena on niiden korkea hinta ja suuri sisäinen resistanssi verrattuna AGM-akkuihin. (Rand et al., 2004)

Taulukko 1. Eri SLI lyijyakkutyyppeiden ja kennomuotojen ominaisarvoja. (Rand et al., 2004)

	Avoin 12 V	AGM 12 V särmio	AGM 12 V sylinteri	Geeli 12 V särmio	AGM 36 V särmio
Ominaisenergia [Wh/kg]	46	39	35	34	35
Energiatiheys [Wh/l]	95	95	70	71	81
Ominaispurkaus- teho [W/kg]	215	235	315	155	290
Tehotiheys [W/l]	445	570	630	325	670
Syklit n. 20 % DoD	n. 100	> 300	n. 50	> 640	> 300

Suljetuilla lyijyakuilla tulee myös ottaa huomioon lämpökarkaaminen. Lämpötilan kasvaminen lisää akussa muodostuvan hukkalämmön tuotantoa, mikä voi johtaa epämieluisaan noidankehään, jota kutsutaan lämpökarkaamiseksi. (Reddy & Linden, 2011) Lämpökarkaaminen tapahtuu, kun korkea lämpötila tai suuri latausvirta suljetussa lyijyakussa aiheuttaa akun kuivumista. Akun kuivuminen kasvattaa akun sisäistä resistanssia ja parantaa suljetun lyijy-akun happikierrossa hapen rekombinaation hyötysuhdetta, mitkä nostavat akun lämpötilaa, mikä taas kuivattaa akkua entistä enemmän. Akkukennon kuivuminen pienentää akun kapasiteettiä ja lyhentää sen elinikää. AGM akuissa myös lasikuitumaton liian pieni elektrolyyt-tisaturaatio nostaa hapen rekombinaation hyötysuhdetta. Geeliakussa puolestaan alussa hapen rekombinaation hyötysuhde on melko pieni, mutta kuivuminen voi nostaa hapen rekombinaation hyötysuhdetta erittäin korkeaksi. (Rand et al., 2004) Akun kuivuminen on ongelmallista suljetuissa lyijyakuissa, koska niihin ei voi lisätä vettä. Avoimet lyijyakut puolestaan kestävät korkeita lämpötiloja paremmin, koska niiden nestemäinen elektrolyytti viilentää niitä ja lämpenemisestä johtuvaa kuivumista voi korjata lisäämällä akkuvettä. (Schismenos et al., 2021). Akun eliniän parantamiseksi useampaa suljettua lyijyakkua kellutettaessa tulisi lämpökarkaamisen vuoksi akkujen välissä hyvä olla vähintään 1 cm vapaata tilaa, jotta lämpö haihtuisi tehokkaammin. Akuissa tulisi olla myös lämpötila-anturi, joka muuttaisi kellutus jännitettä ja virtaa automaattisesti (Rand et al., 2004). Kellutus tarkoittaa sitä, että akun varausta pidetään täydessä latauksessa jatkuvalla pienellä latausvirralla. Avoimet lyijyakut kestävät puolestaan hyvin kellutusta. (Reddy & Linden, 2011)

2.2 Lyijyakkujen turvallisuus

Lyijyakuissa on neljä turvallisuusriskiä. Elektrolyytin läikkyminen, oikosulku, myrkyllisten kaasujen vapautuminen akusta ja vetykaasun vapautuminen akusta. Sähköiskun vaara on merkityksetön 12 V jännitteillä. (Reddy & Linden, 2011)

Elektrolyytin läikkyminen on ongelma vain avoimissa lyijyakuissa, jos ne pääsevät kallistumaan, koska niiden avoin rakenne ja nestemäinen elektrolyytti mahdollistavat elektrolyytin

läikkymisen akusta ulos. (Reddy & Linden, 2011) Akun säilyttäminen sileällä ja happoa läpäisemättömällä pinnalla voi parantaa läikkyneen nesteiden leviämisen hallintaa (Schismenos et al., 2021). Suljetuissa lyijyakuissa ei puolestaan ole läikkymisongelmaa imeytetyn elektrolyytin ja suljetun rakenteen ansiosta, vaan niitä voidaankin säilyttää miten päin tahansa (Rand et al., 2004).

Oikosulkuja voi tapahtua, jos napojen tai navan ja maan välille tulee vettä, jotain metallia tai yleensäkin sähköä johtavaa ainetta. Varsinkin suljetuissa lyijyakuissa oikosulku on vaarallinen, koska niiden sisäinen resistanssi on pieni, jolloin oikosulkuvirrattakin ovat suurempia. Oikosulusta aiheutuva akun kuumentuminen voi aiheuttaa palovammoja ja jopa tulipalovauraan. Oikosulun vaaraa voi pienentää pitämällä akut kuivina ja puhtaina, mikä estää maasulun syntymistä, estämällä napoja koskettamasta toisiinsa käyttämällä eristettyjä työkaluja toimittaessa akkujen kanssa ja suojaamalla akkujen napoja tahattomalta kosketukselta. Akut ovat myös sähköisesti elossa tyhjänä, minkä takia silloinkin niiden käsittelyssä pitää noudattaa varovaisuutta. (Reddy & Linden, 2011)

Joissakin lyijyakuissa voi myös muodostua myrkyllisiä arseenivety (AsH_3) ja antimoniivety (SbH_3) kaasuja. Näitä kaasuja muodostuu vain, jos akun lyijylevyt sisältävät pieniä määriä arseenia tai antimonia vähentämään akun sisäistä korroosiota käytön aikana. Arseenivetyä ja antimoniivetyä muodostuu, kun arseeni tai antimoni joutuvat kosketuksiin kehittyvän vedyn kanssa, yleensä akun ylilatauksen aikana. Nämä metallit sitten reagoivat vedyn kanssa ja muodostavat väritöntä ja käytännössä hajutonta kaasua, joka on ihmiselle erittäin vaarallista, minkä takia hyvä ilmanvaihto akun säilytystilassa on tärkeää. (Reddy & Linden, 2011) Suomessa sosiaali- ja terveysministeriö (2020. S. 23) on asettanut antimonivedylle raja-arvoksi 0,05 ppm tai 0,26 mg/m³ 15 min altistukselle ja arseenivedylle 0,01 mg/m³ 8 h altistukselle.

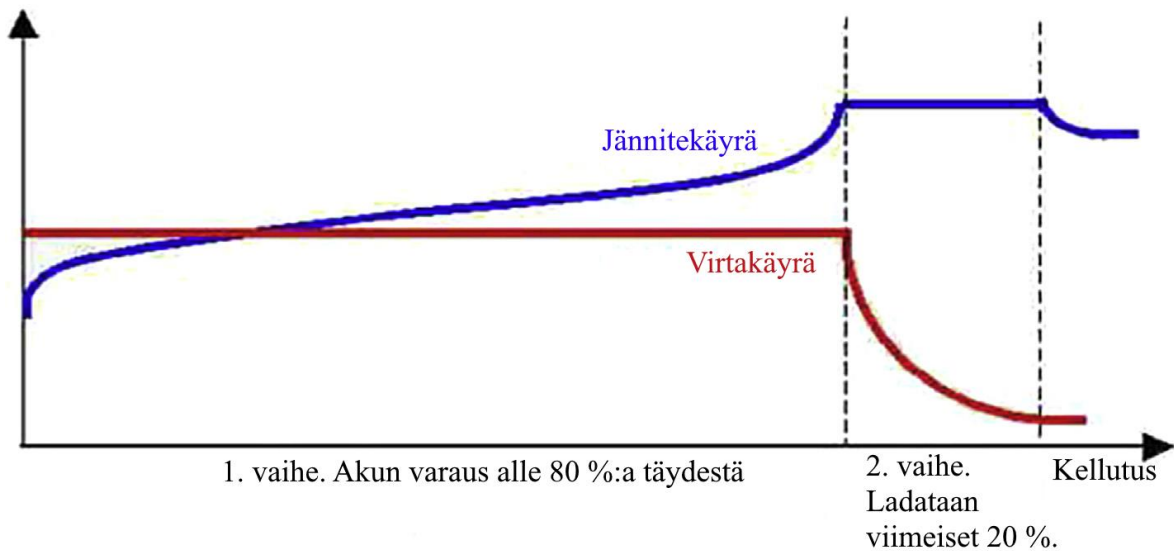
Lyijyakkujen säilytystilassa tulisi myös olla hyvä ilmanvaihto vety- ja muiden kaasujen luoman paloturvallisuusriskin ja kaasujen kertymisen tuottaman paineen kasvun takia. Kun ilman tilavuudesta 4 % - 79 % on vetyä, seos on paloherkkää standardilämpötilassa ja -paineessa. Standardilämpötilassa ja -paineessa, eli niin sanotuissa NTP-oloissa, on paine 1,013 25 bar ja lämpötila 0 °C. Avointa lyijyakkua ladatessa tai sen ollessa ylilatauksessa muodostuu vety- ja happikaasua. Tämä kaasuseos on herkästi syttyvää ja räjähdysherkkää, minkä takia yksittäinenkin kipinä voi aiheuttaa jo tulipalon tai räjähdyksen. Suljetut lyijyakut puolestaan päästävät ulos vetykaasua jokaisen syklin aikana ylläpitääkseen sisäistä kemiallista tasapainoa, mutta suljetun akun rakenne minimoi tuotetun vedyn määrän. Vety määrä on sen verran pieni, että se haihtuu pikaisesti ilmaan. Happea niistä ei vapaudu, koska niiden nopean happikierron ansiosta kaasumaista happikaasua ei ehdi kertymään akun sisälle. Suljetuissa lyijyakuissa kuitenkin muodostuu vetykaasun lisäksi hiilidioksidia kennossa olevien orgaanisten yhdisteiden hapettumisesta. Jos suljetusta lyijyakusta vapautuva vety pääsee sekoittumaan ilman kanssa, muodostuu siitä paloarka kaasuseos. Lyijyakkuja ei tulisi asentaa liian tiiviiseen tilaan, koska erilaisten kaasujen vapautuessa akusta paine alkaa kasvaa, jos kaasut eivät pääse kulkeutumaan pois. Suositeltua suuremmat latausvirrat tuottavat enemmän vety- ja happikaasua. (Reddy & Linden, 2011)

3. VENEILYN VAATIMUKSET AKULLE JA AKKUTYYPIN VALINTA

Lyijyakkujen käyttö veneissä asettaa vaatimuksia akulle. Massan kasvaminen lisää liikkumiseen vaadittavan energian tarvetta. Moottorilta vaadittuun työntötehoon vaikuttaa massan lisäksi veneestä riippuvat hydrodynaamiset parametrit, kuten sen väliaineen vastus (Reabroy et al., 2015). Hitaalla veneellä veden väliaineenvastus on merkittävin kaikista eri vastuksista 70 % - 80 % osuudella (Shigeyuki & Naoki, 2004). Massan lisäämien painaa venettä syvemmälle ja kasvattaa veneen veden alla olevaa pinta-alaa. Veden alla olevan pinta-alan kasvaminen kasvattaa veden väliaineenvastusta (Shigeyuki & Naoki, 2004). Tämän takia veneen massa tulisi pitää mahdollisimman pienenä, ja minkä takia akun suuri ominaisenergia on parempi, koska akkujen lisääminen veneeseen nostaa veneen massaa. Polttomoottorikäyttöisen ja sähkökäyttöisen järjestelmän massoja vertaillen on sähköinen painavampi, ottaen huomioon myös akkujen ja polttoaineen massan, mutta sähköisen järjestelmän massan sijaintia voi muuttaa vapaammin, koska eri osat voi sijoittaa jokseenkin joustavasti (Spagnolo et al., 2011). Myös energiatiheys on tärkeää, koska veneissä on vain rajattu määrä tilaa, minkä takia niihin ei mukaan mahdu montaa akkua. Veneilykäytössä matka-ajossa akun purkaussyvyys voi kasvaa suureksi, minkä takia syväpurkauksen kesto akulla olisi myös tärkeää.

Turvallisuuden puolesta pitää ottaa huomioon akuista ulos pääsevä vetykaasu. Reddyn & Lindenin (2011) mukaan ilman vaihdon ollessa hyvä, vedyn kertyminen ei ole ongelma, mutta ahtaissa tiloissa voidaan tarvita aktiivista tuuletusta. Vedyn purkautumisen takia lyijyakuista koostuvaa akustoa pitäisi pitää veneessä hyvin tuulettuvassa tilassa. Akkujen lisääminen kasvattaa purkautuvan vedyn määrää. Mitä enemmän akkuja on, sitä parempaa ilman vaihtuvuutta tarvitaan. Standardi toimintatapa vetyräjähdysten ehkäisyksi on asettaa tätä käyttötarkoitusta varten huokeaan hintaan kaupallisesti saatavia vetyhälyttimiä, jotka hälyttävät, kun ilman vetypitoisuus on viidesosa paloarasta vetypitoisuudesta (Reddy & Linden, 2011). Hyvä ilmanvaihto myös tuulettaa pois mahdolliset antimonivety- ja arseenivetykaasupäästöt, jottei niistä aiheudu haittaa ihmisille. Suljettu lyijyaku olisi turvallisempi vaihtoehto, koska siitä vapautuu vähemmän vetykaasua. Vaikka akkujen säilytystilan tulisi olla vetykaasujen takia hyvin tuulettuva niin sen pitäisi olla myös vedenpitävä, jottei vettä pääse akkutilaan aiheuttamaan oikosulkua. Avointa lyijyakkua käytettäessä on myös vaarana veneen mahdollinen kallistuminen, jolloin elektrolyyttiä saattaa läikkyä ulos, minkä takia suljettu lyijyaku olisi myös parempi vaihtoehto turvallisuuden näkökulmasta.

Aurinkopaneelit asettavat omat vaatimuksensa akuille. Aurinkopaneelien tuottama ylimääräinen energia, jota tuotetaan auringonvalon intensiteetin ollessa huipussaan voi vahingoittaa akkuja. Tämän takia aurinkopaneelien kanssa tulisi käyttää lataussäädintä, joka ylläpitää akulle sopivaa latausjännitettä. Lyijyakun lataamiseen suositeltu lataustapa on kolmivaiheinen latausykli, joka havainnollistetaan kuvassa 3.1. (Bognoa et al., 2016) Aurinkopaneelikäyttöä ajatellen avoimet lyijyakut ovat parempi vaihtoehto niiden paremman kellutuskeston ansiosta ja koska niihin voi lisätä vettä akun kuivuuessa akkua kellutettaessa, mutta Reddyn & Lindenin (2011) mukaan kellutettaessa suljetun lyijyakun elinikä on yli kahdeksan vuotta, jolloin kelluttaminen ei ole ongelma.



Kuva 3.1. Akun kolmivaiheinen lataussykli. Ensimmäisessä vaiheessa akkua syötetään vakiovirralla, mutta jännite kasvaa akun jännitteen mukana. 2. vaiheessa jännite pysyy vakiona, mutta akulle syötettävä virta pienenee varauksen lähestyessä sataa prosenttia. Akun varauksen ollessa täysi akkua kellutetaan, jolloin sen omapurkaus kompensoidaan pienellä virralla. (Bognoa et al., 2016, muokattu)

Lyijyakkutyypeistä suljettu lyijyakku on venekäyttöön turvallisuuden ja syklien keston kannalta parempi vaihtoehto kuin avoin. Suljetun lyijyakun olisi hyvä vielä olla syväpurkausakku eikä SLI akku, jotta akku kestäisi korkeampia purkaussyvyyyksiä. Turvallisuuden puolesta suljetulla lyijyakulla ei ole ongelmaa elektrolyytin läikkymisen kannalta, mutta akut tulisi säilyttää tilassa, jossa ilma pääsee kiertämään akusta purkautuvien vetykaasujen takia. Aurinkopaneelien liittäminen vaatii kolmivaiheisen lataussäätimen. Pelkkä jänniteregulaattori ei ole optimaalinen. Muuten aurinkopaneelien liittäminen ei vaikuta itsessään akkujen valintaan.

4. LYIJYAKUN TALOUDELLISUUS VERRATTUNA LITIUMAKKUUN

Lyijyakun kannattavuudessa veneen energiavarastoksi on myös teknisten ominaisuuksien lisäksi tärkeää tarkastella niiden taloudellisuutta verrattuna litiumakkuihin. Markkinoilla tarjolla olevien hitaiden 6 m – 7 m pitkien sähkömoottoriveneiden käyttämien moottoreiden nimellistehot vaihtelevat väliltä 4 kW – 10 kW. E-boat oy:n SunnyCat uppoumarunkoisessa 6,1 metriä pitkässä katamaraanissa on neljän kilowatin moottori, ja Elwood boats 650e 6,5 metriä pitkässä uppoumarunkoisessa veneessä on kymmenen kilowatin moottori. 650e:lle luvataan neljän tunnin toiminta-aikaa seitsemän solmun nopeudella, jolloin sen 13,3 kWh akulla moottorin ottama keskimääräinen teho on noin 3,3 kW. Tarkasteltavan veneen liikuttamiseen tarvittavan tehon voidaan olettaa myös olevan samaa suuruusluokkaa, koska se on uppoumarunkoinen, kuten 650e, ja on 650e veneen kanssa samaa pituusluokkaa. SunnyCat-katamaraanin pienemmän tehontarpeen selittää sen runko, koska katamaraanissa veden alla oleva pinta-ala on pienempi, jolloin sen väliaineenvastus on pienempi (Spagnolo et al., 2011).

Markkinoilla tarjolla olevat nimellisteholtaan 4 kW – 10 kW:n teholuokkaan kuuluvat sähkömoottorit käyttävät pääasiassa 48 V:n käyttöjännitettä, kuten taulukon 2 esimerkkimootoreista nähdään.

Taulukko 2. Eri sähkömoottoreita veneeseen. Näihin moottoreihin käy erillinen akku eikä käyttäjän tarvitse välttämättä valita valmistajan tarjoamaa akkua.

Moottori	Nimellisteho [kW]	Käyttöjännite [V]
Torqueedo Cruise 4.0	4	48
Torqueedo Cruise 10.0	10	48
Oceanvolt Shaftdrive AX3	3,7	48
Oceanvolt Shaftdrive AX5	5,2	48
Oceanvolt Shaftdrive AX8	8,3	48
Oceanvolt Saildrive SD6	6	48
Oceanvolt Saildrive SD8	8	48
Oceanvolt Saildrive SD10	10	48

Tutkittavaan venetyyppiin teholtaan sopiva moottori tarvitsee 48 V käyttöjännitteen, jolloin 12 V akkuja täytyy kytkeä sarjaan neljä kappaletta. Jos halutaan saada 650e:tä vastaava neljän tunnin ajokantama olettaen moottorin ottotehon olevan 4 kW, akuston kapasiteetiksi tarvitaan 16 kWh. Koska akkujen nettokapasiteetti on 80 % ilmoitetusta nimelliskapasiteetista, akuston nimelliskapasiteetin täytyy olla vähintään 20 kWh. Jotta kapasiteetissä päästäisiin haluttuun suuruuteen, akkuja tarvitsee vielä kytkeä rinnan. Taulukkoon 3 on kerätty erilaisien akkujen ominaisuuksia vertailua varten ja laskettu akuston nimelliskapasiteetti, nettokapasiteetti, massa, hinta ja kilowattitunnin hinta 48 V nimellisjännitteellä ja liki 20 kWh:n kapasiteetillä. Osassa akustoissa kapasiteetti menee yli 20 kWh:n, koska akkujen sarjaan kytkentä rajoittaa rinnan kytkettävien akkujen lukumäärä. Jokaisessa rinnan olevassa sarjassa täytyy olla yhtä monta akkua, jotta niiden jännite olisi sama.

Taulukko 3. Akkuja vertailua varten. Kapasiteetit on muutettu wattitunneiksi kertomalla ampeeritunnit nimellisjännitteellä. Vertailuun mukaan otetut lyijyakut ovat syväpurkauk käyttöön tarkoitettuja.

Akku	Exide Equipment	Exide Dual AGM	Energie+ GEL	Rebelcell	Torqeedo power 24-3500	Torqeedo power 48-5000
Tyyppi	Avoin	AGM	Geeli	Litium	Litium	Litium
Nimellisjännite [V]	12	12	12	12	24	48
Nimelliskapasiteetti [Ah]	180	240	220	190	-	-
Nimelliskapasiteetti [kWh]	2,16	2,88	2,64	2,28	3,5	5
Tarvittava akkuyksiköiden lukumäärä	12	8	8	12	6	4
Akuston nimelliskapasiteetti [kWh]	25,92	23,04	21,12	27,36	21	20
Akuston nettokapasiteetti (80 % nimellisestä) [kWh]	20,736	18,432	16,896	21,888	16,8	16
Massa [kg]	49,7	70	56	12,5	25,3	37
Akuston massa [kg]	596,4	560	448	150	151,8	148
Hinta [€]	279	449	279	1 899	3 200	5 350
Akuston minimihinta [€]	3 348	3 592	2 232	22 788	19 200	21 400
Akuston kilowattitunnin minimihinta [€/kWh]	129,17	155,9	105,68	832,89	914,29	1 070,00

Kuten taulukosta nähdään, lyijyakuista koostuva akusto tulee huomattavasti halvemmaksi kuin saman kapasiteettinen litiumakuista koostuva akusto, eron ollessa lähes 1 000 €/kWh. Avoimien ja suljettujen lyijyakkujen välillä on vain kymmenien eurojen ero suhteutettuna kilowattitunteihin. Vertailuun otettu geeliakku on huomattavasti halvempi kuin AGM, mikä voi näkyä geeliakun laadussa, koska Reddyn ja Lindenin (2011) mukaan geeliakut olisivat kalliimpia kuin AGM-akut.

Jos halutaan päästä 12 V lyijyakuilla 16 kWh:n nettokapasiteetin suuruusluokkaan niin avoimia Exide Equipment 180 Ah akkuja tarvittaisiin kaksitoista kappaletta; neljä sarjassa ja toiset kaksi neljän sarjaa rinnankytkettynä keskenään. Akustolle hintaa tulisi 3 348 € ja nettokapasiteetti olisi noin 21 kWh, ja akuston massaksi tulisi vajaat 600 kg. Suljetuilla Exide Dual AGM 240 Ah akuilla niiden suuremman kapasiteetin ansiosta tarvittaisiin vain kaksi neljän akun sarjaa, jolloin hinnaksi tulisi 3 592 € ja massaa 560 kg. Avoimia lyijyakkuja käyttämällä päästäisiin 250 € halvemmalla kuin suljetuilla. Massaa avoimista ja suljetuista lyijyakuista koostuville akustoille tulisi lähes yhtä paljon, mutta avoimen lyijyakuston nettokapasiteetti olisi noin 2 kWh suurempi.

Litiumakuista koostuva akusto on kevyempi kuin mikään avoimista tai suljetuista lyijyakuista koostuva akusto. Neljän 5 kWh:n litiumakun akuston massaksi tulisi 148 kg, mikä on noin 450 kg kevyempi kuin avoimista lyijyakuista koostuva akusto. Akuston nettokapasiteetti olisi tasan 16 kWh, mutta akuston hinnaksi tulisi yli 21 000 €, jolloin hintaeroa avoimista lyijyakuista koostuvalle akustolle olisi noin 18 000 €.

Syväpurkauslyijyakut kestävät Reddyn & Lindenin (2011) kirjan mukaan suunnilleen yhtä paljon lataussyklejä kuin litiumakut paitsi, että litiumakut kestävät syväpurkausta lyijyakkuja paremmin. Lyijyakkujen huonommasta syväpurkauskestävyydestä ei löydy tarkkoja arvoja siitä, miten paljon vähemmän akut kestävät silloin, joten siitä aiheutuvasta käyttöiän lyhenemästä ei voi tehdä tarkkaa arviota. Tämän vuoksi oletetaan lataussykliä kestävyyden olevan samaa luokkaa. Lataussykliä ollessa samaa tasoa siitä ei aiheudu lisäkustannuksia, koska molemmat akkutyypit pitää uusia yhtä usein. Akuissa voi tietenkin olla eroja keskenään ja halvemmat akut eivät välttämättä kestä yhtä paljon lataussyklejä kuin kalliimmat akut.

Lyijyakut ovat selvästi halvempi vaihtoehto litiumakkuihin verrattuna, eron ollessa lähes 20 000 €, mutta niitä käyttämällä massaa tulee pienimmillään 450 kg enemmän kuin litiumakuilla, minkä takia moottori vaatii enemmän tehoja massan lisätessä veden väliaineenvastusta, jolloin akkujen varaus tyhjenee nopeammin. Lyijyakkujen keskenään vertailussa avoimet lyijyakut ovat vielä halvempi ja kevyempi vaihtoehto suljettuihin lyijyakkuihin verrattuna.

5. YHTEENVETO

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, onko lyijyakkujen käyttö energiavarastona halvempaa kuin litiumakkujen 6 m – 7 m pitkälle uppoumarunkoiselle sähkömoottoriveneelle, jossa on aurinkopaneeli kiinnitettynä akun latausta varten. Tutkimuksessa myös selvitettiin, mikä lyijyakkutyypin sopii parhaiten veneen energiavarastoksi, mitä turvallisuuteen liittyviä riskejä on lyijyakun käytössä ja miten aurinkopaneelit tulisi ottaa huomioon akuston kannalta.

Tutkimuksessa selvisi, että lyijyakkujen käyttö uppoumarunkoisen sähkömoottoriveneen energiavarastona on edullisempaa kuin litiumakkujen, säästöjen ollessa jopa vajaat 20 000 €. Toisaalta lyijyakuista tulee ainakin 450 kg lisämassaa veneeseen verrattuna litiumakkuihin. Se, miten paljon lisämassa vaikuttaa moottorin ottamaan tehoon riippuu veneen rungosta ja sen muotoilusta, minkä takia sitä ei voitu tarkemmin analysoida tässä tutkimuksessa. Avoimista ja suljetuista lyijyakuista koostuvia akustoja verratessa ero hinnassa on noin 250 € luokkaa.

Lyijyakkutyypeistä parhaiten veneen energiavarastoksi sopii suljettu lyijyaku niiden paremman turvallisuuden takia, koska niistä akkuhappoa ei voi läikkyä, ja niiden pidemmän eliniän ansiosta. Avoimet lyijyakut ovat parempia, jos akkuhapon läikkyminen ei ole ongelma tai veneen massa täytyy pitää mahdollisimman pienenä, koska suljetut lyijyakut ovat massaltaan suurempia kuin avoimet.

Turvallisuuden kannalta pahin uhka on akuista vapautuva vetykaasu, jota pitää tuulettaa pois, jottei pääse syntymään tulipalo- tai räjähdysvaaraa veneessä. Myös aiemmin mainittu akkuhappojen läikkyminen on yksi turvallisuusriski, mutta se ei ole ongelma suljetuissa lyijyakuissa. Aurinkopaneeleilla varustetussa veneessä täytyy akkuja varten hankkia lataussäädin, joka pitää jännitteen ja virran akuille sopivana.

LÄHTEET

Anuphapparadorn, Suratsawadee et al. 2014. Comparison the Economic Analysis of the Battery between Lithium-ion and Lead-acid in PV Stand-alone Application. Energy Procedia. Vol. 56. S. 252–258.

Bognoa, Bachirou, Sawicki, Jean-Paul, Salame, Takla, Aillerie, Michel, Saint-Eve, Frédéric, Hamandjodad, Oumarou, Tibi, Beda. 2016. Improvement of safety, longevity and performance of lead acid battery in off-grid PV systems. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 42. No. 5. S. 3466-3478.

Finnboat. Uppoumarunkoinen vai liukuva vene? Verkkajulkaisu. Viitattu 30.6.2021. Saatavissa: http://www.finnboat.fi/fi/fi_4_1_1.html.

Flowers, Paul et al. Batteries and Fuel Cells. The LibreTexts libraries. Verkkoaineisto. Viitattu 12.3.2021. Saatavissa: [https://chem.libretexts.org/Courses/CSU_San_Bernardino/CHEM_2100%3A_General_Chemistry_I_\(Mink\)/16%3A_Electrochemistry/16.05%3A_Batteries_and_Fuel_Cells](https://chem.libretexts.org/Courses/CSU_San_Bernardino/CHEM_2100%3A_General_Chemistry_I_(Mink)/16%3A_Electrochemistry/16.05%3A_Batteries_and_Fuel_Cells)

HTP-arvot 2020. Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. 2020. Sosiaali- ja terveysministeriö. ISBN 978-952-00-5658-2.

Iclodean, C., Varga, B., Burnete, N., Cimerdean, D., Jurchiș, B. 2017. Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 252.

Kanerva, Tuomo. Moottoriveneiden runkomuodot: Runko on veneen selkäranka. Verkkajulkaisu. Viitattu 21.1.2021. Saatavissa: <https://venehti.fi/moottoriveneiden-runkomuodot-runko-on-vene-selkaranka>.

Karkela, Leena, Yli-Kokko, Tuomas. 2013. MAOL-taulukot. 3. painos. Otava. ISBN 978-951-1-26270-1.

Khan, Shahroz, Gunpinar, Erkan, Dogan, Kemal Mert. 2017. A Novel Design Framework for Generation and Parametric Modification of Yacht Hull Surfaces. Ocean Engineering. Vol. 136. S. 243–259.

Kurzweil, P. 2010. Gaston Planté and his invention of the lead–acid battery—The genesis of the first practical rechargeable battery. Journal of Power Sources. Vol. 195, No. 14. S. 4424–4434.

Liikenteen kasvihuonekaasupäästöt ja energiankulutus. Traficom. Verkkoaineisto. Viitattu 14.1.2021. Saatavissa: <https://www.liikenne fakta.fi/fi/ymparisto/liikenteen-kasvihuonekaasupaaastot-ja-energiankulutus>.

Liikenteen päästöt puoleen 2030 mennessä – tarvitaan laaja keinovalikoima. Valtioneuvosto. Verkkoaineisto. Viitattu 20.1.2021. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/liikenteen-paastot-puoleen-2030-menessa-tarvitaan-laaja-keinovalikoima>.

- Manzetti, Sergio, Mariasiu, Florin. 2015. Electric vehicle battery technologies: From present stateto future systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol 51. S. 1004–1021.
- Pavlov, Dechko. 2017. *Lead-Acid Batteries: Science and Technology A Handbook of Leade Acid Battery Technology and Its Influence on the Product*. Second Edition. Elsevier. ISBN 978-0-444-59552-2.
- Prostar GP2-12 sealed agm renewable energy storage battery 12V 2AH. Verkkoaineisto. Viitattu 21.5.2021. Saatavissa: <https://www.prostar-china.com/product-details/prostar-gp2-12-sealed-agm-renewable-energy-storage-battery-12v-2ah>.
- Rand, D.A.J., Moseley, P.T., Garche, J., Parker, C.D. 2004. *Valve-regulated Lead–Acid Batteries*. Elsevier. ISBN 0-444-50746-9.
- Reabroy, Ratthakrit, Tiaple, Yodchai, Pongduang, Sathit, Nantawong, Tewarat, Phansak Iamraksa. 2015. The Possibility of Using Electrical Motor for Boat Propulsion System. *Energy Procedia*. Vol. 79. S. 1008-1014.
- Reddy, Thomas B., Linden, David. 2011. *Linden’s handbook of batteries 4th edition*. The McGraw-Hill Companies, Inc. ISBN 978-0-07-162419-0.
- Schismenos, Spyros, Chalaris, Michail, Stevens, Garry. 2021. Battery hazards and safety: A scoping review for lead acid and silver-zinc batteries. *Safety Science*. Vol. 140.
- Shigeyuki, Minami, Naoki, Yamachika. 2004. A Practical Theory of the Performance of Low Velocity Boat. *Journal of Asian Electric Vehicles*. Vol. 2. No. 1. S. 535–539.
- Spagnolo, Schirripa, G., Papalilo, D., Martocchia, A. 2011. Eco friendly electric propulsion boat. 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering. 2011. S. 1-4.
- Suomen vesiliikenteen päästöt ja energiankäyttö vuonna 2019. VTT. Verkkoaineisto. Viitattu 2.8.2021. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/meeri/perus2019.htm>.
- Vesa, Jarkko. 2017. Lyijyakkujen taru uhkaa päättyä – kulisseyssä kovaa lobbausta poikkeusluvalle. Verkkoaineisto. Viitattu 21.1.2021. Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/lyijyakkujen-taru-uhkaa-paattya-kulisseyssa-kovaa-lobbausta-poikkeusluvalle/0fc91fbc-b15c-31b1-ba70-01a7b20009b7>.
- Vikström, Hanna, Davidsson, Simon, Höök, Mikael. 2013. Lithium availability and future production outlooks. *Applied Energy*. Vol. 110. S. 252–266.