



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

JAN-ERIK FAGER

Sähkön varastointi

SÄHKÖ- JA AUTOMAATIOTEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA
2022

| | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Tekijä(t) Fager, Jan-Erik | Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK | Päivämäärä 05 2022 |
| | Sivumäärä 20 | Julkaisun kieli Suomi |
| Julkaisun nimi Sähkön varastointi | | |
| Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikka | | |
| Tiivistelmä Tämän työn tarkoituksena oli tutkia erilaisia sähkön varastointitekniikoiden ominaisuuksia ja kustannuksia ja verrata niitä toisiinsa. Toimeksiantaja työlle on Satakunnan ammattikorkeakoulu. Työn tavoitteena oli tuoda toimeksiantajalle, sekä tämän työn lukijalle tietoa erilaisista sähkön varastointitekniikoista ja auttamaan valitsemaan käyttötarkoitukseen sopivimman sähkön varastointiratkaisun. Työ suoritettiin tutkimalla olemassa olevaa tutkimustietoa verkko- ja kirjallisuusmateriaalia käyttäen. Työn tuloksena lukijalle muodostuu käsitys erilaisten sähkön varastointitekniikoiden soveltuvuuksista erilaisiin käyttötarkoituksiin. | | |
| Avainsanat Sähkön varastointi, sähkö, akku, akusto, varastointi, energia, energian varastointi | | |

| | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|
| Author(s) Fager, Jan-Erik | Type of Publication Bachelor's thesis | Date 05 2022 |
| | Number of pages 20 | Language of publication: Finnish |
| Title of publication Electric storage | | |
| Degree programme Electrical and automation engineering | | |
| Abstract Purpose of this work was to research different electric storage techniques and their features and costs and compare them to each other. Client for this work is Satakunta university of applied sciences. Goal of this work was to give knowledge to the client and for the reader of this work and help them choose best electric storage technique for their need. This work was accomplished by examining existing research data from online and literary material. As a result of the work, reader forms an understanding of different electric storage techniques and their suitability for intended use. | | |
| Keywords Electric, battery, storage, energy | | |

SISÄLLYS

| | |
|----------------------------------------------|----|
| 1 JOHDANTO | 5 |
| 2 KEMIAALLISET AKUT | 6 |
| 2.1 Litiumioniakku | 6 |
| 2.2 Natriumioniakku | 7 |
| 2.3 Ruosteakku | 8 |
| 2.4 Nestemetalliakku | 9 |
| 2.5 Redox-virtausakku | 11 |
| 2.6 Nikkeli-rauta-akku | 12 |
| 3 MEKAANISET AKUT | 13 |
| 3.1 Vauhtipyöräakku | 13 |
| 3.2 Nesteilma-akku | 15 |
| 3.3 Painovoima-akku | 16 |
| 3.3.1 Nestepainovoima-akku | 16 |
| 3.3.2 Kiinteämassaiset painovoima-akut | 17 |
| 4 TEKNIKOIDEN VERTAILU | 18 |
| 5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET | 19 |
| LÄHTEET | |

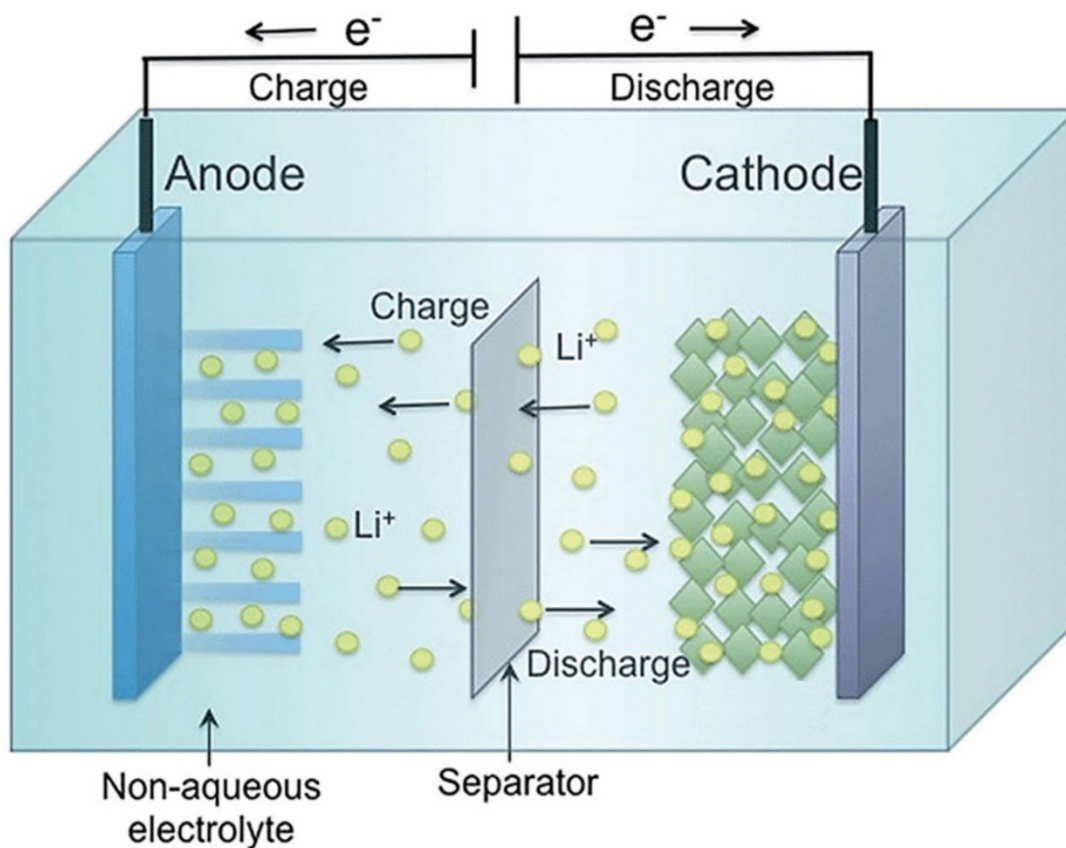
1 JOHDANTO

Maailman kehityssuunta on koko ajan loittonemassa fossiilisista polttoaineista uusiutuviin energianlähteisiin. Ongelmaksi on koitunut energian varastoiminen, niin liikkuvissa, kuin kiinteissä kohteissa. Tutkijat ympäri maailmaa ovat kehittäneet uusia ja ehostaneet entisiä sähkön varastointitekniikoita. Eri käyttötarkoituksiin sopivan ja kustannustehokkaan vaihtoehdon valitseminen voi olla aikaa vievää ja haastavaa. Työn tavoitteena on auttaa tuomaan tietoa ja vertailukelpoisia tuloksia erilaisista sähkön varastointitekniikoista. Tarkasteltaviksi tekniikoiksi valitaan lupaavimmat kemialliset akut, sekä mekaaniset sähköenergiavarastot. Työ suoritetaan tutkimalla olemassa olevaa tietoa verkko- ja kirjallisuusmateriaalista, jonka pohjalta tulokset ja vertailu tehdään.

2 KEMIAALLISET AKUT

2.1 Litiumioniakku

Litiumioniakun toiminta perustuu litiumionien varauskierteeseen, jossa se luovuttaa, tai vastaanottaa elektroneja sen liikkuesssa elektrolyytin läpi toiselle elektrodille. Litiumioniakku rakentuu negatiivisesta ja positiivisesta elektrodista, sekä litiumionisuolasta, joka on liuenneena orgaanisessa elektrolyytissä. Negatiivinen elektrodi on yleensä valmistettu hiilestä ja positiivinen elektrodi metallidioksidista. Kemialliset reaktiot elektrolyytin ja elektrodien rajapinnassa hapettavat tai pelkistävät litiumionin ja vapaa elektroni virtaa elektrodeja yhdistävän johtimen läpi toiselle elektrodille. Alla oleva kuva (Kuva 1) havainnoi akun toimintaa.



Kuva 1. Litiumioniakku havainnekuva (Poulomi & Srivastava, 2015)

Litiumioniakun tyypillisimmät käyttökohteet ovat käsikäyttöiset ja siirrettävät laitteet, sekä sähköautojen akut. Litiumioniakun kaupallinen valmistus alkoi vuonna 1991. Litiumioniakku ei vaadi huoltotoimenpiteitä, mutta akku yleensä vaihdetaan, kun sen latauskapasiteetti laskee alle 80 % nimellisestä latauskapasiteetista.

Akun kierrättäminen on vielä hankalaa ja kallista. Akku voidaan rakentaa, joko suurella energiakapasiteetilla, tai suurella purkausvirralla. Alla oleva taulukko (Taulukko 1) sisältää akun ominaisuuksia.

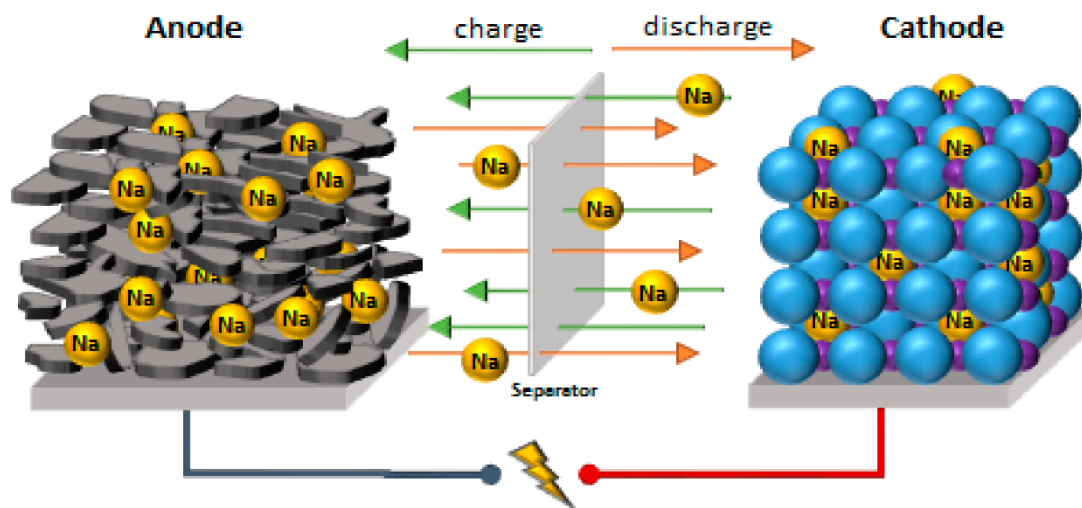
Taulukko 1. Akun ominaisuuksia.

| | |
|----------------------|--------------------|
| Energiatiheys | 250-690 Wh/l |
| Sisäinenpurkausvirta | 0,3-2,5 % kuukausi |
| Hyötysuhde | 85-95 % |
| Toimintalämpötila | -20~60 °C |
| Hinta per kwh | 400-500 € |

Litium kuten muutkin alkalimetallit reagoivat vahvasti veden kanssa ja tuottavat reaktiossa paljon lämpöä ja vetykaasua. Alkalimetallit reagoivat helposti ilmassa olevan kosteuden kanssa. Tämän takia litiumioniakku on rakennettu vesitiiviiksi. Akun rakenteellinen vaurio voi altistaa litiumin vedelle ja kosteudelle luoden näin palo- ja räjähdysvaaran. Akku kestää huonosti syväpurkausta ja pitkäkestoista nimelliskapasiteettia. Näin ollen akun lataustason pitäisi pysyä 20–80 % sisällä. Akun elinikä riippuu latauskertojen määrästä ja suositellun lataustason pitävyydestä. Tyypillisesti akku kestää 2000–3000 latauskertaa. Ladatessa litiumioniakku kasvattaa kristallimaista rakennetta, joka muodostuu positiiviselle elektrodinpinnalle. Tämä johtuu siitä, että litiumionit pyrkivät kosketuksiin elektrodin kanssa lyhyimmän sähköisen reitin kautta, jolloin litiumionit kasautuvat päällekkäin muodostaen ”vuoren”, joka vetää puoleensa yhä enemmän litiumioneja. Lopulta kristalli kasvaa liian suureksi ja koskettaa negatiivista elektrodia ja aiheuttaa oikosulun elektrodien välille, josta syntyy palo- ja räjähdysvaara. Tutkijat kehittelevät mekaanisia erottimia elektrodien välille, kristallien kosketuksen ja oikosulun estämiseksi. Erityyppisten elektrolyyttien käyttäminen on myös havaittu estävän kristallien kasvua. (Lithium-ion battery, n.d., Wikipedia; RF wireless world)

2.2 Natriumioniakku

Natriumioniakun toiminta ja rakenne on sama kuin litiumioniakulla, mutta litium on korvattu natriumilla. Alla oleva kuva (Kuva 2) havainnoi natriumioniakun toimintaa.

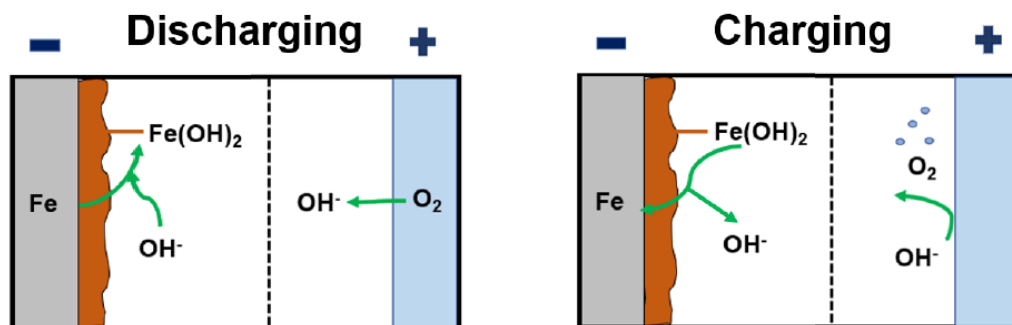


Kuva 2. Natriumioniakku havainnekuva (Peña, Peters & Weil, 2019)

Natriumia on runsaasti saatavissa merivedestä, kun taas litiumia, jonka rikasteaste on tarpeeksi suuri kannattavalle kaivostoiminnalle, on niukasti. Natrium- ja litiumioniakun kehittäminen alkoi samoihin aikoihin ja kilpailivat keskenään, mutta natriumioniakun sulasuolarakenteen vaatiman korkean lämpötilan takia (350°C), se hävisi suosiossa litiumioniakulle. Huoneenlämpöinen natriumioniakku on kehitteillä ja sen teoreettinen energiatiheys on $250\text{--}375\text{ Wh/l}$. Natriumioniakun pienemmän energiatiheyden vuoksi, sen käyttäminen käsikäyttöisissä ja liikuteltavissa laitteissa ei ole järkevää, mutta akkua voidaan käyttää lyhyenmatkan sähköautoissa ja sähköverkon energiavarastona. Kehitteillä olevan natriumioniakun hinta ei eroa paljoakaan litiumioniakusta, koska tuotannossa säästöä tuo vain natriumin halpa hinta, jolloin natriumioniakku olisi vain $10\text{--}15\%$ halvempi, kuin litiumioniakku. Natriumioniakun hyötysuhde on jopa 92% . (Sodium-ion battery, n.d., Wikipedia)

2.3 Ruosteakku

Ruosteakun toiminta perustuu happi-ionin elektronin vaihtoon raudan kanssa. Akku rakentuu anodista, joka on rautaa, ja katodista, joka on ilmaa hengittävämateriaali. Akun elektrolyytinä toimii palamaton vesiliuos. Akkua purettaessa katodin läpivirtaava ilmamehän happi kulkeutuu elektrolyytin kautta rauta anodille, jossa se hapettaa raudan ja irrottaa raudasta vapaan elektronin, joka palaa katodille elektrodeja yhdistävän johteen kautta. Akkua ladatessa käänteinen virransuunta pelkistää raudan. Alla oleva kuva (Kuva 3) havainnoi akuntoimintaa.

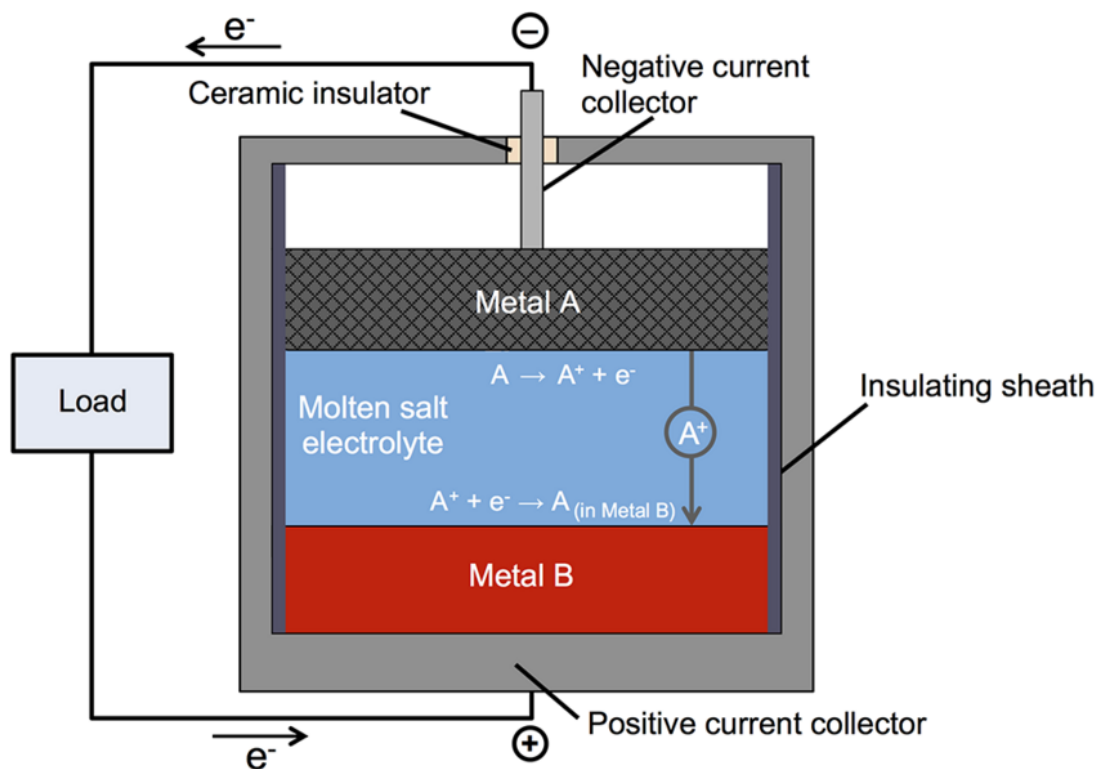


Kuva 3. Ruosteakku havainnekuva (Martin, 2021)

Akun energiatiheys on 764 Wh/kg, kun taas litiumioniakun on 100–256 Wh/kg. Tämä ero johtuu siitä, että litiumioniakku vaatii tilavuutta litiumionin varastointiin elektrodille, kun taas ruosteakku vaatii pinta-alaa ruosteen muodostumiselle. Ruosteakun materiaalikustannusten takia, kehittäjät uskovat akun saavuttavan 20 €/kWh hintatasoa, joka on vain kymmenesosa litiumioniakun hinnasta. Ruosteakun hyötysuhteen on arvioitu yltävän jopa 80 % ja latauskertojen määrän 2000–5000 kertaan. Kyseisellä akulla on kuitenkin hidas purkaus aika ja akku on yleisesti iso ja painava. Tästä johtuen ruosteakku soveltuu vain sähköverkon energiavarastoksi. (Ferrel, 2021, Undecidedmf; Fitzsimmons ym., 2021, Clearpath; Martin, 2021, Motorbiscuit; Nerderly, 2021, Dug)

2.4 Nestemetalliakku

Nestemetalliakut perustuvat eri nestemäisten metallien väliseen ioninvaihtoon. Nestemetalliakku on rakennettu keraamisesti lämpöeristetyistä astiasta, joka on täytetty kalsiumilla, kalsiumsuolaelektrolyytillä ja antimonilla. Akun käyttöönotto vaatii akun lämmittämisen 500°C, jotta metallit sulavat. Metallien tiheyseron vuoksi ne erkanevat ja muodostavat kerroksia. Akun lataaminen ja purkaminen tuottaa lämpöä, jonka avulla metallit pysyvät nestemäisinä. Alla oleva kuva (Kuva 4) esittää akun rakennetta.

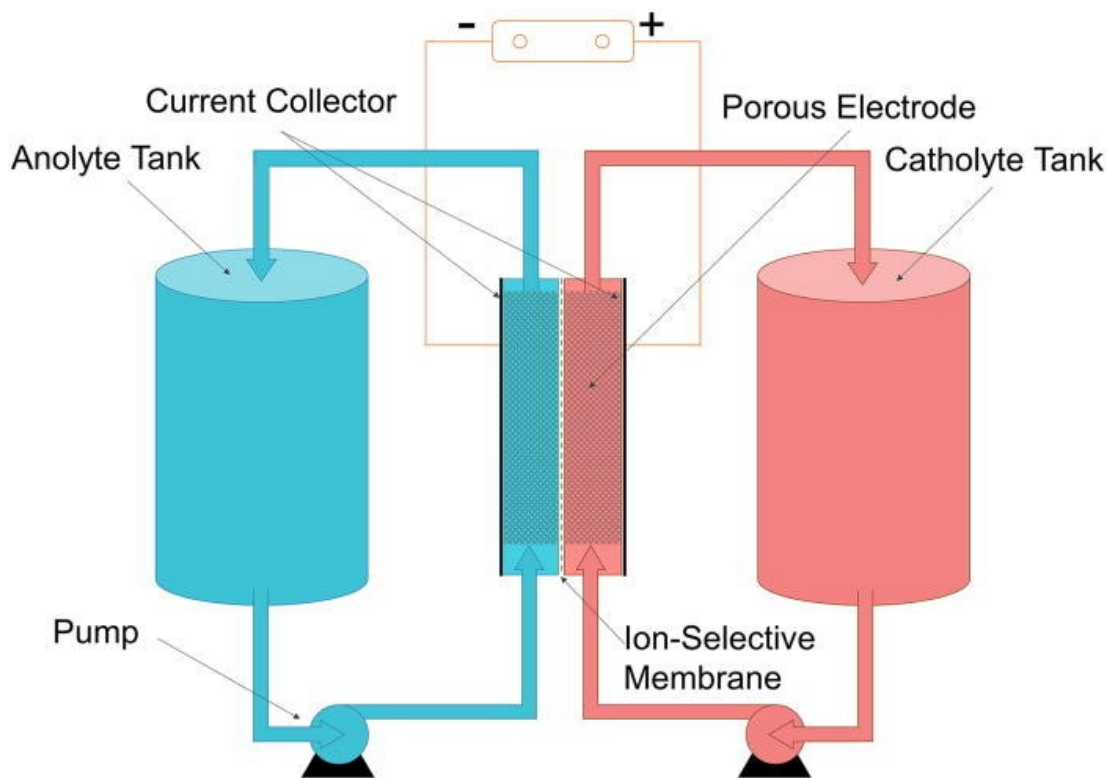


Kuva 4. Nestemetalliakku rakennekuva (Stauffer, 2016)

Akku on tarkoitettu päivittäiseen lataamiseen ja purkamiseen. Akku säilyttää latauksen, vain vähän aikaa, koska muuten akku jäähtyy ja metallit kiinteytyvät. Akku menettää latauksensa, kun nestekerrokset sekoittuvat ulkoisesta mekaanisesta sekoituksesta. Kerrosten sekoittumisesta johtuva oikosulku ei aiheuta liian suurta lämpötilaa keraamiselle astialle ja kerrokset erkanevat takaisin omille paikoilleen. Akun hyötysuhteeksi ilmoitetaan 80 %. Akun nestemäisen luonteen vuoksi, akkuun ei muodostu kiinteitä kristallimuodostumia, ja akkuun ei myöskään jää sekoittuneita jäämiä. Akun eliniäksi arvioidaan 20 vuotta ja kapasiteetin laskevan 5–10 % tuona aikana. Akun valmistaminen on yksinkertaista ja akussa käytettävät metallit ovat halpoja ja paljon saatavilla. Akun haittoihin kuuluu käytettävien metallien syövyttävyys ja akun nestemäisen luonteen vuoksi, suuri sisäinen purkausvirta. Akku soveltuu ison skaalan energian varastointiin, mutta vain lyhytaikaiseen latauksen pitämiseen. Akun hinnan arvioidaan putoavan ajan myötä 20 €/kWh. (Ambri, n.d., The Ambri technology; Ferrel, 2021, Undecidedmf; Stauffer, 2016, Mit News)

2.5 Redox-virtausakku

Redox-virtausakun toiminta perustuu kahden eri nesteeseen liuotetun aineen väliseen ionin vaihtoon. Akkukkenno rakentuu kahdesta virtauspuolesta, joita erottaa kalvo, joka sallii ionien vaihdon puolten kesken. Molempien virtauspuolten sisällä on huokoinen elektrodi. Molemmille nesteille on oma säiliö ja kiertopumppu. Akkua purettaessa negatiivinen liuos luovuttaa elektronin positiiviselle liukselle elektrodien välisen johdeyhityksen kautta. Negatiivinen liuos luovuttaa myös positiivisen ionin kalvon läpi positiiviselle liukselle, näin säilyttäen elektronitasapainon. Akun lataaminen kääntää prosessin toisinpäin. Alla oleva kuva (Kuva 5) havainnoi redox-virtausakun rakennetta.



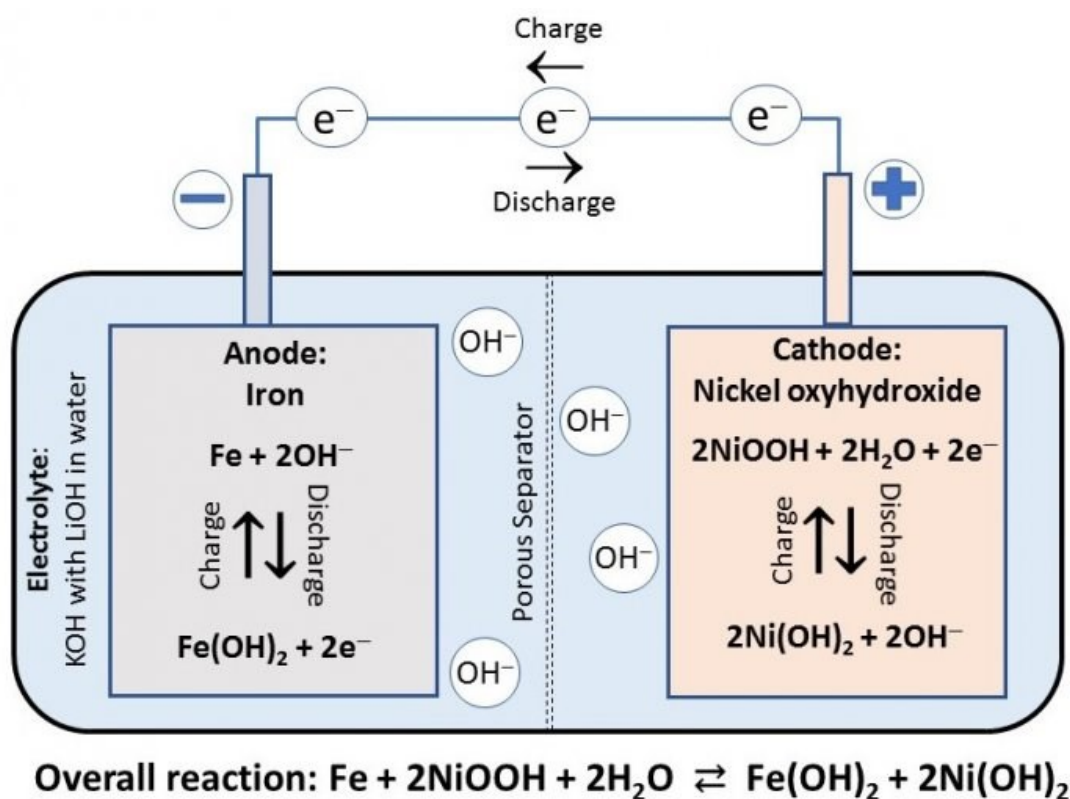
Kuva 5. Redox-virtausakku rakennekuva (Koenig & Qi, 2017)

Uuden aineparin (rautasulfidi ja antrakiniidisulfonihappo) materiaalikustannuksen avulla akun hinta olisi 60 € / kWh, joka on puolet halvempi, kuin vanadium pohjaisen liuoksen hinta. Toisin kuin uusi ainepari, vanadium on myrkyllistä. Myös vesipohjaisia liuotainaineita on testattu, jolloin ei tarvitsisi käyttää happoliuotinta. Redox-virtausakun liuosten sekoittuminen ei aiheuta palo-, tai räjähdysvaaraa. Akun energiakapasiteetti riippuu liuossäiliöiden kapasiteetista, kun taas akun nimellisvirta riippuu elektrodien pinta-alasta. Liuosten sisäinen purkausvirta on lähes olematonta, jolloin energiaa

voidaan säilöä pitkiä aikoja. Akun hyötysuhde on jonkin verran muita akkuja pienempi 70–80 %. Akun elinikä on jopa 15 vuotta. Akun lataus- ja purkausvirta on pieni ja vaatii suuren kennorakennelman vastatakseen muita akkuja. Akku voidaan ladata nopeasti vaihtamalla liuosnesteet. Kenno ja säiliöt ovat erillään, jolloin säiliöt voidaan sijoittaa etäälle kennosta. Akun energiatiheys on pieni (30Wh/l), ja vastatakseen muita akkuja, liuossäiliöiden täytyy olla suuret. (Flow battery, n.d., Wikipedia; Koenig & Qi, 2017, AVS.)

2.6 Nikkeli-rauta-akku

Nikkeli-rauta-akku tunnetaan, myös nimellä leipeäakku. Akun toiminta perustuu hapen vaihtokiertoon elektrodien välillä. Akku rakentuu positiivisista nikkelioksidivetyoksidin ja negatiivisista rautalevyistä, sekä kaliumvetyoksidin elektrolyytistä. Kemiallisen reaktion pääkomponentit, ovat nikkeli päällysteisten teräsputkien sisällä. Alla oleva kuva (Kuva 6) havainnoi nikkeli-rauta-akun toimintaa.



Kuva 6. Nikkeli-rauta-akku toiminta havainnekuva (Narayan, n.d.)

Akku kestää ylilatausta, ylipurkausta ja oikosulkuja. Akkua käytetään varavirtalähteenä, jossa sitä voidaan pitää koko aika latauksessa. Huonon energiatihedden (30Wh/l) ja korkean valmistushinnan (1,3–6 €/Wh) takia, muut ladattavat akut, ovat korvanneet nikkeli-rauta-akun. Alla oleva taulukko (Taulukko 2) sisältää nikkeli-rauta-akun ominaisuuksia.

Taulukko 2. Nikkeli-rauta-akun ominaisuuksia

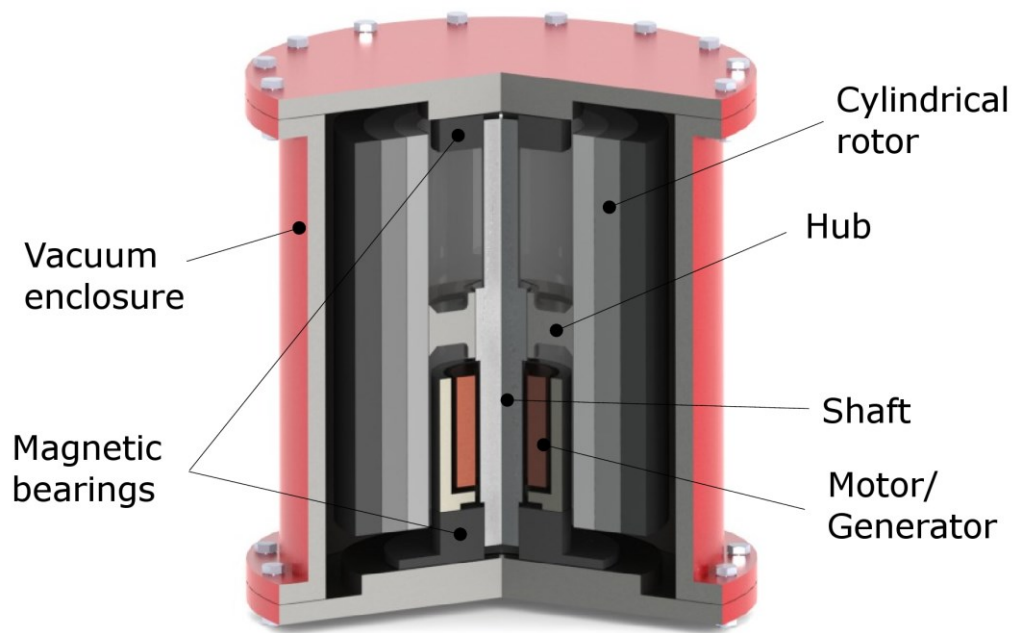
| | |
|-----------------------|------------------|
| Hyötysuhde | 65 % |
| Toimintalämpötila | -30-60 °C |
| sisäinen purkausvirta | 20-30 % kuukausi |

Akku ei sisällä lyijyä tai kadmiumia, jolloin se ei vaadi vaarallisen jätteen käsittelyä. Akulla on pitkä elinikä (30–50 vuotta) ja vaatii huoltotoimenpiteenä pohjalle muodostavan sakan poiston ja elektrolyytin vaihtamisen. (Nickel-iron battery, n.d., Wikipedia; Santini, 2017, Rainbow power company; Santini, 2020, Frontiersin)

3 MEKAANISET AKUT

3.1 Vauhtipyöräakku

Vauhtipyöräakkuun perustuva energian varastointi perustuu pyörivän massan inertiaan, eli kykyyn vastustaa muutosta. Nykyään vauhtipyöräakun rakenteessa hyödynnetään tyhjiö- ja magneettilaakeri teknologiaa, joiden avulla hyötysuhdetta ja varastointiaikaa saadaan tehostettua. Vauhtipyöräakun rakenne koostuu lieriöstä, jossa on paljon massaa, joka lepää magneettilaakerien päällä. Massalieriö on tyhjiörakenteen sisällä ja se on yhdistetty moottori-generaattoriin. Alla oleva kuva (Kuva 7) havainnoi vauhtipyöräakun rakennetta.



Kuva 7. Vauhtipyöräakku rakennekuva (Pjrensburg, 2012)

Vauhtipyörän kierrosnopeutta voidaan lisätä moottorin avulla, jolloin energiaa varastoituu pyörivään massaan. Kun generaattori kytketään päälle, sen aiheuttama kuorma hidastaa pyörivää massaa ja energiaa siirtyy pyörivästä massasta sähköenergiaksi. Liian korkea kierrosnopeus rikkoo pyörivän massan ja nopeasti liikkuvat, kevyetkin kappaleet voivat läpäistä ja sinkoutua tyhjiörakenteen läpi. Vauhtipyöriä on kahta tyyppiä, suurimassaiset ja kevyet suurinopeuksiset. Kaavan $E = \frac{1}{2}I\omega^2$ mukaan nopeuden kasvattaminen sitoo enemmän energiaa, kuin massan kasvattaminen. Suurimassaiset ja hitaasti (10 000 rpm) pyörivät vauhtipyörät on valmistettu teräksestä, kun taas kevyet suurinopeuksiset (100 000 rpm) vauhtipyörät on valmistettu hiilikuidusta, joka kestää paremmin suuren nopeuden aiheuttaman voiman. Vauhtipyörällä on nopea taajuusvaste, joka tarkoittaa, että se vastaa nopeasti sähköverkon muutokseen. Alla oleva taulukko (Taulukko 3) sisältää vauhtipyöräakun ominaisuuksia.

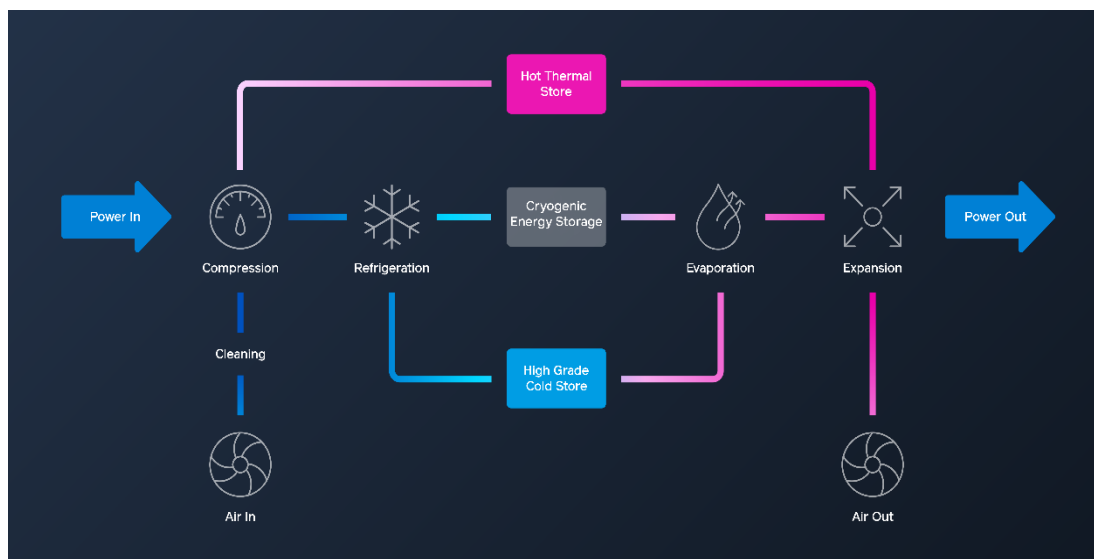
Taulukko 3. Vauhtipyöräakun ominaisuuksia

| | |
|---------------|-----------|
| Energiatiheys | 200 Wh/kg |
| Hyötysuhde | 95 % |
| Elinikä | 20 vuotta |

Vauhtipyöräakun asennus kustannus on 1300–5300 € / kWh, mutta hintojen arvellaan putoavan 1000–3400 € / kWh vuoteen 2030 mennessä. Vauhtipyörän käyttökohteita ovat mm. sähköverkon energiavarasto, lyhyenmatkan liikennevälineet ja mekaaninen energianvarasto. Rakentamiseen käytetyt materiaalit ovat kierrätettävissä. (Ferrel, 2021, Undecidedmf; Flywheel energy storage, n.d., Wikipedia; Flywheel storage power system, n.d., Wikipedia)

3.2 Nesteilma-akku

Nesteilma-akun toiminta perustuu ilman ja kaasuuntuvan, nesteytetyn ilman paineeroon. Nesteilma-akku rakentuu kolmesta komponentista, nesteyttäjistä, nesteen varastointisäiliöstä ja turbiinigeneraattorista. Tämän lisäksi järjestelmään voidaan lisätä lämmön ja kylmän talteenotto, jota syntyy prosessin erivaiheissa ja näin parantaen järjestelmän tehokkuutta ja hyötysuhdetta. Energiaa sidottaessa nesteyttäjää jäähdyyttää ilmaa, kunnes se nesteytyy, jonka jälkeen neste varastoidaan eristettyihin matalapainesäiliöihin. Energiaa purettaessa nestettä syötetään lämmittimen läpi, joka saa nesteen kaasuuntumaan. Tämä paineistuva kaasu syötetään turbiinin läpi ja vapautuu takaisin ilmakehään. Alla oleva kuva (Kuva 8) havainnoi nesteilma-akun toimintaa.



Kuva 8. Nesteilma-akun toiminta havainnekuva (Highviewpower, n.d.)

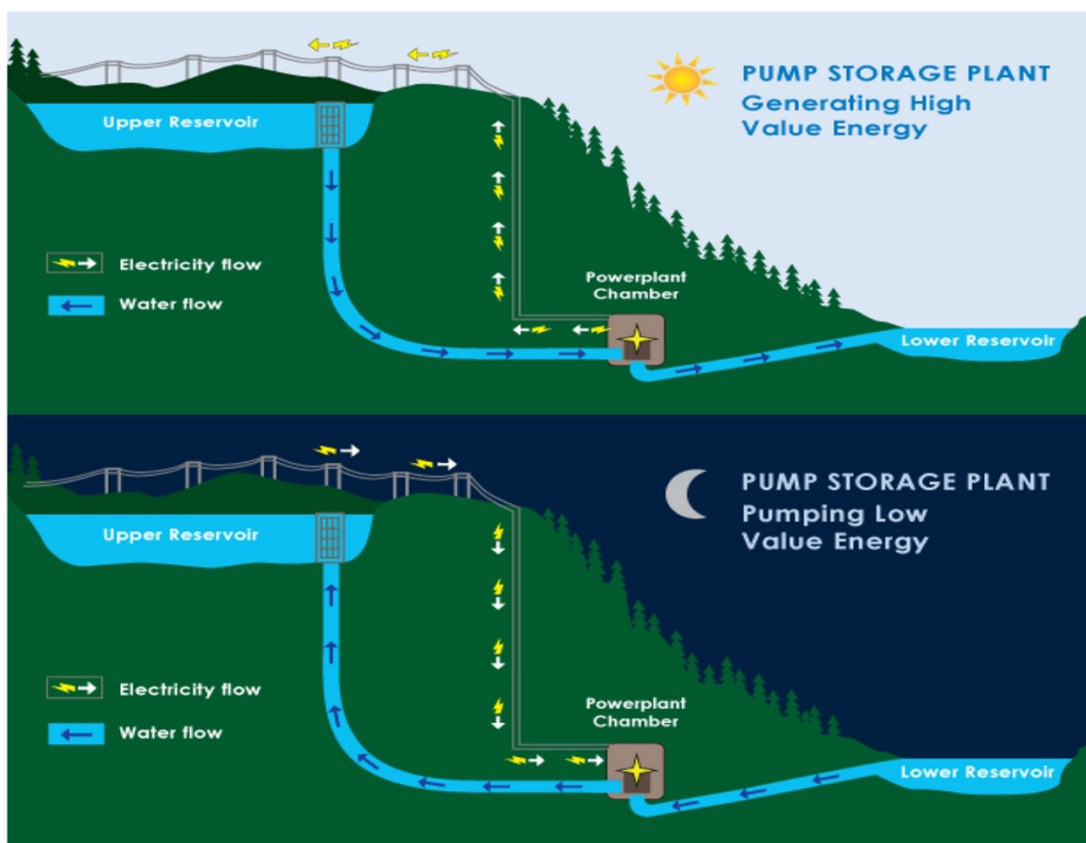
Hyötysuhteeksi ilmoitetaan 25–70 % riippuen lämmön ja kylmän talteenotosta. Nesteilma-akku soveltuu vain sähköverkon energiavarastoksi. Rakennuskustannukseksi ilmoitetaan 250–500 €/kWh. (Ferrel, 2020, Undecidedmf; Highviewpower, n.d.)

3.3 Painovoima-akku

Painovoima-akkujen toiminta perustuu painovoimaiseen potentiaalieroon, jossa kiinteää massaa nostetaan, tai nestettä pumpataan ylemmälle tasolle.

3.3.1 Nestepainovoima-akku

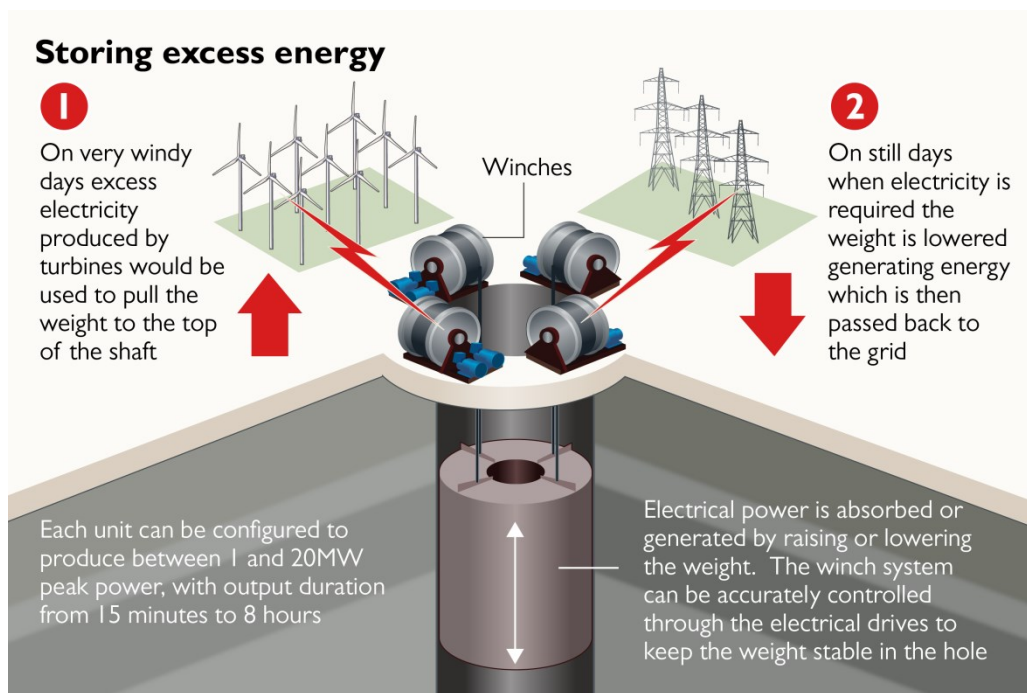
Nestepainovoima-akku on yleensä rakennettu maantieteellisesti sille otolliselle paikalle, kuten padot tai juottoaltaat. Maantieteellisen vaatimuksen vuoksi nesteen siirtoon perustuvia painovoima-akkuja on vähän, ja niiden rakentaminen on kallista. Energiaa sidottaessa nestettä pumpataan alemmalta tasolta ylemmälle tasolle ja energiaa purettaessa neste syötetään turbiinin läpi. Nestepainovoima-akun hyötysuhde on 80 %. Rakennus kustannukseksi ilmoitetaan 145 €/kWh. Alla oleva kuva (Kuva 9) havainnoi nestepohjaisen painovoima-akun toimintaa. (Ietresearch, 2018)



Kuva 9. Nestepohjainen painovoima-akku havainnekuva (Ietresearch, 2018)

3.3.2 Kiinteämassaiset painovoima-akut

Kiinteämassaisia painovoima-akkuja voidaan hyödyntää mäissä ja korkeissa pudotuksissa, kuten korkeat rakennukset ja porauskuilut. Mäkeen rakennettu painovoima-akku on yleensä rakennettu mäkeä myötäilevästä ratakiskosta ja vanhoista malmivaunuista, jotka on täytetty kivillä. Energiaa sidottaessa vaunuja hinataan vaijerilla mäkeä ylöspäin ja energiaa purettaessa vaunuja luisutetaan takaisin mäkeä alas. Vaijerin pää on kiinnitetty moottori-generaattoriin, jolla vaunuja hinataan ja luisutetaan. Korkea pudotteisissa painovoima-akuissa on sama periaate kuin mäkeen rakennetussa, mutta malmivaunun sijaan vaijeri on kiinnitetty massaun, joka on muodoltaan käytännöllinen kuiluun, tai rakennuksen seinälle. Hyötysuhteeksi ilmoitetaan 80 %. Rakennus kustannusta per kWh ei ole ilmoitettu. Alla oleva kuva (Kuva 10) havainnoi kiinteämassaisen painovoima-akun toimintaa. (Gravitricity, n.d.; Gravity battery, n.d., Wikipedia)



Kuva 10. Kiinteämassainen painovoima-akku havainnekuva (Camerson, 2018)

4 TEKNIKOIDEN VERTAILU

Työssä käsitellyistä sähkön varastointi tekniikoista, litiumioniakku on tällä hetkellä kustannustehokkain ratkaisu.

Natriumioniakku on vielä kehitysvaiheessa, mutta jos tutkijat onnistuvat tuomaan markkinoille huoneenlämmössä toimivan natriumioniakun, olisi se suorassa markkinakilpailussa litiumioniakun kanssa.

Ruosteakku on vaihtoehtoinen akku sähköverkon energiavarastoksi, vaikkakin se on vielä kehitysvaiheessa ja sen lataus- ja purkausvirta on pieni.

Nestemetalliakku on lupaava tekniikka sähköverkon energiavarastoksi, mikäli akun kehittäjät onnistuvat tuomaan markkinoille kilpailukykyisen tuotteen.

Redox-virtausakku on vielä kehitysvaiheessa, mutta se on lupaava kilpailija litiumioniakulle, vaikkakin sen energiatiheys on pienempi ja se ei sovellu pieniin ja käsikäyttöisiin laitteisiin. Akun nopea lataaminen elektrolyytinesteiden vaihtamisella, voi johtaa sen laajempaan käyttöön sähköautoissa, vaikkakin sähköautoissa jo käytettyjen akkujen latausajat ovat nopeita ja nopeutuvat tekniikan kehittyessä.

Nikkelirauta-akun huono hyötysuhde ja kallis hinta on poistanut sen suosiota ja se on korvattu muilla akuilla.

Vauhtipyöräakku käyttää nykyisin yksinkertaista tekniikkaa, mutta rakennuskustannuksiltaan se ei ole kilpailukykyinen.

Nesteilma-akun hyötysuhde on huono, mikäli prosessin tuottamaa kuumaa ja kylmää ei pystytä käyttämään hyödyksi. Aloituskustannus on suuri tarvittavien laitteistojen takia.

Painovoima-akkujen rakennuskustannukset ovat suuret. Nestepainovoima-akkujen vaatima maantieteellinen sijainti ja sille tarvittavan rakennusluvan hankkiminen on

hankalaa. Kiinteä massaiset painovoima-akut ovat vielä kehitysasteella ja ne eivät ole vielä kilpailukykyisiä.

Alla olevaan taulukkoon (Taulukko 4) on koottu akkujen arvoja vertailua varten.

Taulukko 4. Akkujen arvoja

| | kWh hinta € | Energiatiheys |
|----------------------------------|-------------|----------------------------|
| Litiumioniakku | 400-500 | 250-690 Wh/l 100-256 Wh/kg |
| Natriumioniakku | | 250-375 Wh/l |
| Ruosteakku | | 764 Wh/kg |
| Nestemetalliakku | | |
| Redox-virtausakku | 73 | |
| Nikkeli-rauta-akku | 130-600 | 30 Wh/l |
| Vauhtipyöräakku | 1300-5300 | 200 Wh/kg |
| Nesteilma-akku | 250-500 | |
| Nestepainovoima-akku | 145 | |
| Kiinteämassaiset painovoima-akut | | |

| | Hyötysuhde % | Sisäinen purkausvirta % kuukausi |
|----------------------------------|--------------|----------------------------------|
| Litiumioniakku | 85-95 | 0,3-2,5 |
| Natriumioniakku | 92 | |
| Ruosteakku | 80 | |
| Nestemetalliakku | 80 | |
| Redox-virtausakku | 70-80 | |
| Nikkeli-rauta-akku | 65 | 20-30 |
| Vauhtipyöräakku | 95 | |
| Nesteilma-akku | 25-70 | |
| Nestepainovoima-akku | 80 | |
| Kiinteämassaiset painovoima-akut | 80 | |

5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Näyttää siltä, että litiumioniakku säilyttää markkinajohtonsa. Natriumioniakku on lupaava kilpailija litiumioniakulle, mikäli tekniikan kehittäjät onnistuvat tuomaan markkinoille kilpailukykyisen tuotteen. Nestemetalliakku voi lyödä itsensä läpi suuren skaalan sähköverkon energiavarastona, mikäli kehittäjät onnistuvat tuomaan markkinoille kilpailukykyisen tuotteen. Redox-virtausakku on lupaava tekniikka

sähköverkon, kuin myös yritysten ja koti talouksien energiavarastoksi. Akun nopea lataaminen elektrolyytinesteiden vaihtamisella tuo uusia mahdollisuuksia akun käyttämiselle. Vaikkakin akkujen ja uusiutuvien energialähteiden käyttämisen kasvu on hyvä suunta, on akkujen kierrätystekniikka vielä kustannuksiltaan tappiollista, ja suurin osa materiaalista päätyy kaatopaikalle. Akkumateriaalien kaivamiseen käytetyt tavat köyhissä maissa ovat moraalisesti vaikeita. Tämän työn tavoitteena oli tuoda tietoa ja vertailukelpoisia tuloksia erilaisista sähkön varastointitekniikoista. Tähän tavoitteeseen päästiin tuomalla esiin tietoa valittujen sähkön varastointitekniikoiden toimintaperiaatteista, rakenteista ja ominaisuuksista. Esitettyjen tietojen ja tulosten perusteella työn lukijalle muodostuu käsitys erilaisten sähkön varastointitekniikoiden soveltuvuuksista erilaisiin käyttötarkoituksiin. Työ oli rajattu kemiallisten akkujen osalta akkuihin, joiden käyttö ja tutkimus suosio oli kasvussa. Työtä olisi mahdollista laajentaa pois rajatuilla kemiallisilla-akuilla, mutta kemiallistenakkujen kirjo on iso, ja suurin osa niistä ei ole ominaisuusarvoiltaan vakuuttavia.

LÄHTEET

Advantages and Disadvantages of Lithium Ion Battery. (n.d.). RF wireless world.
<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-Lithium-Ion-Battery.html>

Ambri. (n.d.). The Ambri technology. Haettu 17.11.2021 osoitteesta
<https://ambri.com/technology/>

Camerson, G. 2018. Funding gives weight to gravitricity's idea for storing energy. The Times.
<https://www.thetimes.co.uk/article/funding-gives-weight-to-gravitricity-s-idea-for-storing-energy-jqjnlxchn>

Ferrel, M. 2020. Liquid air battery explained - the end of lithium ion batteries. Undecidedmf.
<https://undecidedmf.com/episodes/liquid-air-battery-explained-the-end-of-lithium-ion-batteries>

Ferrel, M. 2021. The mechanical battery explained - A flywheel comeback. Undecidedmf.
<https://undecidedmf.com/episodes/the-mechanical-battery-explained-a-flywheel-comeback>

Ferrel, M. 2021. Hot energy storage liquid metal battery explained. Undecidedmf.
<https://undecidedmf.com/episodes/hot-energy-storage-liquid-metal-battery-explained>

Ferrel, M. 2021. Why rust batteries may be the future of energy iron air battery technology. Undecidedmf.
<https://undecidedmf.com/episodes/why-rust-batteries-may-be-the-future-of-energy-iron-air-battery-technology#fn1-23102>

Fitzsimmons, A. Powell, R. Mitch, K. 2021. A reversible rust battery that could transform energy storage. Clearpath.
<https://clearpath.org/our-take/a-reversible-rust-battery-that-could-transform-energy-storage/>

Flow battery. (n.d.). Wikipedia. Haettu 19.11.2021 osoitteesta
https://en.wikipedia.org/wiki/Flow_battery

Flywheel energy storage. (n.d.). Wikipedia. Haettu 19.11.2021 osoitteesta
https://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel_energy_storage

Flywheel storage power system. (n.d.). Wikipedia. Haettu 19.11.2021 osoitteesta
https://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel_storage_power_system

Gravitricity. (n.d.). Fast, long-life energy storage. Haettu 18.11.2021 osoitteesta
<https://gravitricity.com/technology/>

Gravity battery. (n.d.). Wikipedia. Haettu 18.11.2021 osoitteesta
https://en.wikipedia.org/wiki/Gravity_battery

Highviewpower. (n.d.). Mission possible: A world powered by 100% renewable energy. Haettu 17.11.2021 osoitteesta
<https://highviewpower.com/>

Highviewpower. (n.d.). The process. Haettu 17.11.2021 osoitteesta
<https://highviewpower.com/technology/>

Koenig, G., Qi, Z. 2017. Flow battery systems with solid electroactive materials. AVS.
<https://avs.scitation.org/doi/10.1116/1.4983210>

Lithium-ion battery. (n.d.). Wikipedia. Haettu 15.11.2021 osoitteesta
https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery

Martin, T. 2021. Here's how iron air batteries 1-up-lithium-ion batteries. Motorbiscuit.
<https://www.motorbiscuit.com/heres-how-iron-air-batteries-1-up-lithium-ion-batteries/>

Narayan, S. (n.d.). Nickel-iron batteries. Dornsife. Haettu 21.11.2021 osoitteesta
<https://dornsife.usc.edu/labs/narayan/nickel-iron-batteries/>

Nerdery. 2021. Rust has a surprising use in energy storage. Dug.
<https://dug.com/rust-has-a-surprising-use-in-energy-storage/>

Nickel-iron battery (n.d.). Wikipedia. Haettu 20.11.2021 osoitteesta
https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93iron_battery

Peña, C., Peters, J., Weil, M. Exploring the Economic Potential of Sodium-Ion Batteries. *Batteries* 2019, 5, 10.
<https://doi.org/10.3390/batteries5010010>

Pjrensburg, 2012. Sectional view of a flywheel storage with magnetic bearings and evacuated housing. Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel_storage_power_system#/media/File:Example_of_cylindrical_flywheel_rotor_assembly.png

Poulomi, R., Srivastava, S. Nanostructured anode materials for lithium ion batteries. *J. Mater. Chem. A* 2015, 3, 2454–2484.
<https://dx.doi.org/10.1039/C4TA04980B>

Pumped energy storage system technology and its AC-DC interface topology, modeling and control analysis: a review. 2018. Ietresearch.
<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/joe.2018.8379>

Santini, M. 2017. Disadvantages of nickel iron batteries. Rainbow power company.
<https://www.rpc.com.au/solar-news/disadvantages-of-nickel-iron-batteries.html>

Santini, M. 2020. Characterisation of a nickel-iron battery, an integrated battery and electrolyser. *Frontiersin*.

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2020.509052/full>

Sodium-ion battery. (n.d.). Wikipedia. Haettu 15.11.2021 osoitteesta
https://en.wikipedia.org/wiki/Sodium-ion_battery

Stauffer, N. 2016. A battery made of molten metals. Mit News.
<https://news.mit.edu/2016/battery-molten-metals-0112>