



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Uudet akkuteknologiat

Antti Lumiaho

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Uudet akkuteknologiat

Antti Lumiaho

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2023, 36 s. + 1 liitettä

Työn ohjaaja yliopistolla: Yrjö Louhisalmi

Maailma kaipaa uusia ratkaisuja energian varastointiin kotitalouksissa käytettävien laitteiden ja erityisesti liikenteen sähköistymisen vuoksi. Akut mahdollistavat nämä tulevaisuuden uudenlaiset sähköjärjestelmät ja liikenteen sähköistämisen. Aurinkopaneeleilla tuotettu sähkö voidaan varastoida akkuihin, josta sitä voidaan käyttää tarpeen mukaan uudelleen. Suorituskykyisempi sähköautojen akku lisää niiden toimintamatkaa huomattavasti, joka taas puolestaan mahdollistaa liikenteen sähköistymisen parantumisen. Tässä kirjallisuuskatsauksena toteutetussa kandidaatintyössä tutustutaan akkuteknologiaan nykypäivänä sekä käydään läpi tulevaisuudessa varteenotettavia akkuteknologioita ja akkuteknillisiä ratkaisuja.

Akun toimintaan liittyy monenlaisia sähkökemiallisiin reaktioihin liittyviä periaatteita ja käsitteitä. Työn alussa käydään läpi akun toimintaperiaatteita ja lisäksi käydään läpi keskeiset akkuun liittyvät käsitteet. Akut ovat hyvin kehittyneet vuosien saatossa ja nykypäivänä on käytössä monenlaisia akkukemioita kuluttajien käyttöön. Nykypäivän tarpeisiin on kehitteillä varteenotettavia akkuteknologioita, jotka ovat tehokkaampia, turvallisempia, kevyempiä ja ympäristöystävällisempiä kuin nykypäivänä käytetyt akkuteknologiat. Akkuteknologioiden kehittäminen on hidas ja työläs prosessi. Yritykset ja tutkijat ovat kehittäneet uusia akkuteknologioita, ja niitä on lähitulevaisuudessa käytössä liikenteen sähköistämisessä. Uudet akkuteknologiat yhdistävät monenlaisia ratkaisuja parantaakseen akkujen toimintaa ja tehokkuutta.

Asiasanat: Akku, Akkuteknologia, Akkukemio

ABSTRACT

New battery technologies

Antti Lumiaho

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2023, 36 pp. + 1 Appendix

Supervisor at the university: Yrjö Louhisalmi

The world needs new solutions for energy storage due to appliances used in households and the electrification of transportation. The batteries will enable these new electricity systems of the future and the electrification of transport. The electricity produced by solar panels can be stored in batteries from which it can be reused as necessary. The more efficient battery of electric vehicles increases their range which in turn enables the electrification of transport to improve. This Bachelor's thesis as a literature review explores battery technology today and explores the major battery technologies and battery technology solutions in the future.

Many principles and concepts are related to the electrochemical reactions involved in battery operation. The thesis begins by reviewing the operating principles of batteries and key battery-related concepts. The batteries have developed significantly over the years, and today there are various battery chemistries available for consumer use. Promising battery technologies are being developed to meet today's needs and they are more efficient, safer, lighter, and environmentally friendly than the currently used battery technologies. The development of battery technologies is a slow and laborious process. Companies and researchers have developed new battery technologies that will soon be used in the electrification of transportation. These new battery technologies combine various solutions to improve battery performance and efficiency.

Keywords: Battery, Battery technology, Battery cell

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto	6
2 Akkujen toimintaperiaate	7
2.1 Normaalipotentialit ja hapetusluku	9
2.2 Akkuihin liittyviä käsitteitä.....	12
2.3 Akkujen kennotyypit.....	13
2.3.1 Sylinterikenno.....	14
2.3.2 Prismaattinen kenno.....	14
2.3.3 Pussikenno	15
3 Akkuteknologiat nykypäivänä	16
3.1 Lyijyakku	16
3.2 Nikkeli-kadmiumakku (NiCd)	17
3.3 Nikkeli-metallihydridiakku (NiMH).....	17
3.4 Litiumioniakut (Li-ion)	18
3.5 Nykypäivän akkuteknologioiden vertailua	19
4 Uuden sukupolven akkuteknologiat.....	21
4.1 Solid-state -akut	21
4.2 Litium-rikkiakku (Li-S)	24
4.3 Litium-ilma-akku (Li-air).....	25
5 Uusia akkuratkaisuja	28
5.1 Sylinterimäinen 4680-kennoinen akku	28
5.2 Gemini-akku.....	29
6 Yhteenveto	31

LÄHDELUETTELO

LIITE:

Liite 1. Normaalipotentialien arvoja standardiolosuhteissa.

MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	Ampeeri, sähkövirran tunnus
AGM	Absorbent Glass Mat
Ah	Ampeeritunti, akun kapasiteetin mittari
Anodi	Negatiivinen elektrodi
Elektrodi	Akun navat, joihin johtimet kytketään
E^0	Normaalipotentialin arvo
Ioni	Sähköisesti varautunut atomi tai molekyyli
Isolaattori	Erotin, joka ei johda sähköä, mutta päästää ionien kulkemisen läpi
Katodi	Positiivinen elektrodi
Katalyytti	Aine, joka nopeuttaa kemiallista reaktiota kulumatta itse reaktiossa
Kg	Massa kilogrammoina
LCO	Litium-kobolttioksidiakku
LFP	Litium-rautafosfaattiakku
Li-air	Litium-ilma-akku
Li-ion	Litiumioniakku
Li-S	Litium-rikkiakku
LMO	Litium-mangaanioksidiakku
LTO	Litium-titantaattiakku
NCA	Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidiakku
NHE	Normaalivetyelektrodi
NiCd	Nikkeli-kadmiumakku
NiMH	Nikkeli-metallihydridiakku
NMC	Litium-nikkeli-koboltti-mangaanioksidiakku
SEI	Solid electrolyte interphase
SSB	Solid-state battery, kiinteän elektrolyytin akku
UPS	Varavirtalähde
V	Jännite voltteina
Wh	Energia wattitunteina

1 JOHDANTO

Nykypäivänä tarvitaan lisää kevyitä, tehokkaita, edullisia, turvallisia ja ympäristöystävällisistä raaka-aineista tuotettuja akkuja. Akut mahdollistavat tulevaisuuden uudenlaiset sähköjärjestelmät ja liikenteen sähköistämisen. Kotitaloudet, rakennukset ja paikalliset asuinalueet voivat varastoida oman mm. aurinkopaneeleiden avulla tuotetun sähkönsä akkujen avulla. Akkuja on hyvin saatavilla monenlaiseen käyttötarkoitukseen, kuten litiumioniteknologia sähköajoneuvojen ja liikkumisen käytössä. Litiumioniakut ovat yleistyneet myös muissa kiinteissä asennuksissa korkean suorituskyvyn, pitkän käyttöiän ja isojen tuotantovolyymien mahdollistaman edullisen hinnan ansiosta. Uudet akkuteknologiset ratkaisut parantavat kuitenkin nykyisissä akuissa olevia ongelmia ja vauhdittavat liikenteen sähköistymisessä. Joissain akuissa käytetään vaarallisia tai myrkyllisiä materiaaleja, ja osa materiaaleista on niin harvinaisia, että ne voivat loppua pian koko maailmasta.

Maailmassa etsitään paljon uusia akkuratkaisuja, joilla voitaisiin vastata kasvavan energian säilyttämistarpeeseen. Kehitys- ja tutkimustyötä tehdään aktiivisesti, jotta uudet akkuratkaisut saadaan toimivaksi, tuotantoon ja kuluttajille. Sähköistyminen mahdollistaa energiatehokkuuden ja suorituskyvyn parantamisen sekä vähentää paikallisia päästöjä. Akut ovat näissä ratkaisussa suuressa osassa ja uusia akkutehtaita rakennetaan ympäri maailmaa vastaamaan tuotannollisia tarpeita.

Tässä kandidaatintyössä tutustutaan aluksi akkujen toimintaperiaatteeseen, nykypäivänä kehittyneempiin akkuteknologioihin. Lopuksi tarkastellaan uuden sukupolven akkuteknologioita ja uusia akkuratkaisuja. Työn tarkoituksena on perehtyä nykypäivän akkuihin ja niiden toimintaan sekä uusiin akkuteknologioihin ja miten ne ovat rakennettu, jotta ne soveltuisivat tulevaisuuden energian varastointiin ja liikenteen sähköistymiseen.

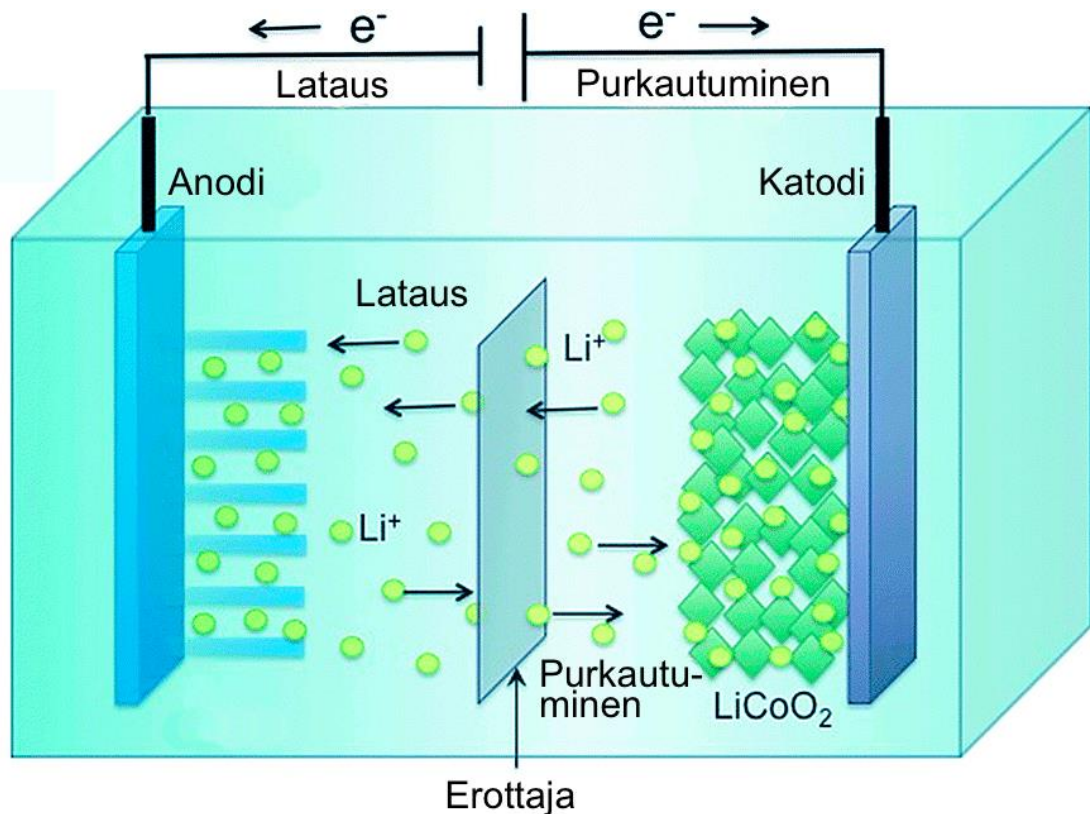
2 AKKUJEN TOIMINTAPERIAATE

Akkujen toiminta perustuu sähkökemiallisiin reaktioihin. Ladattavat akut varastoivat energiaa kemiallisessa muodossa. Akku koostuu kahdesta elektrodista, anodista eli negatiivisesta elektrodista, katodista eli positiivisesta elektrodista, ioneja johtavasta elektrolyytistä ja erottimesta, joka eristää elektrodit elektrolyyttiliuoksessa toisistaan. Akut ovat suljettuja systeemejä, jossa anodi ja katodi ovat elektrolyyttiliuoksessa, joka päästää ionit liikkumaan elektrodien välillä. Akussa tapahtuva sähkökemiallinen reaktio sisältää elektronin siirtymistä hiukkasesta toiseen. Tätä reaktiota kutsutaan hapettumis-pelkistymisreaktioksi. Hapettumis-pelkistymisreaktio tapahtuu kiinteällä elektrodilla tai faasien välisellä rajapinnalla. Akku toimii sähkökemiallisen kennon tavoin, sillä sähkökemialliseksi kennoksi kutsutaan elektrolyytissä olevien elektrodien ja ulkoisen virtapiirin sisältämää rakennelmaa. (Murtomäki ym. 2010, s. 7, 45; Ahoranta 2016, s. 314)

Sähkökemiallisessa kennossa tapahtuu spontaaneita hapetus-pelkistymisreaktioita, jossa elektronit siirtyvät hiukkasesta toiseen. Hapetus- ja pelkistymisreaktiot tapahtuvat, kun akussa on elektrolyytin ja metallisten elektrodien välisessä rajapinnassa potentiaaliero eli jännite-ero, joka johtaa kemialliseen reaktioon. Akkua purkaessa katodilla tapahtuu pelkistymisreaktio ja anodilla hapettumisreaktio. Negatiivisesti varautuneella anodilla tapahtuu hapettumisreaktion seurauksena elektronien luovuttamista. Elektronit kulkevat kennon ulkoisen virtapiirin kautta positiivisesti varautuneelle katodille, jossa tapahtuu pelkistyminen eli elektronien vastaanottaminen. Samalla anodilta katodille siirtyy positiivisesti varattuja ioneja elektrolyyttiliuoksessa, jotka vastaanottavat ulkoisen virtapiirin kautta tulleet negatiivisesti varatut elektronit. Tämä tapahtuma saa aikaan piiriin sähkövirran ja reaktio tapahtuu niin kauan, kunnes akun varaus on purettu loppujännitteeseen. (Murtomäki ym. 2010, s. 7, 8, 47, 168; Qi ym. 2017)

Akkua ladattaessa hapettumis-pelkistymisreaktio tapahtuu päinvastaiseen suuntaan. Akkua ladattaessa hapettumis-pelkistymisreaktio on pakotettu. Akkua varatessa latauslaitteella uudelleen katodilla tapahtuu hapettumisreaktio, josta elektronit siirtyvät anodille. Tällöin anodilla tapahtuu pelkistymisreaktio. Ladatessa katodi on negatiivisesti varattu elektrodi ja anodi positiivisesti varattu elektrodi. Lisäksi latausprosessin aikana katodilta siirtyy positiiviset ionit elektrolyyttiliuoksessa takaisin anodille. Kuvasta 1

nähdään litiumioniakun (Li-ion) rakenne ja toiminta akun purkautuessa sekä ladattaessa. (Murtomäki ym. 2010, s. 7, 8, 47, 168; Qi ym. 2017)



Kuva 1. Litiumioniakun (Li-ion) rakenne ja toiminta. (Mukaiillen Qi ym. 2017)

Akussa tapahtuvan sähkökemiallisen reaktion nopeus riippuu monesta eri tekijästä, joista määräävin tekijä on elektrodien potentiaaliero eli jännite-ero. Muita sähkökemialliseen reaktioiden nopeuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. lämpötila, reaktiopinta-ala, reagoivien aineiden pitoisuus ja paine. Anodi on akun purkautuessa pelkistin, sillä se pystyy pelkistämään toisen elektrodin. Katodi puolestaan toimii hapettimena, sillä katodi vastaavasti hapettaa toisen elektrodin. Hapetus-pelkistymisreaktiota kutsutaan usein myös redox-reaktioksi. (Murtomäki ym. 2010, s. 7, 8, 168)

Elektrodien välissä oleva erottaja on huokoinen kalvo, jonka tarkoituksena on erottaa positiivinen ja negatiivinen elektrodi toisistaan. Erottaja päästää ionien kulkemisen kalvon läpi mahdollistaen akussa kulkevan sähkövirran. Erotin on kuitenkin isolaattori eli sillä ei ole sähkönjohtavuutta. Erottaja estää akussa kennon sisäisen oikosulun tapahtumista ja lisäksi estää epätoivottujen sivureaktioiden tapahtumista. Akkuissa oleva

erottaja kostuu elektrolyyttiin ja usein erottajiin imeytyy elektrolyytti, jolloin akuista voidaan valmistaa pienempiä. Erottajakalvoksi kelpaa monenlaiset materiaalit. Esimerkiksi paljon käytetyn litiumioniakkujen kalvon materiaalina käytetään huokoista polyeteeniä, polypropeenaa tai niiden sekoitetta. (Murtomäki ym. 2010, s. 47; Buchmann 2021b)

Akkujen ominaisuuksiin vaikuttaa merkittävästi jo aiemmin mainittu elektrolyytti, jonka läpi ionit kulkeutuvat elektrodilta toiselle. Elektrolyytin ei tule johtaa elektroneja, vaan toimia katalyyttinä. Katalyyttinä toimiva aine nopeuttaa kemiallista reaktiota kulumatta itse reaktiossa. Elektrolyyttiliuoksessa olevat ionit ovat sähköisesti varautuneita atomeja, jotka ovat luovuttaneet tai vastaanottaneet elektroneja. Ionit kuljettavat elektrolyyttiliuoksessa liikkuaan sähkövarauksia. Akun elektrolyytti on nestemäisessä, geelimäisessä tai kiinteässä olomuodossa. Yleisimpiä elektrolyyttejä ovat suolojen, emäksisiä tai happoja sisältäviä vesiliuoksia. Lisäksi elektrolyytteinä käytetään nykyisin polymeerejä tai sulia suoloja. Esimerkiksi litiumioniakun (Li-ion) elektrolyytti koostuu litiumsulolaliuoksesta, geelimäisestä tai kiinteästä polymeerielektrolyytistä. (Ahoranta 2016, s. 316; Buchmann 2021c)

Akut ovat tyypillisesti jaoteltu kahteen kategoriaan: primääriset akut ja sekundääriset akut. Isoin ero primäärisillä ja sekundäärisillä akuilla on se, että primäärisiä akkuja ei pystytä lataamaan uudelleen, vaan niitä pystytään purkamaan vain kerran. Primääriakkuja kutsutaan yleisesti nimellä kuivapariistoiksi. Sekundäärisiä akkuja pystytään lataamaan uudelleen purkauksen jälkeen ja täten niitä kutsutaankin ladattaviksi akuiksi. Ladattavien akkujen kennoreaktio pystyy tapahtumaan kumpaankin suuntaan (Xiong ja Shen 2019, s. 11)

2.1 Normaalipotentialit ja hapetusluku

Alkuaineen kykyä toimia pelkistimenä tai hapettimena kuvaa aineen normaalipotentialiarvo E^0 . Lisäksi normaalipotentialiarvoilla voidaan arvioida reaktion tapahtumista. Alkuaineille on mitattu normaalipotentialiarvoja standardiolosuhteissa $+25\text{ }^\circ\text{C}$:ssa ja normaalipotentialiarvon rajaajaksi on sovittu vety $E^0=0\text{ V}$. Normaalipotentialit ovat mitattu täten normaalivetyelektrodiin NHE nähden. Normaalipotentialiarvot näkyvät liitteessä 1. Taulukossa on esitetty eri aineiden pelkistymisreaktioiden osareaktiot. Normaalipotentialaaleista nähdään hapettimien ja

pelkistimien vahvuuden kasvu ja E^0 arvot määrittelevät, kumpi reagoivista aineista hapettuu ja kumpi pelkistyy. Reaktio on spontaani eli reaktio tapahtuu itsestään, kun hapetus- ja pelkistysreaktioiden potentiaalien summa on suurempi kuin 0 V. Normaalipotentialien avulla voidaan laskea kennon teoreettinen jännite. (Murtomäki ym. 2010, s. 51–53; (Liljeblad ym. 2022, s. 66–67)

Alkuaineet, joilla on suurin negatiivinen potentiaali toimivat akuissa anodeina. Negatiiviset pelkistymispotentiaaliarvoltaan olevat aineet hapettuvat standardivetyelektrodiin yhdistettynä, ja täten ne ovat myös epäjalompia kuin vety. Aineet, joilla on suurin positiivinen potentiaali toimivat puolestaan akuissa katodeina ja ne ovat jalompia kuin vety. Spontaaneissa hapettumis-pelkistymisreaktioissa epäjalompi aine hapettuu. Siksi epäjalompi aine on akkujen anodina. Jalompi aine pelkistyy katodilla. Ladattavassa akussa elektrodien välisten kemiallisten reaktioiden tulee olla palautuvia. Akuissa tapahtuvat hapetus-pelkistysreaktiot eivät saa kuluttaa akuissa olevia elektrodeja ja elektrolyyttejä, mikä rajoittaa akkuihin sopivien elektrodien määrää. (Buchamm 2021a; Liljeblad ym. 2022, s. 67, 81)

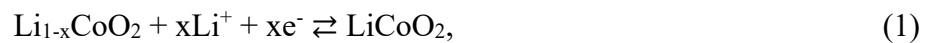
Alkuaineille on tehty metallien jännitesarja, jossa ne on järjestetty pienevän hapettumiskyvyn mukaan. Jännitesarjassa vety jakaa metallit jaloihin ja epäjaloihin metalleihin. Sähkökemiallisen jännitesarjan avulla voidaan ennustaa, tapahtuuko metallin ja toisen metallin ionien välillä hapettumis-pelkistymisreaktio. Voimaita hapettimia ovat esimerkiksi fluori ja happi. Vastaavasti voimakkaita pelkistimiä ovat alkalimetallit, kuten litium ja kalium. Taulukossa 1 on esitetty osa metallien jännitesarjasta, jossa alkuaineiden reaktiivisuus vähenee koko ajan, kun liikutaan epäjaloista metalleista jaloihin metalleihin. Jännitesarjaa laajempi ja eri aineiden hapettumis-pelkistymisreaktiota kuvaava taulukko on aiemmin mainittu normaalipotentialitaulukko. (Liljeblad ym. 2022, s. 62, 66)

Taulukko 1. Metallien sähkökemiallinen jännitesarja. (Mukaiillen Mäkelä ym. 2008, s. 197)

Epäjalot metallit											H	Jalot metallit			
Li	K	Ca	Na	Mg	Al	Zn	Fe	Ni	Sn	Pb		Cu	Hg	Ag	Au
← Metallien epäjalous kasvaa												Metallien jalous kasvaa →			

Hapettumis-pelkistymisreaktioita kuvataan usein hapetuslukujen muutoksien kautta. Elektronien siirtyessä akuissa olevissa elektrodeissa toiselle hapetusluvut muuttuvat. Hapetusluku tarkoittaa atomin elektronien lukumäärää, jonka se voi luovuttaa, vastaanottaa tai jakaa. Hapetusluku kasvaa, kun elektropositiivisempi alkuaine hapettuu ja pelkistyessään hapetusluku pienenee. Hapetusluvuilla voidaan hyvin kuvata alkuaineiden sitoutumista yhdisteissä muihin alkuaineisiin. Alkuaineen hapetusluku on yhtä suuri kuin varaus, joka atomilla on, kun se on luovuttanut tai vastaanottanut elektroneja. Lisäksi hapetusluku voidaan laskea sidoksissa elektronegatiivisemmalle atomille sidoselektronien mukaan. Hapetuslukujen periaatteiden avulla voidaan helposti kirjoittaa akuissa tapahtuvat puolireaktiot, joista saadaan lopullinen tasapainotettu kokonaisreaktioyhtälö. (Liljeblad ym. 2022, s. 44, 52)

Aiemmin kappaleessa 2 esitettiin litium-kobolttioksidista (LiCoO₂) tehdyn akun rakennetta. Litium-kobolttioksidista valmistetulle akulle voidaan kirjoittaa tasapainotetut katodilla ja anodilla tapahtuvat kemialliset puolireaktiot. Katodin puolireaktiota on tarkasteltu yhtälössä 1, jossa akun purkautuminen on vasemmalta oikealle ja lataus on oikealta vasemmalle: (Qiao ja Wei 2012, s. 199)



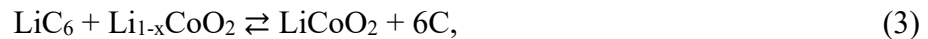
missä $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$ on kerroksellinen litium-kobolttioksidi
 Li^+ on positiivinen litiumioni
 e^- on negatiivinen elektroni
 LiCoO_2 on litium-kobolttioksidi

Anodille puolireaktio puolestaan on yhtälön 2 mukainen. Akun purkautuminen on vasemmalta oikealle ja lataus on yhtälössä oikealta vasemmalle:



missä LiC_6 on litiumin ja grafiitin interkalaatioyhdiste
 6C on grafiitti
 Li^+ on positiivinen litiumioni
 e^- on negatiivinen elektroni

Yhdistettynä nämä puolireaktiot saadaan kokonaisreaktioksi yhtälö 3:



missä LiC_6 on litiumin ja grafiitin interkalaatioyhdiste
 $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$ on kerroksellinen litium-kobolttioksidi
 LiCoO_2 on litium-kobolttioksidi
 6C on grafiitti

2.2 Akkuihin liittyviä käsitteitä

Akkuihin liittyy paljon erilaisia käsitteitä, joita käytetään paljon akkuja kuvaillessa ja vertaillessa. Perinteisiä käsitteitä on akkujen fyysisten mittojen ja painon (kg) lisäksi ovat akun nimellisjännite (V), kapasiteetti (Ah) ja energia (Wh). (Ahoranta 2016, s. 314; Buchmann 2021a)

Nimellisjännite tarkoittaa akun keskimääräistä purkausjännitettä. Jännitteen yksikkönä akuissa käytetään voltteja V. Kapasiteetti puolestaan ilmaisee uuden täyteen ladatun akun saatavan ampeerituntimäärän. Kapasiteetti määrittää kuinka paljon latausta akku voi sisältää, kunnes se on purettu loppujännitteeseen määrättyllä purkausvirralla ja tietyssä lämpötilassa. Akun varastoiman energian määrää ilmaistaan wattitunteina Wh. (Ahoranta 2016, s. 314; Buchmann 2021a)

Akkujen käyttöikä ei ole ikuinen, vaan akkujen käytön aikana sen kapasiteetti pienenee pysyvästi 80 prosenttiin alkuperäisestä arvosta. Käyttöikään vaikuttaa oleellisesti akun käyttötapa. Lisäksi akuille annetaan lataus-purkausjaksojen lukumäärä, joka tarkoittaa täyteen varattujen ja loppujännitteeseen purettujen jaksojen lukumäärää. Yleensä akkujen lataus- ja purkausjaksojen lukumäärästä käytetään sanaa sykli. Akkuja ei myöskään pureta yleensä aivan loppujännitteeseen, vaan jännite on purettu syväpurkausalueelle. Syväpurkauksella tarkoitetaan akun nimelliskapasiteetin täysimittaista käyttöä. (Ahoranta 2016, s. 315)

Joillekin kehitetyille ja käytössä oleville akuille on muodostunut muisti-ilmiöksi kutsuttu reaktio. Muisti-ilmiössä akku menettää osan kapasiteetistaan, jos akku osittaispuretaan tiettyyn jännitteeseen ja ladataan toistuvasti samansuuruisella sähkömäärällä. Tällöin osa

akuin aktiivisista materiaaleista kiteytyy ja täten ne eivät osallistu enää sähkökemiallisiin reaktioihin. Tämän seurauksena akun kapasiteetti rajoittuu muisti-ilmiössä tapahtuvaan käytettyyn kapasiteettiin. Muisti-ilmiö on yleistä lyijy- ja nikkeli-metallihydridiakuilla. Muisti-ilmiön voi välttää, kun akku ladataan ja puretaan riittävän usein kokonaan. (Ahoranta 2016, s. 315)

Akku purkautuu myös itsestään, jos sitä ei käytetä. Tätä ilmiötä kutsutaan itsepurkautumiseksi. Itsepurkautuminen kertoo siitä, kuinka nopeasti käyttämätön akku menettää kapasiteettiaan tietyssä lämpötilassa. Esimerkiksi litiumakku menettää puolen vuoden aikana kapasiteetistaan noin 20 % ja lyijyakku noin 30 %. (Ahoranta 2016, s. 315)

Ahoranta (2016, s. 315) tuo esille akuissa tyypillisesti käytettävän purkaus- ja latausvirran C-arvon. C-arvo määrittää akun purkautumis- ja latausnopeuden. Esimerkiksi merkintä 0.5C tarkoittaa, että akun purkausvirta on 0.5 ampeeria (A), purkaus aika ja kapasiteettiaika 2 tuntia. Purkausajan ja kapasiteettiajan voidaan laskea C-arvosta purkauskertoimen käänteisarvona.

Tärkeä ominaisuus erilaisia akkuteknologioita vertaillessa on sen energiatiheys. Akuista halutaan mahdollisimman paljon energiaa, mutta akuista ei haluta rakenteeltaan erityisen raskaita kokonaisuuksia, joissa on käytetty paljon kennoja maksimaalisen kapasiteetin saavuttamiseksi. Tästä syystä on tärkeää vertailla eri akkujen energiatihedden arvoja. Akkujen energiatiheys mittaa koko systeemiin varastoituneen energian suuruutta (Wh) kilogrammaa (kg) kohden (Wh/kg). Toisena käytettynä energiatihedden mittarina on käytetty energian suuruutta tilavuutta litra (l) kohden (Wh/l). Suurimmat energiatihedeltään olevat akut soveltuvat erinomaisesti nykyaikaisten sähköautojen käyttöön. (Buchamm 2021e)

2.3 Akkujen kennotyypit

Akku koostuu yhdestä tai useammasta kennosta, joista saadaan tasavirtaa. Akkujen jännitettä voidaan nostaa, kun kennoja kytketään sarjaan ja virtaa puolestaan, kun kennoja kytketään rinnan. Akut jaetaan erilaisiin rakennetyyppeihin. Näitä eri rakennetyyppejä ovat sylinterimäinen, prismaattinen ja pussimainen rakenne. Rakennetyyppien käyttö vaihtelee eri käyttökohteiden mukaan. Prismaattinen rakenne on käytännöllinen puhelinten ja tietokoneiden akkuina. Sylinterimäinen kennorakenne toimii paremmin

sähköajoneuvojen akkurakenteissa, sähköpyörien akuissa ja erilaisissa sähkötyökaluissa. Pussikennoja käytetään esimerkiksi droneissa ja muissa suurissa kuormitusvirtoja vaativissa harrastusvälineissä. Kennotyyppien vahva erottaja on niiden energiatiheys. Kennotyyppienä halutaan käyttää mahdollisimman energiatiheitä, helposti valmistettavissa olevia ja lisäksi kennojen materiaalit halutaan olevan halpoja. Kennojen kapasiteetti halutaan myös suureksi. (Buchamm 2021d)

2.3.1 Sylinterikenno

Sylinterikennot ovat olleet erinomainen kennotyyppi erilaisissa sovelluksissa, koska sylinterimäisellä kennolla on korkea energia, hyvä mekaaninen vakaus ja niitä on helppo valmistaa. Sylinterikenno kestää myös korkeita sisäisiä paineita, joita voi syntyä akun ylikuumentumisen takia. Ylikuumentumisen vuoksi sylinterikennoista valmistettuihin akkuihin on kehitetty ylikuumentumissuojia ja ylipaineventtiili, jonka avulla korkea paine saadaan turvallisesti poistettua. (Buchamm 2021d)

Buchamm (2021d) mukaan yleisimpänä sylinterimäisinä akkuina on käytetty 18650-sylinterikennoa ja niitä on vuonna 2013 tuotettu 2.55 miljardia kappaletta. 18650-kennon vahvuuksina ovat olleet alhaiset kustannukset ja hyvä luotettavuus. Lisäksi 18650-sylinterikennon kapasiteettia on pystytty nostamaan vuosien saatossa. Erilaisia sylinterikennoja on myös kehitetty, kuten 21700-mallinen sylinterikenno. Nimet sylinterikennoille tulee niiden mitoista. Esimerkiksi 18650-kenno on 18 millimetriä halkaisijaltaan ja 65 millimetriä korkeudeltaan ja 21700-mallin halkaisija on 21 millimetriä ja korkeus 70 millimetriä. Muitakin sylinterikennoja on olemassa, mutta mm. sähköautovalmistaja Tesla, Samsung ja Panasonic ovat käyttäneet 21700-mallisia kennoja helpon valmistuksen ja optimaalisen kapasiteetin vuoksi. Sylinterikennoja voidaan helposti valmistaa automatisoidulla linjastoilla.

2.3.2 Prismaattinen kenno

Prismaattinen kenno on tilankäytöltään parempi kuin sylinterimäinen kenno. Se mahdollistaa joustavamman akkujen käytön ja suunnittelun, sillä se on koteloitu pieneen alumiiniseen tai teräksiseen koteloon vakauden ja pienen koon saavuttamiseksi. Prismaattisella kennoilla rakennettu akku on usein tehty juuri johonkin laitteeseen sopivaksi. Sylinterimäinen kenno on kuitenkin halvempi valmistaa, joten prismaattista kennoa ei yleensä käytetä suurissa akkurakenteissa. Isoimpien prismaattisista kennoista

pakattujen akkujen kapasiteetti vaihtelee 20–50 Ah välillä. Kannettavissa tietokoneiden ja puhelimien prismaattisista kennoista valmistetun akun kapasiteetti vaihtelee 0.8-4 Ah välillä. (Buchamm 2021d)

2.3.3 Pussikkenno

Pussikkenno on tiheä rakenteeltaan ja tarjoaa täten yksinkertaisen, joustavan ja kevyen ratkaisun akkujen valmistukseen. Pussikkenno on myös kustannustehokas valmistaa, mutta hinta energiaa kohden on korkeampi kuin sylinterimäisessä kennossa. Pussikkenno on kevyt, sillä sen ympärille ei tarvitse rakentaa raskaita kuoria alumiinista tai teräksestä. Pussikennolla on hyviä ominaisuuksia korkean kuormitusvirran sovelluksissa. Pussikennon ongelmana on sen turpoaminen. Pussikkenno voi alkaa turpoamaan 500 syklin aikana jopa 8–10 prosenttia, mutta isompien kapasiteettien 40 Ah:n kennojen vastaava turpoaminen tapahtuu 5000 syklin kohdalla. Täten pussikennoilla rakennetuissa akuissa tulee huomioida, että turpoamiselle on jätetty tilaa ja rakenteissa tulee välttää teräviä reunoja, jotta ne eivät aiheuta repeytymiä pussiin. Pussikennojen käyttö akuissa on kasvavassa suosiossa ja se onkin myös nykyisin käytössä samanlaisissa sovelluksissa prismaattisten kennojen kanssa. (Buchamm 2021d)

3 AKKUTEKNOLOGIAT NYKYPÄIVÄNÄ

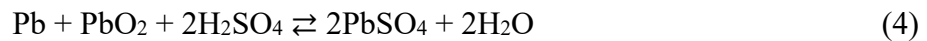
Akut luokitellaan yleensä elektrodinsa materiaalin perusteella. Nykypäivänä käytetyimpiä akkutyyppejä ovat lyijyakku, nikkeli-kadmiumakku (NiCd), nikkeli-metallihydridiakku (NiMH) ja erilaiset litiumioniakut (Li-ion). Akkujen käyttöön ja valintaan liittyy olennaisesti akkujen ominaisuudet, kuten energiatiheys, lataus-purkausjaksojen lukumäärä, nimellisjännite, energia, kapasiteetti, itsepurkautuminen ja akulle sopivat käyttöolosuhteet. Nykypäivänä tulee myös huomioida akuissa käytettävien materiaalien ympäristöystävällisyys, kuten nikkeli-kadmiumakuissa käytettävä kadmium, joka on erittäin myrkyllistä ja tekee akuista ongelmajätettä. Lisäksi on muistettava, että alkuaineiden louhinta kuormittaa ympäristöä ja näin ollen akkujen kierrätettävyys on tärkeää. (Motiva 2020)

3.1 Lyijyakku

Lyijyakku on tyypillinen akkutyyppejä polttomoottoriajoneuvojen käynnistysakkuina, varavoima-akkuina ja teollisuudessa sähkökäyttöisten kulkuneuvojen voimalähteinä. Lyijyakut yleisesti jaotellaan kolmeen osioon: tehoakuiksi, energia-akuiksi ja suljetuiksi lyijyakuiksi. Tehoakku toimii nimensä mukaisesti tehoakkuna, joka pystyy antamaan suurta virtaa lyhyen ajan. Tehoakkuja käytetäänkin auton käynnistysakkuina. Energia-akku puolestaan toimii siten, että se antaa suuren energiamäärän, kun sitä käytetään jatkuvalla virralla. Energia-akkuja käytetäänkin aurinko- ja varasähköjärjestelmissä. Suljettu lyijyakku toimii missä tahansa asennossa ilman vuotoja, sillä sen elektrolyytti on nestetäytteen- tai geelimäinen liuos, joka on akussa liikkumatonta. Toinen suljettu lyijyakkutyyppejä on AGM-akku (Absorbent Glass Mat), jossa elektrolyytti on imeytettyä lasikuitumattoon. Suljettua lyijyakkua ei tarvitse huoltaa ja tämä tekee siitä erinomaisen akkuvaihtoehdon sellaisiin sovelluksiin, joissa akku ei pysty huoltamaan. (Ahoranta 2016, s. 320; Motiva 2020)

Lyijyakun negatiivisena elektrodina eli anodina on huokoinen lyijylevy (Pb), positiivisena elektrodina eli katodina lyijyoksidilevy (PbO₂) ja elektrolyyttinä toimii rikkihappoliuos (H₂SO₄). Lisäksi kennossa on erotinlevy- tai matto. Perinteisessä lyijyakussa on avattavat kennot, joihin pystyy lisäämään tislattua vettä, jos osa lyijyakun elektrolyytistä on haihtunut. (Ahoranta 2016, s. 321; Motiva 2020)

Ahorannan (2016, s. 321) mukaan lyijyakkua purettaessa sen anodin lyijylevy (Pb) ja katodin lyijyoksidi (PbO₂) reagoivat rikkihappoelektrolyytin kanssa muodostaen lyijysulfaattia (PbSO₄), vettä (H₂O) ja sähköenergiaa. Latauksen aikana lyijyakun reaktiot menevät päinvastoin, jolloin ulkoisen sähkölähteen syöttämä sähköenergia muuttaa sähkökemiallisen reaktioiden avulla lyijysulfaatin ja veden takaisin lyijyksi, rikkihapoksi ja lyijydioksidiksi. Tasapainotettu kokonaisreaktio on täten yhtälön 4 mukainen:



3.2 Nikkeli-kadmiumakku (NiCd)

Nikkeli-kadmiumakulla on hyviä ominaisuuksia, kuten se toimii laajalla lämpötila-alueella, sillä on pitkä käyttöikä ja se pystyy antamaan suuria virtoja matalan sisäisen resistanssin ansiosta. Nikkeli-kadmiumakkuja käytetään paljon sähkötyökaluissa, kuten porakoneissa. Nikkeli-kadmiumakun käyttöä rajoittaa kapasiteettia vähentävä muisti-ilmiö ja erittäin myrkyllinen kadmium. Kadmiumin vuoksi nikkeli-kadmiumakkuja ei käytetä esimerkiksi sähköautoissa nykypäivänä. (Motiva 2020)

Nikkeli-kadmiumakussa positiivisena elektrodina käytetään nikkelihydroksidia (Ni(OH)₂), negatiivisena elektrodina kadmiumia (Cd) ja elektrolyytinä on vahvasti emäksinen kaliumhydroksidiliuos (KOH). Tasapainotettu kemiallinen kokonaisreaktio on yhtälön 5 mukainen: (Xiong ja Shen 2019, s. 16)



3.3 Nikkeli-metallihydridiakku (NiMH)

Nikkeli-metallihydridiakku toimii samalla tavalla kuin nikkeli-kadmiumakku, mutta se käyttää vetyä absorboivaa metalliseosta eli metallihydridiä negatiivisena elektrodina. Positiivisena elektrodina toimii siis nikkelihydroksidi ((Ni(OH)₂) ja elektrolyytinä kaliumhydroksidiliuos (KOH). Elektrodien välissä on muissakin akun toimintaperiaatteiden mukaisesti erottaja. Metallihydridinä käytetään monia eri vaihtoehtoja. Yleisimmät käytetyimmät ovat AB₂ tai AB₅ metalliseoksia. AB₂ metalliseoksessa A on vanadiinia tai titaania ja B on zirkoniumia tai nikkeliä. AB₅ metalliseoksessa puolestaan A aineena käytetään harvinaisempaa lantaania ja B aineena

nikkeliä. Tasapainotettu kemiallinen kokonaisreaktioyhtälö nikkeli-metallihydridiakulle on yhtälön 6 mukainen: (Xiong ja Shen 2019, s. 17)



missä M on metalliyhdiste

Nikkeli-metallihydridiakun hyvinä ominaisuuksina ovat ympäristöystävällisyys, parempi kapasiteetti ja lämpötilaherkkyys on suurempi kuin nikkeli-kadmiumakulla. Toisaalta NiCd-akku on parempi kestoikänsä ja virranantokyky on parempaa, kuin NiMH-akuissa. NiMH-akkuja käytetään tietokoneissa, puhelimissa sekä hybridiautoissa. Nikkelistä on olemassa muitakin nykypäivänä käytettyjä akkutyyppisiä, kuten nikkeli-rauta-akku, joka on painava ja helposti itsepurkautuva, ja nikkeli-sinkkiakku, joka on taas kevyt, mutta lyhytikäinen. (Motiva 2020)

3.4 Litiumioniakut (Li-ion)

Ladattava litiumioni eli Li-ion -akku on nykypäivänä yksi käytetyimpiä akkutyyppisiä kuluttajille korkean energiatihedden vuoksi niin pienakkuotannossa, kuin sähköauton akkuina. Suorituskyky, hinta, kemia ja turvallisuusominaisuudet vaihtelevat litiumioniakkutyyppien välillä. Litiumioniakut käyttävät elektrodimateriaalina interkaloitua litiumyhdistettä perinteisen litiumakun metallisen litiumin sijaan. Litiumioniakut ovat suosittuja, sillä niiden etuina on pieni itsestään purkautuminen, korkea kennojännite, tasainen purkauskäyrä, parempi latauskyky ja niillä on yksi parhaimmista energia-painosuhteista. Niihin ei liity muisti-ilmiötä, joka rajoittaisi niiden osittaista purkamista ja lataamista. (Qiao ja Wei 2012; Ahoranta 2016, s. 316)

Xiong ja Shen (2019, s. 18-19) mukaan litiumioniakuissa elektrolyytinä käytetään litiumsuolaliuosta, geelimäistä polymeerielektrolyyttiä, kiinteää polymeerielektrolyyttiä tai jopa keraamista elektrolyyttiä. Yleensä litiumioniakkujen anodi on valmistettu grafiitista tai vetyä sisältävästä hiilimateriaalista. Katodi puolestaan on kerrosrakenteista metallioksidia, polyanionia tai kolmiulotteista metallioksidirakennetta. Eri litiumioni akkutyyppit ovat nimetty näiden positiivisten elektrodien eli katodien mukaan.

Katodirakenteen mukaisesti nimettyjä litiumioniakkuja on olemassa monentyypisiä. Markkinoilla on olemassa nykypäivänä 6 eri eniten käytettyä litiumioni akkuteknologiaa:

litium-kobolttioksidi (LCO) LiCoO_2 , litium-mangaanioksidi (LMO) LiMn_2O_4 , litium-nikkeli-koboltti-mangaanioksidi (NMC) LiNiMnCoO_2 , litium-rautafosfaatti (LFP) LiFePO_4 , litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi (NCA) LiNiCoAlO_2 ja litium-titanaatti (LTO) Li_2TiO_3 . Li-ion -akkujen huono ominaisuus on se, että niihin on integroitava useampia turvalaitteita, kuten ylivirtasuojia ja turvaominaisuuksia sisäisen paineen poistamiseksi. (Xiong ja Shen 2019, s. 19; Buchamm 2021f)

Näillä kuudella eri litiumioniakkuteknologialla on omat hyvät puolensa eri sovelluksiin, vaikka niillä on paljon yhtäläisyyksiä. Litium-kobolttioksidiakkuja (LCO) käytetään paljon puhelimissa, kannettavissa tietokoneissa, kameroissa ja tableteissa korkean energiatihedden vuoksi. Litium-mangaanioksidiakkuja (LMO) käytetään paljon sähkötyökaluissa ja lääketieteellisissä laitteissa korkean tehon vuoksi. Litium-nikkeli-koboltti-mangaanioksidiakkuja (NMC) käytetään puolestaan teollisuudessa, sähköautoissa ja sähköpyörissä. LMO- ja NMC-akkuja pystytään muokkaamaan sen käyttökohteen mukaan, sillä ne voidaan valmistaa joko tehoakuiksi tai suuren energian omaavaksi akuiksi. (Buchamm 2021f)

Litium-rautafosfaatin (LFP) käyttökohteiksi soveltuu suuret kuormitusvirran ja kestävyyttä vaativat laitteet, koska sen sisäinen resistanssi on pieni. Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidiakkuja (NCA) myös käytetään paljon teollisuudessa, lääketieteellisissä laitteissa ja sähköautoissa. NCA-akulla on hyvin paljon yhtäläisyyksiä NMC-akun kanssa. (Buchamm 2021f)

Litium-titanaattiakussa (LTO) yleisesti käytetty grafiitti anodi korvataan suuremmalla titaanianodilla. Tällöin suurempi titaanianodi tekee LTO-akusta huomattavasti nopeammin ladattavan muihin litiumioniakkuihin nähden. Litium-titanaattiakku tuottaa myös täten suuremman purkausvirran. Anodilla tapahtuvat hapetus-pelkistymisreaktiot tapahtuvat paremmin, sillä sen koko on suurempi. Litium-titanaattiakkuja käytetään paljon UPS:inä eli varavirtalähteinä ja sähköautoissa. (Xiong ja Shen 2019, s. 19; Buchamm 2021f)

3.5 Nykypäivän akkuteknologioiden vertailua

Nykypäivän kehitettyjen akkuteknologioiden akkuja käytetään paljon eri sovelluksissa, mutta niillä on myös paljon yhtäläisyyksiä ja täten samanlaisia käyttökohteita. Akkuja

pystytään kuitenkin helposti vertailemaan. Taulukossa 2 on esitetty nykypäivän käytetyimpien akkuteknologioiden energiatiheys, sisäinen resistanssi, lataus- ja purkausjaksojen lukumäärä, nimellislämpötila ja niiden toimintalämpötilaa.

Taulukko 2. Nykypäivän käytetyimpien akkuteknologioiden vertailutaulukko. (Xiong ja Shen 2019, s. 20; Buchamm 2021f; Buchamm 2021g)

	Lyhenne	Kemiallinen kaava	Energiatiheys Wh/kg	Sisäinen resistanssi	Lataus-purkausjaksojen lukumäärä	Nimellisjännite	Toimintalämpötila
Lyijyakku			30–50	Tosi pieni	200–300	2V	-20°C–50°C
Nikkeli-kadmiumakku	NiCd	NiCd	45–80	Tosi pieni	1000	1.2V	-20°C–65°C
Nikkeli-metallihydridiakku	NiMH	NiMH	60–120	Pieni	300–500	1.2V	-20°C–65°C
Litium-kobolttioksidi	LCO	LiCoO ₂	150–200	Kohtalainen	500–1000	3.6V	-20°C–60°C
Litium-mangaanioksidi	LMO	LiMn ₂ O ₄	100–150	Pieni	300–700	3.7V	-20°C–60°C
Litium-nikkeli-koboltti-mangaanioksidi	NMC	LiNiMnCoO ₂	150–220	Pieni	1000–2000	3.7V	-20°C–60°C
Litium-rautafosfaatti	LFP	LiFePO ₄	90–120	Tosi pieni	2000	3.2V	-20°C–60°C
Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi	NCA	LiNiCoAlO ₂	200–260	-	500	3.6V	-20°C–60°C
Litium-titanaatti	LTO	Li ₂ TiO ₃	50–80	-	3000–7000	2.4V	-20°C–60°C

Taulukosta 2 nähdään hyvin, että lyijyakun energiatiheys on huonoin, kun taas litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidin energiatiheys on suurin. Litium-titanaattiakun lataus- ja purkausjaksojen lukumäärä on huomattavasti suurempi muihin akkukemioihin verrattuna. Nimellisjännite vaihtelee suuresti ja nikkelipohjaisten akkukemioiden nimellisjännite on huomattavasti pienempi litiumioniakkuihin verrattuna. Toimintalämpötila akkujen purkautumiselle on kaikissa akkutyypeissä suhteellisen samanlainen.

4 UUDEN SUKUPOLVEN AKKUTEKNOLOGIAT

Akkuja pyritään kehittämään paljon. Nykypäivänä tarvitaan paremmilla ominaisuuksiltaan olevia akkuja monenlaisiin käyttötarkoituksiin. Vaikka nykypäivänä käytetyissä akuissa on jo monenlaisia hyviä ominaisuuksia, tarvitsemme silti parempia energiatiheydeltään, fyysisiltä ominaisuuksiltaan, kapasiteetiltaan, hyvällä sisäisellä resistanssiltaan ja suuremmalla lataus- ja purkausjaksojen lukumäärältään olevia akkuja. Lisäksi ei pidä unohtaa akkujen lataus- ja purkausnopeutta ja käyttölämpötila-alueita, jotka ovat tärkeitä ominaisuuksia esimerkiksi sähköautoissa. Akkujen kehittäminen on hidasta ja aikaa vievää, mutta seuraavan sukupolven akkuja on pystytty kehittämään ja ne ovat ottaneet huomattavia kehitysaskeleita. Lupaavampia uuden sukupolven akkuteknologian akkuja ovat solid-state -akut (SSB), litium-rikkiakut (LI-S) ja litium-ilma-akut (Li-air). (Kurzweil ja Garche 2017, s. 75–79)

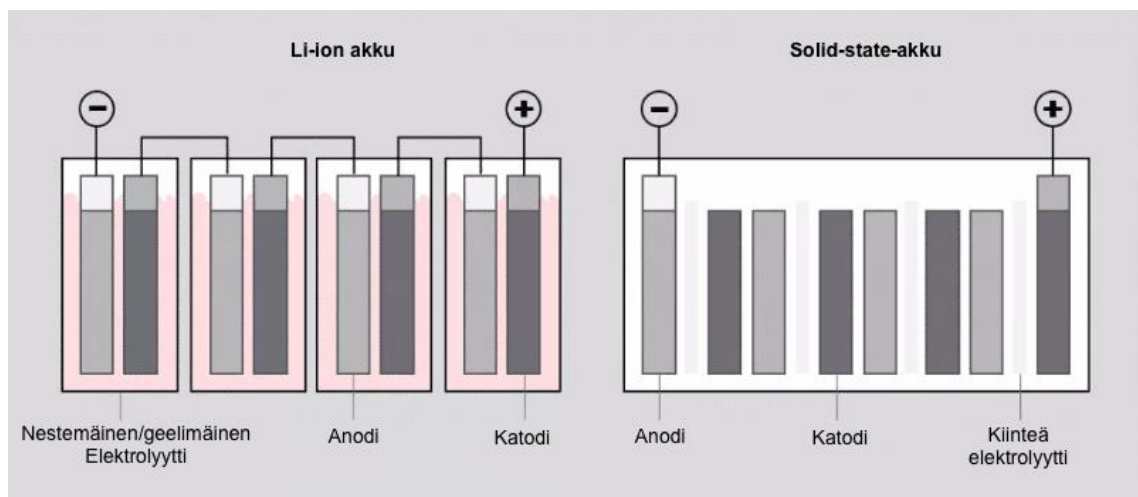
4.1 Solid-state -akut

Solid-state -akkujen (SSB) toimintaperiaate ja rakenne on hyvin samanlainen kuin nestemäisen tai geelimäisen akun, mutta erona niihin on se, että niissä käytetään kiinteää elektrolyyttiä nestemäisen tai geelimäisen elektrolyytin sijasta. Solid-state -akuissa elektrolyytti on fyysisesti kiinteässä olomuodossa. Solid-state -akkujen materiaaleina käytetään yleisesti samoja metalleja anodeina ja katodeina, kuten nestemäisessä tai geelimäisessä elektrolyyttiakussa. Anodimateriaalit sisältävät hiiltä, titanaatteja, litiumseoksia tai jopa metallista litiumia, mitä ei nestemäisessä tai geelimäisessä litiumakussa käytetä. Katodimateriaali puolestaan sisältää litiumpohjaisia oksideja ja fosfaatteja. Nestemäinen tai geelimäinen litiumioniakku koostuu neljästä osasta: katodista, anodista, elektrolyytistä ja erottajasta. Kiinteän elektrolyytin akuissa erottaja on voitu integroitua toimimaan elektrolyytinä. (Kurzweil ja Garche 2017, s. 79; Li ym. 2021)

Kiinteän elektrolyytin akkujen vahvuutena on erityisesti niiden parempi turvallisuus verrattuna nestemäisiin tai geelimäisiin akkuihin. Vuotava nestemäinen tai geelimäinen akku voi aiheuttaa myrkyllisiä oireita ihmiskehoon, kun akku on vaurioitunut. Tätä ongelmaa kiinteän elektrolyytin akuissa ei ole. Kiinteän elektrolyytin akut ovat edullisempia ja niillä on myös parempi suorituskyky. Nestemäiset ja geelimäiset elektrolyyttiakut ovat toimivia, mutta niissä on paljon haittoja. Ne ovat herkkiä

syttymään, niillä on alhainen kiehumispiste ja epästabiili lämpötilavakaus. Lisäksi erilaiset elektrodien ja elektrolyytin väliset sivureaktiot huonontavat nestemäisiä ja geelimäisiä akkuja. Näitä sivureaktioita ovat esimerkiksi vastustuskykyisen SEI-kerroksen (solid electrolyte interphase) syntyminen elektrodeihin, joka heikentää kapasiteettia. SEI aiheuttaa myös elektrolyyttistä hajoamista suurilla jännitteillä, joka puolestaan rajoittaa korkeajännitteisten katodimateriaalien käyttöä. Nestemäisten tai geelimäisten lämpöhäiriöihin liittyvät vaarat johtuvat pääasiassa syttyvistä orgaanisista elektrolyyteistä. Näitä haittoja ei ole havaittu kiinteän elektrolyytin litiumkennoissa, mikä tekeekin siitä varteenotettavan tulevaisuuden akkutekniikan. (Kurzweil ja Garche 2017, s. 79; Li ym. 2021; Oh ym. 2022)

Solid-state -akuilla on korkeampi energiatiheys, sillä niissä pystytään käyttämään elektrodimateriaalina stabiilisia ja suuripotentialisia kerrostettuja katodeja. Anodeina voidaan käyttää jopa metallista litiumia tai piitä, joka johtaa korkeampaan ominaisenergiaan. Kiinteän elektrolyytin akkuja pystytään rakentamaan tiiviimmiksi kokonaisuuksiksi, sillä kiinteän elektrolyytin akuston kennot voivat olla yhteydessä toisiinsa ilman erillistä kotelointia. Tämä säästää merkittävästi akuston kokoa ja painoa ja täten ne ovat myös huomattavasti energiatehokkaampia verrattuna nestemäisiin tai geelimäisiin akkuihin. Kuvassa 2 on esitetty, miten kiinteän elektrolyytin akku voidaan koteloida tiiviiksi yhdeksi akkukennoksi. (Kurzweil ja Garche 2017, s. 79; Oh ym. 2022)



Kuva 2. Nestemäisen tai geelimäisen ja solid-state kennon koteloinnin eroavaisuus. (Mukaillen FutureBridge 2021)

Solid-state -akuille on kehitetty monentyypisiä elektrolyyttejä. Elektrolyytit voidaan jakaa kolmeen osioon: keraamiset elektrolyytit, polymeeriset elektrolyytit ja hybridiset elektrolyytit. Keraamiset elektrolyytit koostuvat oksidi-, sulfidi- tai fosfaattisista aineista, jotka johtavat hyvin ioneja. Keraamisien elektrolyyttien vahvuksina on sulfidien korkea ionijohtavuus ja pieni raerajakoko. Keraamisilla oksideilla on puolestaan hyvä kemiallinen vakaus, jolloin se ei vapauta myrkyllisiä kaasuja hajotessaan. Polymeeriset elektrolyytit koostuvat puolestaan polyeteenioksidoista, yhdestä litiumionijohtava pohjaisesta elektrolyytistä ja elektrolyyteistä, joissa ei ole polyeetteriä. Kiinteiden polymeerielektrolyyttien vahvuksina on alhainen syttyvyys, turvallisuus, hyvä joustavuus, läheinen kosketus elektrodien kanssa ja niitä on helppo prosessoida. Hybridi elektrolyytit koostuvat keraamisien ja polymeeristen elektrolyyttien sekoituksista. Suurin ero keraamisten ja polymeeristen kiinteiden elektrolyyttien välillä on mekaaninen ominaisuus. Keraamiset elektrolyytit ovat sopivampia jäykille akkujärjestelmille ja polymeerit ovat sopivampia joustavammille akkujärjestelmille. Kuvasta 3 nähdään kiinteän elektrolyyttien luokittelu keraamisiin, polymeerisiin ja hybridisiin elektrolyytteihin. (Rahardian ym. 2019; Li ym. 2021)



Kuva 3. Kiinteän elektrolyyttien luokittelu. (Li ym. 2021)

Solid-state -akuilla on kuitenkin monia haasteita, jotta se voisi toimia tulevaisuudessa toimivana, tehokkaana ja turvallisena akkuna. Akun kiinteän elektrolyytin ja elektrodien rajapinnan yhteensopivuus on ollut yksi isoista haasteista. Lisäksi ionijohtavuutta

huoneenlämmössä ei ole saatu halutulle tasolle. Tämä heikentää akun toimintaa. Myös mekaaninen lujuus on heikkoa kiinteän elektrolyytin akuissa. Tutkijat etsivät ratkaisuja kiinteän olomuodon akkujen teollistumisen nopeuttamiseksi. Haasteina teollistumisessa on akkurakenteen suunnittelu ja erilaiset akun valmistustekniikat. Yksi varteenotettavista ja kehitettävistä kiinteän elektrolyytin akun valmistustekniikoista on 3D-tulostus. (Kurzweil ja Garche 2017, s. 79–80; Li ym. 2021)

Solid-state -akuilla on kirkas tulevaisuus energian varastoinnissa, autoteollisuudessa ja kulutuselektronikassa. Sen parempi energiatiheys parantaa esimerkiksi autoteollisuuden akkuja huomattavasti. Lisääntynyt energiatiheys johtaisi suurempaan tehoon ja ajoneuvojen ajomatka lisääntyisi merkittävästi. Solid-state -akkujen latausnopeus (C-arvo) on parempi, sillä niissä ei ole nestemäisen ja geelimäisen mukaista elektrolyyttien ylikuumentumista. Pienemmän ylikuumentumisen vuoksi akun uudelleen varaamisaikaa pystytään solid-state -akuissa lyhentämään, sillä latausvirtaa voidaan kasvattaa nestemäiseen ja geelimäisiin akkuihin verrattuna. Lisäksi Nestemäisten ja geelimäisten akkujen turvallisuusongelmat vähenisivät huomattavasti solid-state -akkujen tuoman turvallisuuden takia. (FutureBridge 2019; Li ym. 2021)

4.2 Litium-rikkiakku (Li-S)

Chen ym. (2021) mukaan yksi tulevaisuuden käytetyistä akkukemioista on litium-rikkiakku (Li-S). Korkean energiatiheden saavuttaminen edellyttää uudentyypisten elektrodimateriaalien etsimistä. Litium toimii monessa sovelluksessa erinomaisena anodimateriaalina sen korkean teoreettisen ominaiskapasiteetin (3860 mA) ja alhaisen potentiaalinvuoksi ($E^0 = -3,04$ V). Rikin käyttäminen akun katodimateriaalina toisi korkean teoreettisen ominaiskapasiteetin (1675 mA) litiumanodiin yhdistettynä. Rikki on myös erinomainen akkumateriaali, sillä se on halpa, ympäristöystävällinen ja sitä on runsaasti saatavilla. Litium-rikkiakku voi saavuttaa jopa teoreettisesti 2500 Wh/kg energiatiheden, mikä on huomattavasti korkeampi kuin nykyisten litiumioniakkujen energiatihedät. Käytännössä toimivien litium-rikkiakkujen energiatiheys on 350 Wh/kg luokkaa.

Li-S-akut toimivat litiumin ja rikkimolekyylin välisten palautuvien sähkökemiallisten reaktioiden avulla. Litium-rikkiakun toimintaan sisältyy kaksivaiheinen muunnosprosessi purkauksen aikana. Ensiksi rikkimolekyylillä S_8 pelkistyy Li_2S_8 muotoon, josta se

muokkautuu Li_2S_4 :ksi. Tästä Li_2S_4 muuttuu kiinteiksi lyhytketjuisiksi sulfideiksi Li_2S_2 :ksi ja Li_2S :ksi. Litium-rikkiakun lopullisen eri vaiheisen muunnosprosessin kautta saadaan keskimääräinen jännite, joka on noin 2.1 V. (Chen ym. 2021)

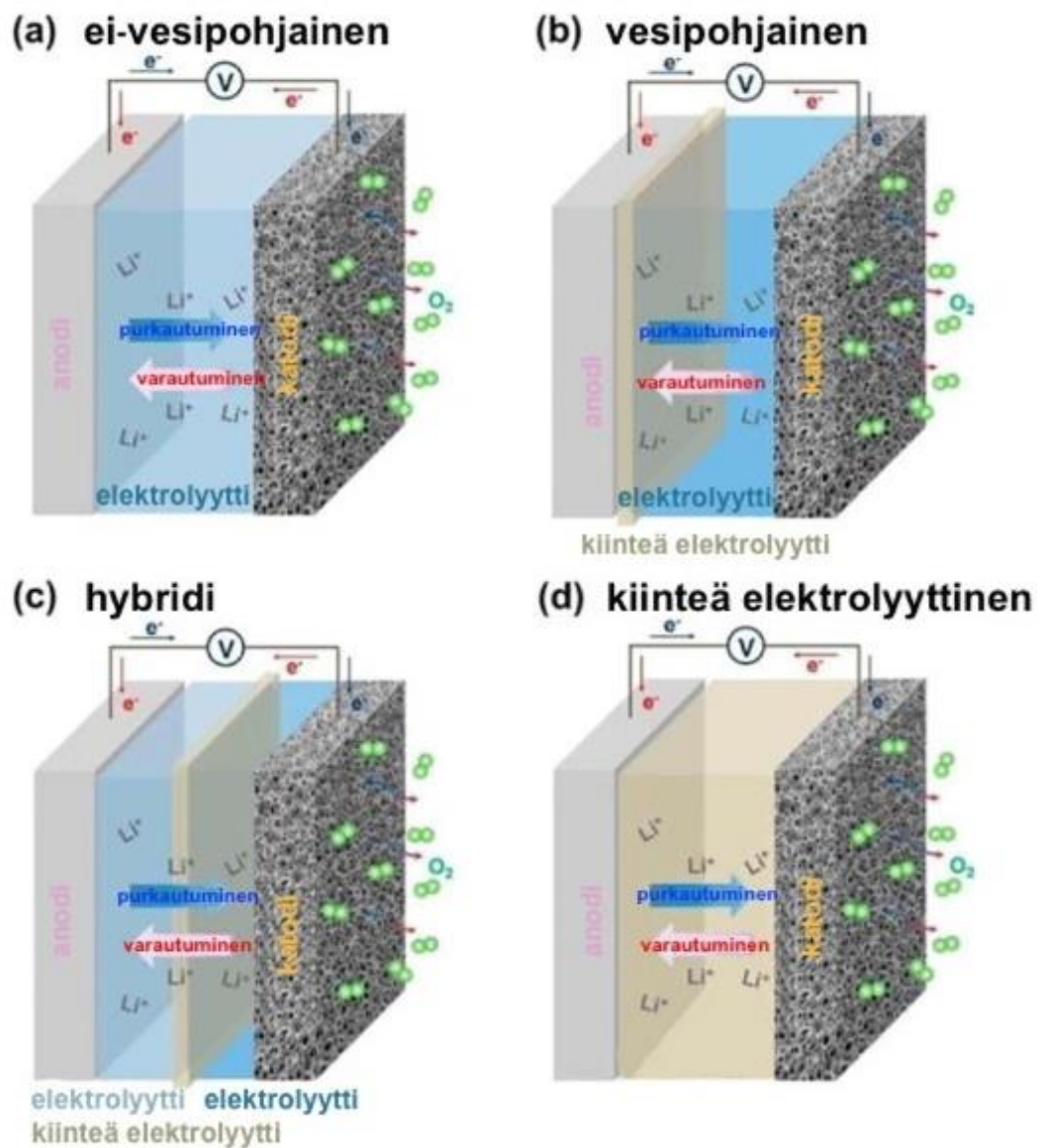
Litium-rikkiakuilla on myös muiden akkujen tavoin huonoja puolia ja haasteita. Rikillä ja litiumsulfidilla on alhainen johtavuus, sillä sekä rikki, että sen purkautunut litiumsulfidi eristävät elektroneja ja litiumioneja, mikä rajoittaa sähkökemiallista reaktiota. Tämä johtaa alhaiseen rikin käyttöön ja sitä kautta alhaiseen ominaiskapasiteettiin. Li-S akun tilavuus laajentuu muunnosprosessin aikana rikistä litiumsulfidiksi, joka johtaa syklien huonoon suorituskykyyn. Lisäksi isona haasteena on saada ratkaistua ja poistettua syklien seurauksena aiheutuva rikkikatodin liukeneminen elektrolyyttiin. Näiden haasteiden vuoksi litium-rikkiakulle on kehitetty erilaisia parantavia kehitysideoita. Näitä ovat esimerkiksi rikin sisällyttäminen elektronisesti johtavaan rakenteeseen, erottimen muokkaus, elektrolyytin optimointi, sideaineiden parantaminen ja litiummetalli anodin suojaus. (Chen ym. 2021)

Chen ym. (2021) mukaan tutkijat tekevät paljon töitä saadakseen litium-rikkiakut markkinoille. Vuonna 2008 Sion Corporation kehitti ensimmäisen Li-S-akun prototyypin, joka voi antaa virtaa miehittämättömälle lentokoneelle. Akku toimikin moitteettomasti ja miehittämätön lentokone teki maailmanennätyksen jatkuvassa lennossa yli kolmen päivän lennolla. Vuonna 2010 yhtiö pystyi rikkomaan tämän ennätyksen lentokoneen lentäessä jatkuvasti 14 päivää. Tästä ennätyksistä lähtien litium-rikkiakkuja on kehitetty monien yhtiöiden ja tutkijoiden toimesta. Esimerkiksi OXIS Energy Ltd yritys pyrkii kaupallistamaan Li-S-akkukemiaa ja ne ovatkin kehittäneet pussikennoisen litium-rikkiakun, jolla pystytään saavuttamaan noin 450 Wh/kg energiatiheys. Vaikka johtavat yritykset ovat saavuttaneet viime vuosina suuria mullistavia saavutuksia litium-akkuteknologiassa, niin akkujen käyttö rajoittuu tietyille alueille, kuten miehittämättömiin lentokoneisiin. Litium-rikkiakkujen ongelmien ratkaisu on tärkeää, jotta turvallisuusongelmat ja lataus-purkausjaksojen lukumäärä saadaan nostettua.

4.3 Litium-ilma-akku (Li-air)

Litium-ilma-akku (Li-air) on yksi tulevaisuuden varten otettavista akkukemia vaihtoehdoista. Litium-ilmakemmo koostuu litiumanodista, huokoisesta ilmakatodi

rakenteesta, erottimesta ja elektrolyytistä. Ilma pelkistyy huokoisella katodilla ja sen reaktio on erittäin monimutkainen, ettei sitä ole vielä täysin saatu selville. Litium-ilma-akut voidaan jakaa elektrolyytin perusteella 4 osaan: vesipohjaisiin, ei-vesipohjaisiin, hybrideihin ja kiinteään elektrolyytin akkuihin. Vesipohjaisiin elektrolyytteihin perustuvalla litium-ilma-akuilla on huomattavia turvallisuusongelmia. Hybridi- ja kiinteään elektrolyytin litium-ilma-akkujen rakenteet ovat niin monimutkaisia, etteivät ne sovellu suuriin sovelluksiin. Ei-vesipitoisen elektrolyytin litium-ilma-akku on tällä hetkellä parhain ja toimivin näistä neljästä. Kuvassa 4 on esitetty näiden kaikkien erityyppisten elektrolyyttien kennojen rakenteet. (Chen ym. 2022, s. 2449–2450; Wang ym. 2022, s. 1790–17921)



Kuva 4. Erityyppisten litium-ilma-akun kennojen rakenteet. (Mukaiillen Chen ym. 2022, s. 2451)

Litium-ilma-akun hyviä sähkökemiallisia suorituskykyparametreja ovat purkauskohtainen kapasiteetti, energiatiheys, latauspotentiaali ja syklien suorituskyky. Vaikka kennojen sähkökemialliset reaktiot ovat monimutkaisia, niin selville on saatu, että kennoissa tapahtuu kaksi niin kutsuttua pääreaktioita ja kaksi yleistä sivureaktiota. Näiden kahden pääreaktioiden mukaan Li-air-akkujen teoreettinen kapasiteetti on noin 1168 mAh/g ja energiatiheys on 3505 Wh/kg luokkaa. Teoriassa kaikkien neljän reaktion tapahtuessa Li-air-akku saavuttaisi erittäin suuren 10,5 kWh/l energiatiheden, joka ylittää bensiinin 9,5 kWh/l energiatiheden. Tämä tekeekin litium-ilma-akusta erityisen mielenkiintoisen tutkittavan akkuteknologian kohteen ja sen ajatellaan ratkaisevan tulevaisuuden energian varastointiongelman. Litium-ilma-akun pussikennoisen prototyypin energiatiheys on kuitenkin saatu käytännössä 500 Wh/kg, joka on esimerkiksi litiumioniakkuihin verrattuna kaksinkertainen. Teoriassa Li-air-akut voivat jatkaa purkautumista niin kauan kuin kennojen sisällä on riittävästi litiumia ja happea. Tämä saavuttaa suuren purkauskohtaisen kapasiteetin. Lisäksi litium-ilma-akun latausjännite voi olla yli 3 V. Liiallinen latausjännite voi aiheuttaa syklien tehokkuuden alenemista ja tuottaa huomattavia turvallisuusongelmia. (Chen ym. 2022, s. 2450; Wang ym. 2022, s. 17922, 17926)

Jotta litium-ilma-akkuja pystytään käyttämään tulevaisuudessa, niin sen tutkimuksessa tulee keskittyä korkean ylipotentiaalien, syklien vakauden ja hitaan kennon hapenvähentämisreaktion kanssa. Lisäksi kennoilla on ongelmana haitallisen litiumkarbonaatin syntyminen hiilidioksidista ja ylimääräinen ilman kosteus saa kennossa haitallisia sivureaktioita aikaan. Näiden ongelmien ratkaisemiseksi litium-ilma-akuissa tulee tulevaisuudessa käyttää ilmanpuhdistusjärjestelmiä, sillä ympäristössämme oleva ilmanpuhtaus ei ole tarvittavalla tasolla, jotta litium-ilma-akuilla päästäisiin laajamittaisiin ja pitkäsyklisiin sovelluksiin. Lisäksi litiumanodille kuuluu käyttää suojausta, kuten litium-rikki-akussa. Nykyiset litium-ilmaprototyypit kestävät noin 100 lataus-purkausjaksoa, jonka jälkeen akun kapasiteetti heikkenee huomattavasti. (Kurzweil ja Garche 2017, s. 78; Chen ym. 2022, s. 2451; Wang ym. 2022, s. 17920)

Li-air-akun lisäksi kehitteillä on muitakin metalli-ilma-akkuja, kuten sinkki-ilma- (Zn-air), natrium-ilma- (Na-air), magnesium-ilma- (Mg-air) ja alumiini-ilma-akkuja (Al-air). Nämä akut ovat kuitenkin monimutkaisia järjestelmiä, joilla on vastaavia ongelmia, kuin litium-ilma-akulla. Näiden tehokkuus on kuitenkin alhaista, mikä johtuu ilmaelektrodin suuresta ylipotentiaalista. (Kurzweil ja Garche 2017, s. 80; Chen ym. 2022, s. 2449)

5 UUSIA AKKURATKAISUJA

Maailmalla on paljon yrityksiä, jotka pyrkivät valmistamaan uusia akkuratkaisuja. Uudet akkuratkaisut käyttävät näitä aiemmin mainittuja uusia akkukemioita tai pyrkivät rakentamaan akut uudella tavalla. Tässä kappaleessa on esillä viimevuosina kehitettyjä uusia akkuratkaisuja kahdelta eri valmistajilta, jotka lupailaan menevän tuotantoon lähivuosina.

5.1 Sylinterimäinen 4680-kennoinen akku

Valmistajat pyrkivät kehittämään erilaisilla ja uusilla kennorakenteilla olevia akkuja. Tästä hyvä esimerkkinä on Teslan uusi sähköauton akku. Akku rakennetaan 4680-mallisista sylinterimäisistä kennoista. Sylinterimäinen kenno on 46 millimetriä halkaisijaltaan ja 80 millimetriä korkea. Teslan uuden 4680-kennoista valmistetun akun etuina on 10 prosenttia kevyempi kokonaispaino, 6-kertainen tehon lisäys, 5-kertainen energian lisäys ja lisäksi se lisää uusien Teslan sähköautojen toimintamatkaa 16 prosenttia. (Tesla 2020, Jin ym. 2023, s. 154)

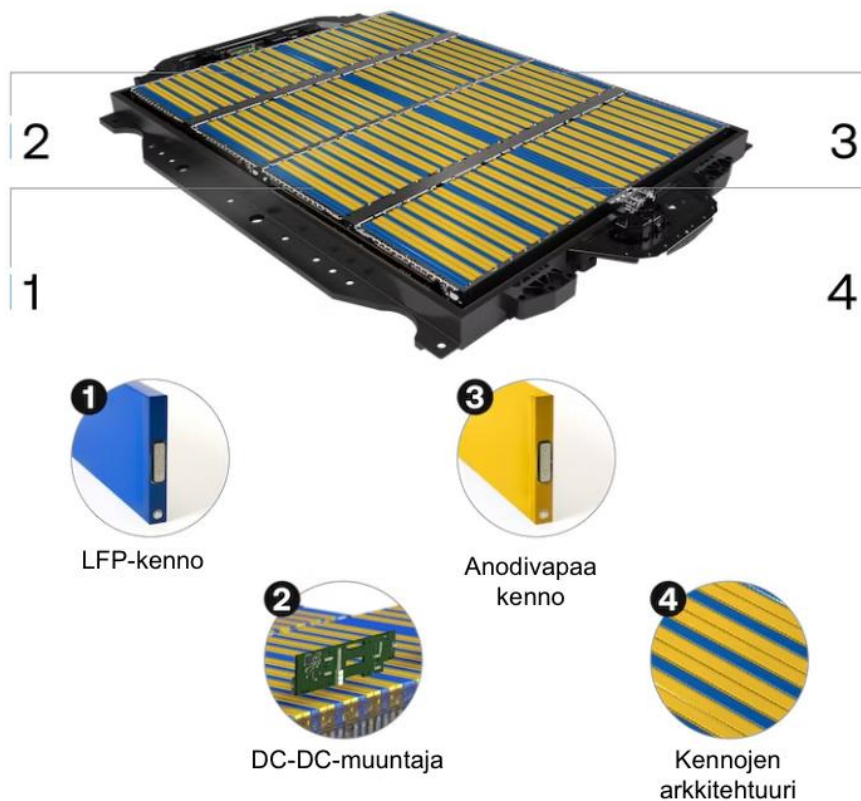
Sylinterimäiset 4680-kennot asennetaan Teslan akkurakenteessa kevyeen polyuretaanikehikkoon, joka on koteloitu alumiini- ja teräslevyjen väliin. Tämä mahdollistaa sen, että akkupakkausta pystytään käyttämään osana korirakennetta. Akkurakenteen mekaaniset ominaisuudet kestävät erilaiset rasitus ja kuormitustilanteet. Tesla pyrkii myös kehittämään akkupakkausta paremmaksi, ja sen yksi tuleva innovaatio on koteloida kennot hiilikuidusta valmistettuun kehikkoon. (Jin ym. 2023, s. 154)

Tesla pyrkii myös kehittämään uuden käyttävän kennotyyppin, joka käyttää kuivaa elektroditeknologiaa. Kennotyyppi perustuu pitkälti kiinteän elektrolyytin akkukemiaan, jossa on myös yhdistetty kuivan elektrodin tekniikka. Kuiva elektroditekniikka korvaa monimutkaisen elektrodin pinnoitusvaiheen. Normaalisissa pinnoitusvaiheissa elektrodi pinnoitetaan märällä kemiallisella lietteellä. Tämä pinnoitusvaihe on kuivassa elektrodivalmistuksessa korvattu uudella kuivausprosessilla. Prosessi ei ainoastaan yksinkertaista elektrodin valmistusprosessia, vaan voi rakentaa uudelleen elektrodien mikrorakenteita ja parantaa akun suorituskykyä. Alhaisempien tuotantokustannuksien ja parannetun suorituskyvyn lisäksi se on ympäristöystävällisempi valmistustapa. Kuivalla elektroditekniikalla voidaan myös valmistaa kiinteän elektrolyytin akkuja paljon

pienemmillä sideainepitoisuuksilla. Tällä teknologialla pyritään saavuttamaan yli 400 Wh/kg energiatiheys. (Lu ym. 2022, s. 877)

5.2 Gemini-akku

Our Next Energy (ONE) on kehittänyt markkinoille sähköautoille uuden Gemini-nimellä kulkevan akkuratkaisun. Uusi Gemini-akkuteknologia ylittää noin tuhannen kilometrin toimintamatkaan yhdellä latauksella. Täten akkuteknologia on todella lupaava vaihtoehto uusiin sähköautoihin. Lisäksi valmistaja lupaa akun energian olevan 185 kWh. Akku on rakennettu kahta kennotyyppiä käyttäen. Kennot jakautuvat akussa toimintatarkoituksen perusteella kahteen osioon. Toinen kenno-osio on rakennettu käyttämällä perinteistä litium-rautafosfaattikennoa (LFP). Litium-rautafosfaattikennot toimivat päivittäisessä ajossa. Kennon toinen osio on rakennettu puolestaan anodivapaasta kennorakenteesta, joka toimii pidempiä matkoja varten. Gemini-akussa oleva DC-DC-muuntaja siirtää kahden eri kennotyyppin välistä energiaa saumattomasti ja kennojen arkkitehtuuri vähentää myös huomattavasti lämpökarkausriskiä. Kuvassa 5 on esitetty Gemini-akun rakenne. (Our Next Energy 2023)



Kuva 5. Gemini-akun rakenne. (Mukaiillen Our Next Energy 2023)

Our Next Energy:n (2023) mukaan anodivapaan kennon rakenne muodostuu siten, että virtakeräimeen muodostuu pieniä määriä litiumlevyä akun purkautuessa ja latautuessa. Tämä prosessi muodostaa anodittoman akun anodin. Anodivapaa akkukemia alentaa valmistuskustannuksia merkittävästi, sillä anodin ja sen raaka-aineiden, kuten grafiitin käyttöä ei tarvita. Akuissa käytetään mangaanipitoisia katodeja, jotka alentavat kustannuksia merkittävästi. Lisäksi Gemini-akussa pyritään vähentämään voimakkaasti harvinaisten ja kalliiden metallien, kuten koboltin ja nikkelin käyttöä, joka on myös paljon ympäristöystävällinen ratkaisu.

6 YHTEENVETO

Akku koostuu neljästä rakenteen osasta: katodista, anodista, erottimesta ja elektrolyytistä. Katodi ja anodi ovat akun kaksi elektrodia, joissa tapahtuu sähkökemiallinen hapettumis-pelkistymisreaktio. Tämä hapettumis-pelkistymisreaktio saa aikaan sen, että akun elektrodeihin kytkettyyn ulkoiseen sähköpiiriin syntyy sähkövirta. Katodilla tapahtuu akkua purettaessa pelkistymisreaktio eli katodi vastaanottaa elektrodeja. Anodilla puolestaan tapahtuu hapettumisreaktio eli anodi luovuttaa elektrodeja. Erotin erottaa akun elektrodit toisistaan, jotta ne eivät kosketa toisiaan, ja täten estää akussa kennon sisäisen oikosulun tapahtumista. Elektrolyytti johtaa ioneja ja lisäksi se nopeuttaa akuissa tapahtuvia sähkökemiallisia reaktioita kulumatta itse reaktioissa. Akuissa tapahtuva hapettumis-pelkistymisreaktio tapahtuu akkua purettaessa spontaanisti eli itsestään. Akkua ladattaessa sähkökemiallinen hapettumis-pelkistymisreaktio on pakotettu, jotta akun varaus voidaan ladata uudelleen täyteen.

Akun sähkökemialliseen nopeuteen vaikuttaa monet eri tekijät, mutta määräävin tekijä on elektrodien potentiaaliero eli jännite-ero. Potentiaalieroon vaikuttaa katodien ja anodien materiaali. Alkuaineiden kykyä toimia hapettimena ja pelkistimenä kuvaa normaalipotentiaaliarvo E^0 . Jos akun normaalipotentiaaliarvo on suurempi kuin 0 V, reaktio tapahtuu spontaanisti. Metallien jännitesarja kuvaa myös hyvin alkuaineiden hapettumis- ja pelkistymisreaktiivisuutta.

Akun ominaisuuksia pystytään vertailemaan monella eri tapaa. Akun halutaan olevan kapasiteetiltaan (Ah), energialtaan (Wh), lataus-purkausjaksojen lukumäärältään, painoltaan ja fyysisiltä mitoiltaan erinomaisia sille soveltuville käyttökohteille. Akuissa ei haluta, että niissä olisi muisti-ilmiötä. Muisti-ilmiössä akun kapasiteetti rajoittuu tietyille alueille. Lisäksi akkuja rajoittaa ylikuumenemisen riski latauksen aikana. Tärkein akkuja vertaillaessa on energiatiheys. Se mittaa koko akkusysteemiin varastoituneen energian suuruutta kilogrammaa kohden Wh/kg tai energian suuruutta tilavuutta kohden Wh/l. Suurimmat energiatihedeltään olevat akut soveltuvat erinomaisesti nykyaikaisten sähköautojen käyttöön.

Nykyaikana on useampia akkuteknologioita saatavilla, jotka käyttävät erilaisia akkukemioita. Eri akkukemiat soveltuvat sopiville käyttökohteille. Yksi käytetyimpiä akkuteknologioita nykypäivänä ovat kuitenkin litiumioniakut, joiden energiatiheys on

korkea. Litiumioniakkuja käytetään laajasti kuluttajien käytössä niin pienakkutuotannossa, kuin sähköauton akkuina. Suorituskyky, hinta, kemia ja turvallisuusominaisuuden vaihtelevat kuitenkin paljon eri litiumioniakkutyypin välillä. Litiumioniakkujen ominaisuudet ovat kuitenkin sen verran paremmat, jonka vuoksi niitä valmistetaan huomattavasti enempi muihin nykypäivän akkukemioihin verrattuna.

Uusia akkuratkaisuja tarvitaan kuitenkin kipeästi kasvavan energian varastoinnin ja liikenteen sähköistymisen vuoksi. Tarvitsemme tehokkaampia, suorituskykyisempiä ja energiatihedeltään parempia akkuja. Tutkijat ja erilaiset yritykset pyrkivät etsimään monenlaisia uusia akkuteknologioita ja akkuteknillisiä ratkaisuja. Uusia akkuratkaisuja on löytynyt vuosien saatossa, ja ne ovat ottaneet huomattavia kehitysaskelia. Lupaavampia akkuteknologioita on solid-state -akut eli kiinteän elektrolyytin akut, litium-rikkiakut (Li-S) ja litium-ilma-akut (Li-air). Nämä kaikki akkuteknologiat ovat prototyyppinä saavuttaneet huomattavia parannuksia verrattuna nykypäivänä käytettyyn litiumioniakkuihin verrattuna. Esimerkiksi energiatiheys on korkeampi kuin nykypäivän akkuteknologioissa. Kaikissa näissä uusissa akkuteknologioissa on kuitenkin ongelmia ja niiden ratkaisemiseksi joudutaan tekemään lähitulevaisuudessa paljon töitä.

Akkuja voidaan rakentaa useista kennotyypeistä. Näitä kennotyyppejä yritykset ja tutkijat pyrkivät hyödyntämään, jotta akku olisi suorituskykyisempi ja tehokkaampi. Näiden avulla on pystytty valmistamaan parempia akkuja liikenteen sähköistymisen hyväksi ja sähköautojen toimintamatkaa pystytään nostamaan useilla sadoilla kilometreillä. Uudet akkuratkaisut myös yhdistävät muitakin ominaisuuksia, kuten mekaanisten ominaisuuksien parantuessa niitä pystytään käyttämään auton korin rakenteena.

Lähitulevaisuudessa on tulossa uusia akkuteknologioita kuluttajien käyttöön, jotka vauhdittavat ja parantavat erityisesti sähköisen liikenteeseen siirtymisessä. Akkujen kehittäminen on työlästä ja aikaa vievää. Kehittämisprosessissa on huomioitava monenlaisia asioita, kuten akkujen raaka-aineiden ympäristöystävällisyys on otettava huomioon, akun toiminta tulee saada halutulle tasolle ja akku tulee toimia myös turvallisesti kuluttajien käytössä.

LÄHDELUETTELO

Ahoranta, J., 2016. Sähkötekniikka. 15., uudistettu painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy, 336 s. ISBN 978-952-63-0101-3

Buchmann, I., 2021a. BU-104: Getting to Know the Battery – Battery University [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://batteryuniversity.com/article/bu-104-getting-to-know-the-battery> [viitattu 16.2.2023].

Buchmann, I., 2021b. BU-306: What is the function of the Separator? – Battery University [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://batteryuniversity.com/article/bu-306-what-is-the-function-of-the-separator> [viitattu 16.2.2023].

Buchamm, I., 2021c. BU-307: How does electrolyte work? – Battery University [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://batteryuniversity.com/article/bu-307-how-does-electrolyte-work> [viitattu 19.2.2023].

Buchamm, I., 2021d. BU-301a: Types of Battery Cells – Battery University [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://batteryuniversity.com/article/bu-301a-types-of-battery-cells> [viitattu 20.2.2023].

Buchamm, I., 2021e. BU-105: Battery Definitions and what they mean – Battery University [verkkodokumentti]. Saatavissa <https://batteryuniversity.com/article/bu-105-battery-definitions-and-what-they-mean> [viitattu 27.2.2023].

Buchmann, I., 2021f. BU-205: Types of Lithium-ion – Battery University [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion> [viitattu 6.3.2023].

Buchmann, I., 2021g. BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries – Battery University [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://batteryuniversity.com/article/bu-107-comparison-table-of-secondary-batteries> [viitattu 6.3.2023].

Chen, Y., Wang, T., Tian, H., Su, D., Zhang, Q. and Wang, G., 2021. Advances in Lithium–Sulfur Batteries: From Academic Research to Commercial Viability. *Advanced Materials*, vol. 33 (29).

Chen, Y., Xu, J., He, P., Qiao, Y., Guo, S., Yang, H. and Zhou, H., 2022. Metal-air batteries: progress and perspective. *Science Bulletin*, vol. 67 (23), S. 2449–2486.

FutureBridge, 2019. Solid-State Batteries, A possible replacement for conventional liquid lithium-ion batteries in electric vehicles [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.futurebridge.com/blog/solid-state-batteries/> [viitattu 20.3.2023].

Jin, T., Singer, G., Liang, K. and Yang, Y., 2023. Structural batteries: Advances, challenges and perspectives. *Materials Today*, vol. 62, S. 151–167.

Kurzweil, P. & Garche, J., 2017. 2 - Overview of batteries for future automobiles. Teoksessa: Garche, J., Karden, E., Moseley, P., Rand, D. (toim.) *Lead-Acid Batteries for Future Automobiles*. Iso-Britannia: Elsevier, S. 27–96. ISBN 978-044463700-0

Li, C., Wang, Z.-Y., He, Z.-J., Li, Y.-J., Mao, J., Dai, K.-H., Yan, C. & Zheng, J.-C., 2021. An advance review of solid-state battery: Challenges, progress and prospects. *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 29.

Liljeblad, A., Heinonen, P., Luukko, P. & Turpeenoja, L. 2022. Mooli: 5, KE5 Kemiallinen energia ja kiertotalous. 1. painos. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Otava. 242 s. ISBN 978-951-1-38146-4

Lu, Y., Zhao, C.-Z., Yuan, H., Hu, J.-K., Huang, J.-Q. and Zhang, Q., 2022. Dry electrode technology, the rising star in solid-state battery industrialization. *Matter*, vol 5 (3), S. 876–898.

Murtomäki, L., Kallio, T., Lahtinen, R. & Kontturi, K. 2010. *Sähkökemia*. 2. korj. p. Espoo: Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu. Kemian laitos, 210 s. ISBN 978-952-60-3384-6

Motiva Oy, 2020. Akut, akkujen luokittelu [verkkodokumentti]. Helsinki: Motiva Oy. Saatavissa:

https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/akut [viitattu 5.3.2023].

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J. 2008. Tekniikan kaavasto: Matematiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä. 20. painos. Tampere: Tammertekniikka. 208 s. ISBN 978-952-5491-48-7

Oh, P., Yun, J., Choi, J. H., Saqib, K. S., Embleton, T. J., Park, S., Lee, C., Ali, J., Ko, K. & Cho, J., 2022. Development of High-Energy Anodes for All-Solid-State Lithium Batteries Based on Sulfide Electrolytes. *Angewandte Chemie - International Edition*, vol. 61 (25).

Our Next Energy, 2023. Gemini™ | Our Next Energy [verkkodokumentti]. Yhdysvallat: Our Next Energy. Saatavissa: <https://one.ai/batteries/gemini> [viitattu 27.3.2023].

Qi, W., Shapter, J.G., Wu, Q., Yin, T., Gao, G. & Cui, D., 2017. Nanostructured anode materials for lithium-ion batteries: Principle, recent progress and future perspectives. *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 5, no. 37, S. 19521-19540.

Qiao, H. & Wei, Q., 2012. Functional nanofibres in lithium-ion batteries. Teoksessa: Wei, Q. (toim.) *Functional nanofibers and their applications*. Iso-Britannia: Elsevier, S. 197-208. ISBN 978-0-85709-069-0

Rahardian, S., Budiman, B. A., Lebdo Sambegoro, P. and Nurprasetio, I. P., 2019. Review of Solid-State Battery Technology Progress. Teoksessa: ICEVT 2019 - Proceeding: 6th International Conference on Electric Vehicular Technology 2019. S. 310–315. ISBN 978-1-7281-2917-4

Tesla, 2020. Battery day presentation [verkkodokumentti]. Yhdysvallat: Tesla. Saatavissa: <https://tesla-share.thron.com/content/?id=96ea71cf-8fda-4648-a62c-753af436c3b6&pkey=S1dbei4> [viitattu 28.3.2023].

Wang, J., Zheng, J. and Liu, X., 2022. The key to improving the performance of Li-air batteries: recent progress and challenges of the catalysts. *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 24 (30), S. 17920–17940.

Xiong, R. & Shen, W., 2019. *Advanced battery management technologies for electric vehicles*. USA: John Wiley & Sons. 400 s. ISBN 9781119481676

NORMAALIPOTENTIALIALEJA

Normaalipotentialiarvot mitattu +25 °C:ssa normaalivetyelektrodiin NHE nähden.

Pelkistymisreaktio	Normaalipotentiali E^0/V
$\text{Li}^+ + e^- \rightarrow \text{Li}$	-3,05
$\text{K}^+ + e^- \rightarrow \text{K}$	-2,93
$\text{Ca}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Ca}$	-2,87
$\text{Na}^+ + e^- \rightarrow \text{Na}$	-2,71
$\text{Mg}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Mg}$	-2,37
$\text{Al}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Al}$	-1,66
$\text{Mn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Mn}$	-1,18
$2 \text{H}_2\text{O} + 2e^- \rightarrow 2 \text{OH}^- + \text{H}_2$	-0,83
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Zn}$	-0,76
$\text{Cr}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Cr}$	-0,74
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Fe}$	-0,44
$\text{Cd}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cd}$	-0,40
$\text{PbSO}_4 + 2e^- \rightarrow \text{Pb} + \text{SO}_4^{2-}$	-0,35
$\text{Co}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Co}$	-0,28
$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Ni}$	-0,25
$\text{Sn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Sn}$	-0,14
$\text{Pb}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Pb}$	-0,13
$2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{H}_2$	-0,00
$\text{Sn}^{4+} + 2e^- \rightarrow \text{Sn}^{2+}$	+0,15
$\text{Cu}^{2+} + e^- \rightarrow \text{Cu}^+$	+0,15
$\text{SO}_4^{2-} + 4 \text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3 + 2 \text{H}_2\text{O}$	+0,20
$\text{AgCl} + e^- \rightarrow \text{Ag} + \text{Cl}^-$	+0,22
$\text{Hg}_2\text{Cl}_2 + 2e^- \rightarrow 2\text{Hg} + 2\text{Cl}^-$ (kyll. KCl)	+0,22
$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$	+0,34
$\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4e^- \rightarrow 4 \text{OH}^-$	+0,40
$\text{Cu}^+ + e^- \rightarrow \text{Cu}$	+0,52
$\text{I}_2 + 2e^- \rightarrow 2 \text{I}^-$	+0,53
$\text{Fe}^{3+} + e^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0,77
$\text{Hg}_2^{2+} + 2e^- \rightarrow 2 \text{Hg}$	+0,79
$\text{Ag}^+ + e^- \rightarrow \text{Ag}$	+0,80
$\text{NO}_3^- + 4\text{H}^+ + 3e^- \rightarrow \text{NO} + 2 \text{H}_2\text{O}$	+0,96
$\text{AuCl}_4^- + 3e^- \rightarrow \text{Au} + 4 \text{Cl}^-$	+1,00
$\text{Br}_2 + 2e^- \rightarrow 2 \text{Br}^-$	+1,07
$\text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4e^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,23
$\text{MnO}_2 + 4 \text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,23
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14 \text{H}^+ + 6e^- \rightarrow 7 \text{Cr}^{3+} + 7 \text{H}_2\text{O}$	+1,23
$\text{Cl}_2 + 2e^- \rightarrow 2 \text{Cl}^-$	+1,36
$\text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,46
$\text{Au}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Au}$	+1,50
$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5e^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 4 \text{H}_2\text{O}$	+1,52
$\text{PbO}_2 + \text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,68
$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,52
$\text{Co}^{3+} + e^- \rightarrow \text{Co}^{2+}$	+1,82
$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2e^- \rightarrow 2 \text{SO}_4^{2-}$	+2,01
$\text{F}_2 + 2e^- \rightarrow 2 \text{F}^-$	+2,87

Hapettimen vahvuus kasvaa (alaspäin)
Pelkistimen vahvuus kasvaa (yläpäin)

Kuva 6. Normaalipotentialitaulukko (Mäkelä ym. 2008, s. 197)