

Opinnäytetyö (AMK)

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

Autotekniikka

2021

Samuli Rautiainen

SÄHKÖAUTOJEN ERILAISET AKKUKEMIAT

– nyt ja tulevaisuudessa

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka | Ajoneuvotekniikka

2021 | 24 sivua + 1 liite

Ohjaaja: Ikonen Markku

Samuli Rautiainen

SÄHKÖAUTOJEN ERILAISET AKKUKEMIAMAT

– nyt ja tulevaisuudessa

Tämän opinnäytetyön aiheena on tällä hetkellä käytössä olevien ja jo mahdollisesti lähitulevaisuudessa käyttöön tulevien sähköauton akkujen ja akkukemioiden vertailu. Vertailu kohdistuu pääasiassa akkujen suorituskykyyn ja niiden sopivuuteen olosuhteissa, joihin ne tyypillisesti altistuvat nykyaikaisissa ajoneuvoissa.

Tällä hetkellä vallalla olevien akkutyyppeiden perusteella tutkinnasta voidaan jättää pois suuri osa vanhahtavia akkuratkaisuja kuten lyijyakut ja mobiililaitteille tai muille pienlaitteille suunnitellut akut, joiden teholuokitukset ja syklikestävyys eivät riitä nykyaikaiselle henkilöautolle.

Pääosan tutkielmassa saavat eri akkukemioihin perustuvat litiumioniakut, jotka hallitsevat tällä hetkellä tuotannossa olevien sähköautojen maailmaa ja mahdolliset tulevaisuuteen tähtäävät ratkaisut, joilla pyritään entistä kilpailukykyisempiin ominaisuuksiin kapasiteetin, kestävyuden, latausnopeuden ja hinnan osalta.

Lähitulevaisuuden kannalta litiumioniakut ovat tulleet jäädäkseen erinomaisen hinta-laatusuhteensa ansiosta. Markkinoilta kuitenkin löytyy osa-alueita, joista suolaioniakut ja solid-state-akut tulevat varmasti valtaamaan itselleen alaa.

ASIASANAT:

Sähköauto, akku, akkukemia, litiumioni, solid-state

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Automotive and Transportation Engineering | Automotive Engineering

2022 | 24 pages, 1 Appendix

Supervisor: Ikonen Markku

Samuli Rautiainen

DIFFERENT BATTERY CHEMISTRIES IN ELECTRIC CARS

– Now and in the Future

The topic of this thesis is a comparison of electric car batteries and battery chemistries that are currently in use and may be in use in the near future. The comparison focuses mainly on the performance of batteries and their suitability for the conditions to which they are typically exposed in modern vehicles.

Based on current battery types, a large number of obsolete battery solutions can be excluded from the investigation. These solutions cover lead-acid batteries and batteries designed for mobile devices or other small devices with insufficient power ratings and cycle life for a modern passenger car.

The main focus of this report will be on lithium-ion batteries based on different battery chemistries, which dominate the world of electric car batteries currently in production. In addition, there will be comparisons and thoughts on possible future-oriented solutions aimed at more competitive features in terms of capacity, durability, charging speed and price.

For the near future, lithium-ion batteries have come to stay, thanks to their excellent price-performance ratio. However, there are some market areas where sodium-ion batteries and solid-state batteries will take their place in the industry.

KEYWORDS:

Electric car, battery, battery chemistry, lithium-ion, solid-state

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO	5
1 JOHDANTO	6
2 SIIRTYMINEN SÄHKÖAUTOIHIN	7
2.1 Syyt siirtymiseen	7
2.2 Siirtymistä hidastavat tekijät	8
2.3 Sähköautoilusta syntyvät päästöt	8
2.4 Tulevaisuuden mahdollisuudet	10
3 KÄYTÖSSÄ OLEVAT AKKUKEMIAMAT	12
3.1 Litiumioniakun toimintaperiaatte	12
3.2 Akkukemian valinta	13
3.2.1 NMC, Litium-Nikkeli-Mangaani-Kobolttioksidi	13
3.2.2 NCA, Nikkeli-Koboltti-Alumiinioksidi	14
3.2.3 LMO Litium-Mangaanioksidi	15
3.2.4 LCO Litium-Kobolttioksidi	16
3.2.5 LTO Litium-Titanaattioksidi	17
3.2.6 LFP Litium-Rautafosfaatti	19
3.2.7 Solid State Battery	20
3.2.8 Na-Ion, Suola-ioniakku	21
4 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET	23
LÄHTEET	24

LIITTEET

Liite 1. Volvo XC40 Elinkaaritutkimustulokset

KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

Energiatiheys	Systeemiin varautunut energia tiettyä tilavuus- tai massayksikköä kohden. Akuissa voidaan tyypillisesti puhua kummatakin, kun suhteutetaan kWh-määrä joko akun massaan tai tilavuuteen. Nämä ovat kuitenkin kaksi eri asiaa.
ICE	Internal Combustion Engine, polttomoottori
kWh	Energian yksikkö, kilowattitunti
NVH	Noise, Vibration and Harshness. Ajoneuvon käytöstä syntyvä melu, värinä ja epämukavuus.
Solid-state-akku	Kiinteällä akkukennolla varustettu kiinteäelektrolyyttinen akku
Well-to-wheel	Kuvaa ajoneuvossa käytettävän energian koko elinkaarta raaka-aineen hankinnasta loppukäyttöön saakka. Öljyn tapauksessa se tarkoittaa prosessia ja sen päästöjä öljyn maasta kaivamisesta siihen hetkeen, kun jalostettu polttoaine on löytänyt tiensä kuluttajalle ja se käytetään kulkuneuvossa tekemään kineettistä työtä.

1 JOHDANTO

Kiinnostus tämän opinnäytetyön kirjoittamiseen syntyi, koska maailma, ja varsinkin autoala, on tällä hetkellä suuren muutoksen äärellä ilmastonmuutoksen hillitsemisen ja kallistuvien polttoainehintojen edessä.

Opinnäytetyössä esitellään aluksi syitä siihen, miksi sähköautoihin siirtyminen olisi järkevää ja toisaalta myös miksi siirtyminen on ollut hidasta. Lopuksi vertaillaan kahdeksaa sähköautoilun alalla vahvimmin edustettua akkutyyppeä, joille tulevaisuus näyttäisi kirkkaimmalta.

Tarkoituksena on myös tarkastella, olisiko mahdollista löytää universaalisti sellaista hyvää akkuratkaisua, joka toimisi suurimmassa osassa sähköautoja tarjoten optimaaliset ominaisuudet kuluttajan ja ympäristön kannalta. Mutta joillakin akkutyypeillä saattaa olla vielä laajamittaisesti hyödyntämättömiä erityispiirteitä, joiden ansiosta jotkin akkukemiat saattaisivat sopia juuri johonkin tiettyyn käyttötarkoitukseen muita paremmin, mikäli ideaaliakkua ei ole.

Yleisimmät ajoneuvoissa käytettävät akkutyypit ovat lyijy-, nikkeli- ja litiumionimakut, kun huomioon otetaan myös sähköautojen lisäksi polttomoottorilla varustettujen autojen käynnistysakut. Nykypäivänä aika on jo kuitenkin jättänyt taakseen lyijy- ja nikkeliakut sähköautojen päävoimanlähteinä, joten työssä käsitellään pääasiassa litiumpohjaisia akkuja, joille ominainen suuri energiatiheys näyttäisi olevan vastaus nykypäivän ja lähitulevaisuuden akkuhaasteisiin.

2 SIIRTYMINEN SÄHKÖAUTOIHIN

2.1 Syyt siirtymiseen

Puhtaasti kuluttajan kannalta autoala on kuin mikä tahansa muukin teknologian ala, jossa kuluttaja haluaa aina entisestään parempia tuotteita, yhtä hyvä kuin edellinen tuote ei välttämättä enää riitä. Autoteollisuudessa käytetään usein englannin kielessä lyhennettä NVH, Noise, Vibration and Harshness kun kuvaillaan ajoneuvon käytöstä syntyvää melua, tärinää ja epämukavuutta.

Tämän päivän kuluttaja osaa vaatia näiltä osa-alueilta entistä enemmän parannuksia, jotta ajoelämys olisi erinomainen ja laatuvaikutelma mahdollisimman korkea hankkiesaan uutta autoa. Sähköauton etuja ovat meluttomuus, pakokaasuttomuus ja hyvä hyötysuhde. (Bauer 2003, 639). Sähköautojen käytettävyyden kannalta yksi suurimmista eduista on myös, että sähköauton voimansiirtoon ei tarvita vaihteistoa eikä kytintä, koska sähkömoottori voidaan käynnistää kuormitettuna. Sähkömoottori pystyy antamaan täyden vääntömomentin heti nollapyörintänopeudesta eteenpäin.

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi myös Suomessa on tuotu esiin lakiehdotuksia, joilla pyritään vähentämään kasvihuonepäästöjä kohti hiilineutraalia tulevaisuutta. Liikenteen kasvihuonekaasupäästöjä voidaan vähentää yksityisautoilun aiheuttamien päästöjen osalta erilaisten verojen ja maksujen avulla. Puhtaasti fiskaalisten tavoitteiden lisäksi ajoneuvojen verotusta koskevan lainsäädännön avulla kuluttajia ohjataan valitsemaan vähän polttoainetta kuluttavia automalleja hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi ja energian säästämiseksi. (Finlex 2021a.)

Kyseinen lakiehdotus johti myöhemmin ilmastolakiin, jonka tavoitteena on varmistaa osaltaan Suomea sitovista sopimuksista sekä Euroopan unionin lainsäädännöstä johtuvien kasvihuonekaasujen vähentämistä ja seuranta koskevien velvoitteiden täyttyminen. Toisena merkittävänä päämääränä laille on vähentää ihmisen aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä ilmakehään ja pyrkiä kansallisin toimin osaltaan hillitsemään ilmastomuutosta ja sopeutua siihen. (Finlex 2021b.)

2.2 Siirtymistä hidastavat tekijät

Vielä kirjoitushetkellä sähköautojen kysyntä ja tarjonta ovat hyvinkin lapsenkengissä, eivätkä nämä kohtaa toisiaan optimaalisella tavalla. Tarjonnan kannalta monen autovalmistajan on ollut vaikeaa saada markkinoille rahallisesti kannattavaa tuotetta, jossa yhdistyy kuluttajalle sopiva kantama, tälle sopivaan hintaan. Autonostajien vertailu kohdistuu ensisijaisesti kuluttajalle tuttuihin bensiini-, diesel- tai hybridimalleihin, joiden hankintahinnat ovat edelleen edullisempia.

Monen sähköauton ja potentiaalisen autonostajan välistä löytyy kuitenkin myös lähes ylitsepääsemätön ennakkoluulojen muuri. Autoalan Tiedotuskeskuksen teettämän kyselyn mukaan suuri osa kyselyyn vastanneista näkee sähköautoilun suurimmiksi ongelmiksi latauspisteiden saatavuuden, auton hankintahinnan ja auton toimintamatkan riittävyyden. [3] Tällaista ensivaikutelmaa on vaikeaa muuttaa, vaikka uusia latausasemia rakennetaan lisää kaiken aikaa ja vanhoja päivitetään tehokkaammiksi. Kirjoitushetkellä Suomen myydyimpien sähköautojen, kuten Volkswagen ID.4:n ja Tesla Model 3:n toimintamatkat ovat molemmat yli 400 km täydellä latauksella, joka on objektiivisesti paljon enemmän kuin mitä suurin osa autonomistajista tarvitsee päivittäisessä ajossa.

2.3 Sähköautoilusta syntyvät päästöt

Sähköautojen tuotannosta, käytöstä ja käytöstä poistosta syntyy päästöjä samalla tavalla kuin polttomoottorillakin varustetusta autosta. Vaikka sähköauton valmistuksessa kuluukin akuston tuotannon vuoksi raaka-aineita ja energiaa suhteessa polttomoottoriautoa enemmän, ero alkaa kuitenkin kääntyä sähköauton eduksi, kun sillä aletaan ajaa kilometrejä.

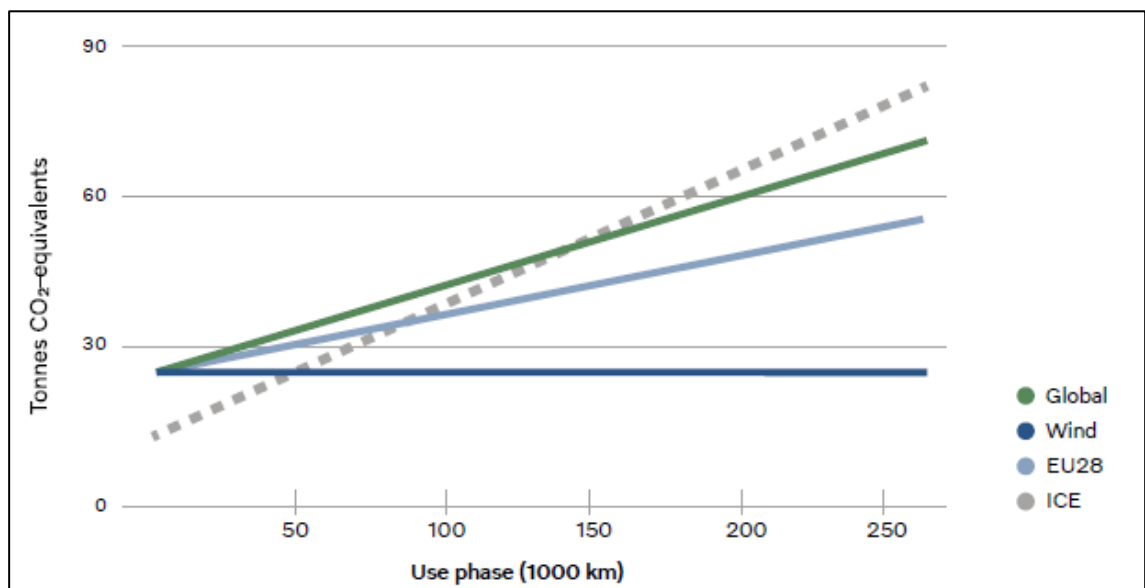
Volvo julkaisi vertailevan tutkimuksensa tulokset 2021, jossa valmistaja tutki Volvo XC40 -mallin hiilidioksidipäästöjä ajoneuvon koko elinkaaren ajalta, metallinjalostuksesta käytön jälkeiseen kierrätykseen asti.

Vertailussa käytettiin bensiinimoottorilla varustettua XC40:tä sekä sähkömoottorilla varustettua XC40 Recharge -mallia, jotka ovat voimansiirtoa lukuun ottamatta käytännössä identtisiä tällä hetkellä myynnissä olevia automalleja.

Lähtöarvoina tutkimuksessa oli, että auton elinkaareksi ajatellaan 200 000 km ajosuoritetta, ja että bensiiniauton päästölukemat ovat malliston keskimääräinen 163 g/km, mikä vastaa 7 litran kulutusta sadalla kilometrillä ja sähköautolle realistinen 24 kWh sähkönkulutus sadalla kilometrillä. Tutkimuksen lopputuloksesta näkee selkeästi, että sähköauton päästöt sen koko elinkaaren aikana ovat bensiiniautoa matalammat valituista sähköntuotantovaihtoehdoista riippumatta (ks. liite 1).

Sähköntuotantovaihtoehtoina on käytetty globaalin sähköntuotannon keskimääräisiä päästöjä, EU:ssa tuotetun sähkön päästölukemia sekä lähes päästötöntä tuulivoimaa mutta lopputulos on sama. Vaikka lähteenä valmistajan oma tutkimus ei välttämättä aina antaisi parasta ja puolueettominta kuvaa todellisuudesta, täytyy kuitenkin muistaa, että kyseessä on kuitenkin valmistaja, joka pyrkii myymään kumpaakin tuotetta asiakkaille. (ICCT 2010.)

Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston, EPA:n (Environmental Protection Agency), mukaan öljyntuotannon well-to-wheel -prosessin kokonaishiilidioksidipäästöistä noin 18 % syntyy öljyn esiin saamisesta maaperästä ja sen jalostuksesta ja kuljetuksesta kuluttajille. Mikäli koko öljynjalostusprosessi voitaisiin katkaista irti maantieliikenteen polttoainetarpeista, vapautuisi maailmanlaajuisesta logistiikkaketjusta suunnaton määrä säästöjä ja sen seurauksena päästöt ja ympäristövahingot vähentyisivät. (Volvo 2021.)



Kaavio 1. Ajoneuvon tuotannosta ja käytöstä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt (Volvo 2021)

Myös pienemmässä mittakaavassa, Suomessa, päästöjä voitaisiin karsia huomattavasti, jos ajoneuvoikohtaiset päästöt saataisiin alas. Liikenne tuottaa Suomessa noin 40 prosenttia päästökaupan ulkopuolisen sektorin kasvihuonekaasupäästöistä, minkä vuoksi liikenteellä on erittäin keskeinen merkitys Suomen kansallisten päästövähennystavoitteiden saavuttamisessa. Tonneina kotimaan liikenne aiheuttaa Suomessa vuosittain noin 11 miljoonan tonnin kasvihuonekaasupäästöt, joista yli 90 prosenttia syntyy tieliikenteessä.

Tieliikenteen päästöt ovat kuitenkin vähentyneet viime vuosina. Syinä tähän ovat olleet maltillinen liikenteen kasvu, biopolttoaineiden lisääntynyt käyttö ja entistä energiatehokkaammat autot. Liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen arvioidaan Suomessa vähenevän nykyisillä toimenpiteillä noin 22 prosenttia vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoden 2005 tasoon. Päästövähennyksiin johtavia toimenpiteitä ovat jakeluvetoilaki biopolttoaineille, ympäristöperusteinen polttoainevero, auto- ja ajoneuvoverojen hiilidioksidipäästöjen mukainen porrastus sekä energiatuet uusiutuvan energian tuotantoon ja käyttöön. (Finlex 2021a.)

2.4 Tulevaisuuden mahdollisuudet

Jotta sähköautoilla olisi tulevaisuus, jossa ne pystyvät korvaamaan polttomoottorilla varustettuja ajoneuvoja liikenteessä, tarvitaan edelleenkin suuria muutoksia tuotantoprosesseissa, infrastruktuurissa ja myös kuluttajien käyttötottumuksissa.

Tällä hetkellä sähköautojen tarvitsemien akkujen valmistaminen on edelleen kallista, mikä vähentää suoraa hintakilpailua perinteisempien automallien kanssa. Teslan vuotuisessa videovälitteisessä tiedotustilaisuudessa on vuosien saatossa tuotu toistamiseen esiin lukema 100 USD/kWh, jota pidetään käännekohtana akustojen valmistuksessa. Tällä tarkoitetaan taitekohtaa, jolloin akustojen yksikköhinta alkaa laskea alle sadan dollarin per kilowattitunti, kun hintaa verrataan akkujen kapasiteettiin.

Autovalmistajien yleinen ymmärrys asiasta on, kun akkujen hinta laskee alle tämän rajan, menettävät polttomoottorilla varustetut autot etunsa hintakilpailussa verrattuna sähköautoihin. Muutos tähän suuntaan on väistämätöntä, kun kilpailun seurauksena tarjonta nousee vastaamaan alalla olevaa kysyntää. Bloombergin keräämän statistiikan mukaan

akkujen hinta on laskenut viimeisen vuosikymmen aikana lähes 90 % nykyiseen vajaan 140 USD/kWh, mikä savuttanee oletetulla tahdilla 100 dollarin rajan 2024. (Bloomberg 2020.)

Latausinfrastruktuurin kehitys ja kuluttajien näkemys sähköautojen tulevaisuudesta ovat sähköautoille elinehto. Mercedes ja nuori sähköautovalmistaja Lightyear panostavat edelleen vahvasti sähköautomalleihin, joiden toimintasäde tulevaisuudessa lähentelee, tai jopa ylittää, 1000 km rajan. Monella autovalmistajalla kuten Toyotalla on kuitenkin tähtäimissä lyhyemmän toimintamatkan autoja, joiden käytön helppous ja huolettomuus perustuu ensisijaisesti latauksen nopeuteen eikä niinkään pidennettyyn latausväliin.

Riippumatta siitä, toteutuuko Lightyearin visio sähköautosta, jota ladataan muutaman kuukauden välein tai Toyotan muutamassa minuutissa täyttyvät akut, kuluttajan täytyy kokea, että latausmahdollisuus löytyy aina, läheltä ja helposti kun sitä tarvitaan. palvelun tulee olla helppokäyttöinen ja asiakaskeskeinen, aivan kuten nykyinen polttoaineasema-verkostokin.

Polttomoottorisia autoja on valmistettu sarjatuotantona jo yli 100 vuotta ja massatuotannon etuna tullut hinnan alentuminen on lähestulkoon tasaantunut. Sähköautoilla kuitenkin on vielä varaa alentaa hintoja, kun akkujen hinnat putoavat kehityksen edetessä.

Sähköautossa on myös huomattavasti vähemmän mekaanisia osia voimansiirron yksinkertaisuuden ansiosta. Tämä alentaa entisestään kynnystä rakentaa esimerkiksi niin sanottuja aloitustason autoja vaikkapa kaupunki- tai kimppekäytökäyttöön. Tällaisten autojen käyttäjät eivät olisi ajoneuvon omistajia vaan käyttömaksun maksavia tilaajia. Polttomoottoriauton valmistuksessa ei tuottoa syntyisi juuri ollenkaan, jos tavoitteena olisi rakentaa tällaiseen tarkoitukseen pientä, erittäin lyhyen kantaman ajoneuvoa pienellä polttoainetankilla ja pitkällä huoltovälillä.

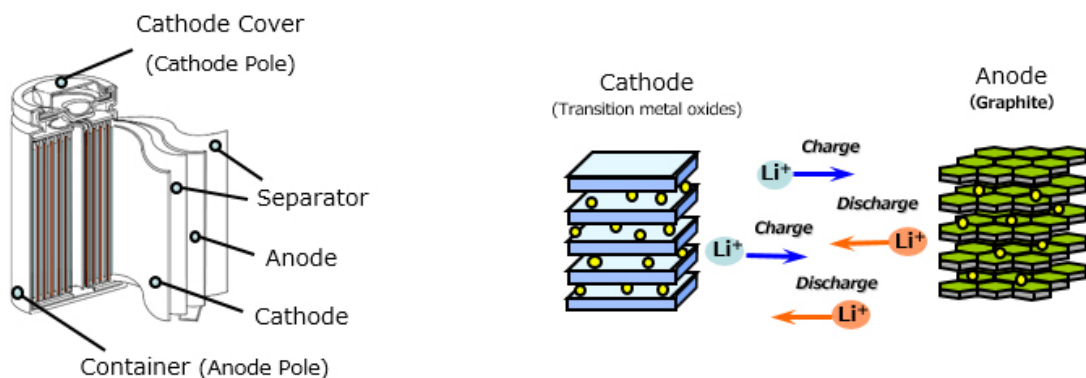
3 KÄYTÖSSÄ OLEVAT AKKUKEMIAAT

3.1 Litiumioniakun toimintaperiaatte

Akku on sähköenergian elektrokemiallinen varasto, joka täytetään lataamalla. Perustointaperiaatteeltaan litiumioniakku on hyvin samankaltainen kuin perinteisemmätkin happoakut. Akku koostuu kahdesta elektrodista, positiivisesta katodista ja negatiivisesta anodista, joiden välissä on elektrolyytti. Elektrolyytti erottaa elektrodit toisistaan ja mahdollistaa siten positiivisesti varautuneiden litiumionien liikkumisen elektrodien välillä.

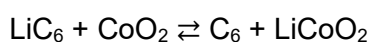
Akun positiivinen elektrodi on valmistettu litiumoksidista ja negatiivinen yleisimmin grafiitista tai muusta hiilipohjaisesta aineesta. Elektrolyytinä voidaan käyttää esimerkiksi etyleenikarbonaattia. (Panasonic 2021.)

Litiumakun rakenne ja toiminta on esitetty kuvassa 1. Vasemmalla rakennekuva yksittäisestä 2170-akusta, joita esimerkiksi Tesla käyttää tuhansia kappaleita jokaisessa auton akustossaan. Oikealla puolella kuvattuna varautuneiden litiumionien liikesuunnat anodin ja katodin välillä, kun akusto lataa tai purkaa jännitettä.



Kuva 1. Litiumakun rakenne ja toiminta (Panasonic 2021)

Alla on esimerkki litium-kobolttioksidiaakussa tapahtuvasta tasapainotetusta reaktiosta. Reaktio tapahtuu nuolen osoittamalla tavalla vasemmalta oikealle, kun akku purkautuu ja vastaavasti oikealta vasemmalle, kun akkua ladataan. (Chapman 2019.)



3.2 Akkukemian valinta

Materiaalivalinnat akun rakenteessa vaikuttavat akun hintaan, suorituskykyyn, painoon, käyttöikään ja myös turvallisuuteen. Eri akkuvalmistajat ovatkin päätyneet useisiin erilaisiin akkukemioihin jahdatessaan eri ominaisuuksia. Harvinaisten tai vain harvoilla alueilla louhittavien alkuaineiden, kuten nikkelin, litiumin ja kobolttin, käytöstä akuissa on myös syytä muistaa louhinnan aiheuttamat mahdolliset eettiset ja ympäristölliset haittavaikutukset paikallisille alueille. Esimerkiksi kobolttia kaivetaan edelleen runsaasti laittomista kaivoksista Kongossa ja Etelä-Amerikan litiumkaivannot kuluttavat ja saastuttavat suuria määriä paikallisista vesivarannoista.

Koska tutkimuksen kohteena on sähköautoihin parhaiten soveltuvia akkutyppejä, tästä johtuen vertailtavat akkuvaihtoehdon on rajattu suurelta osin litiumperäisiin akkuihin, koska litiumin käyttö mahdollistaa materiaalin kemiallisten ominaisuuksien ansiosta suurimman energiatihedyn.

3.2.1 NMC, Litium-Nikkeli-Mangaani-Kobolttioksidi

NMC on litiumioniakku tyyppi, joka on nikkeli-koboltti-alumiinioksidi (NCA) -akkujen rinnalla yksi menestyneimmistä akkutyypeistä sähköautomarkkinoilla. Esimerkiksi Volvo käyttää sähkö- ja hybridimalleissaan CATL:n valmistamia NMC-akkuja, jotka ovat energiatihedeltään tyypillisesti noin 250 Wh/kg. (ICCT 2021.)

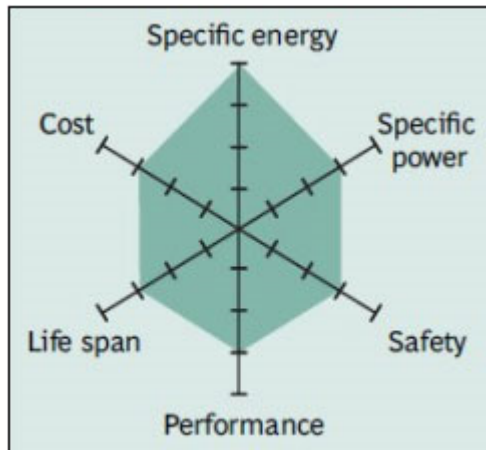
Akustossa käytettävä nikkeli on luontaisesti epävakaa ja hankala alkuaine, mutta yhdistettynä mangaaniin, kemia rauhoittuu ja akustosta saadaan irti suuri energiatiheys ilman epävakautta. (LiNiMnCoO₂) (Battery University 2021a.)

Käytettyjen alkuaineiden sekoitussuhteita on useita, mutta tyypillisesti NMC 111 on ollut suosittu esimerkiksi ajoneuvokäytössä, missä käyttösykli toistuu useasti ja pitkä käyttöikä on haluttua. Kolmen numeron sarjalla tarkoitetaan suhdelukua, kuinka paljon kutakin alkuainetta akussa on käytetty, 1 yksikköä nikkeliä suhteessa 1:een yksikköön mangaania ja kobolttia. (Battery University 2021a.)

Akkujen hinnat riippuvat paljon eri valmistajien tuotantomääristä ja kysynnästä, mutta teoriassa tulevaisuuden NMC-akustoilla on kaikki mahdollisuudet syrjäyttää NCA-akut kapasiteettiin nähden edullisimpina litiumioniakkuina. Monista akkutyypeistä yritetään

saada karsittua kallis koboltti pois, eikä mangaanikaan ole missään määrin harvinainen tai kallis alkuaine maapallolla.

NMC-akun ominaispiirteet eli sen vahvuudet eri ominaisuuksien suhteeseen esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. NMC-akun ominaispiirteet

Kuvasta nähdään, että NMC-akun vahvin ominaisuus on specific energy (ominaisenergia) eli energiasisältö massaansa nähden. Muut ominaisuudet eli teho/massa -suhde, turvallisuus, suorituskyky, elinaika ja hinta ovat hieman heikommalla tasolla mutta kuitenkin tasavahvoja keskenään.

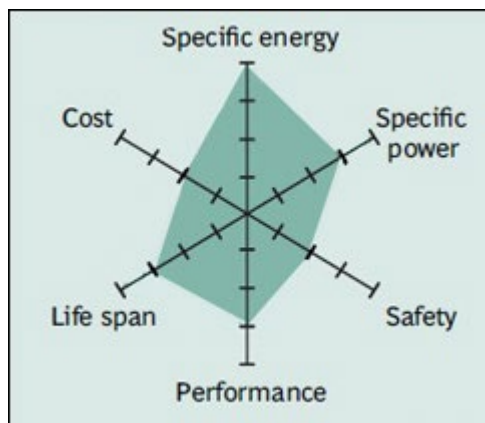
3.2.2 NCA, Nikkeli-Koboltti-Alumiinioksidi

Markkinointinimestään huolimatta myös NCA-akku on litiumpohjainen akkutyypin. Teslan ja Panasonicin ansiosta tämä on tällä hetkellä toinen maailman käytetyimmistä sähköautojen akkukemioista, LiNiCoAlO_2 . Energiatiheydeltään Teslan NCA-akut ovat tuotannossa olevien sähköautojen alalla johtavassa asemassa lukemin 260 Wh/kg, mikä on lähes kymmenkertainen verrattuna perinteisiin lyijyakkuihin. (Battery University 2021b)

Eriyisesti Teslan ja Panasonicin yhteistyössä tulevaisuuden visiona on vähentää kobolttin käyttöä ja ennen pitkää poistaa se akun valmistuksesta kokonaan. Syinä kobolttin nopea hinnannousu viime vuosina, sekä kobolttin louhinnan kyseenalainen eettisyys ja ympäristöystävällisyys kobolttin esiintymisalueilla kehitysmaissa.

Tarkoituksena on myös siirtyä autoon asennettavista erillisistä akkumoduleista rakenteelliseen akkuun, joka on kiinteästi osa auton kori- ja runkorakennetta, mikä parantaisi akkutyypille muutoin melko keskinkertaista turvallisuusluokitusta. Litiumioniakkujen yleisiä heikkouksia turvallisuuden kannalta ovat akussa käytettävä elektrolyytti, joka on helposti palavaa ja veden kanssa räjähdysmäisesti reagoiva litium. Tämä kuitenkin tulee ongelmaksi vain, jos akkukenno puhkeaa esimerkiksi iskun tai piston takia. Rakenteellinen akku saataisiin näin paremmin suojaan ajoneuvon jo olemassa olevien rakenteiden sisään eikä erillistä, painavaa, ulkoista tukirankaa ja panssaria tarvittaisi akun ympärille.

NCA-akun ominaispiirteet eli sen vahvuudet eri ominaisuuksien suhteen esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. NCA-akun ominaispiirteet

Kuvan 3 mukaan NCA-akku jakaa monia hyviä piirteitä edellä kuvaillun NMC-akuston kanssa, erityisesti suuren energiakapasiteetin ja kyvyn purkaa suuria tehoja tarpeen vaatiessa nopeasti. Akulla hyvin pitkä elinkaari ja nykyiset valmistajat lupaavatkin entisestään pidentyvää käyttöikää uusille akuille etsiessään parannuksia akuston rakenteessa.

3.2.3 LMO Litium-Mangaanioksidi

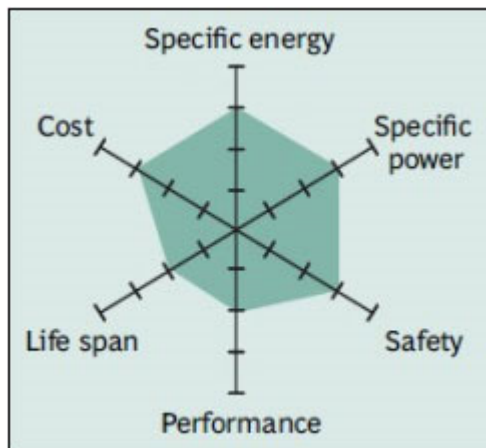
Litium-mangaanioksidiakut tulivat ensimmäistä kertaa kaupalliseen käyttöön jo 90-luvun lopussa ja soveltuvat erinomaisesti mekaanisesti rasittaviin ympäristöihin ja lyhytkestoihin suurtehosovellutuksiin. Moniin muihin litiumioniakkuihin verrattuna LMO-akku kestää suuria rasituksia hyvin, eikä lämpökarkaaminen ole yhtä suuri ongelma. (Battery University 2021a)

Lämpökarkaamisella tarkoitetaan tilannetta, jossa laitteen pieni lämpötilan nousu aiheuttaa entisestään kiihtyvän lämmön tuotannon ja lämpötila karkaa hallitsemattomaksi jotta yleensä sulamiseen tai räjähtämiseen.

Akulle on kuitenkin tyypillistä lyhyt elinkaari, lyhyt varastoinninkestävyys ja heikko suorituskyky pitkäaikaisessa tehoa vaativassa suorituksessa kuten henkilöautoille tyypillisessä maantieajossa.

Tämän akun sopivuus sähköautoihin nojaisi vahvasti siihen, löytyykö tulevaisuudessa kysyntää vuokrattavien sähköpotkulautojen mallia seuraaville pikkuautoille kaupunkien keskustoissa.

LMO-akun ominaispiirteet eli sen vahvuudet eri ominaisuuksien suhteen esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. LMO-akun ominaispiirteet

Kuvasta on nähtävissä akkutyypin heikoimmat ominaisuudet eli lyhyt elinkaari erityisesti yhdistettynä akun heikkoon kykyyn sietää optimialueen ulkopuolella olevia erittäin korkeita tai erittäin matalia lämpötiloja.

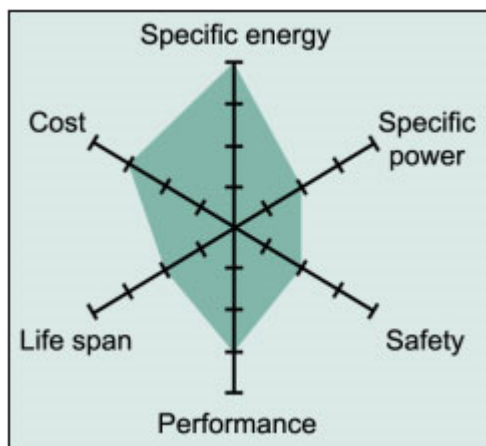
3.2.4 LCO Litium-Kobolttioksidi

Litium-kobolttioksidiakustot edustavat vertailun akkujen vanhimpaa ääripäätä, joita kuitenkin löytyy vielä käytöstä runsaasti. Monissa käyttökohteissa, joissa tätä akkua on käytetty aikaisemmin, on siirrytty jo muihin edellä kuvailtuihin vaihtoehtoihin suurelta osin turvallisuussyistä.

Hyvinä piirteinä tässä akussa voidaan kuitenkin pitää kohtuullista hintaa suhteessa korkeaan energiatiheuteen. Verkkaisen latausnopeuden ja tehorajoitteiden takia tämä akku soveltuu heikosti nykypäivän sähköautoon. Lämpökarkaamisen suuren vaaran takia nämä akut eivät sovellu pikaladattaviksi ja akkua käyttäessäkin huipputehoja joudutaan myös rajoittamaan. (Battery University 2021a)

Myöskään lähes yksinomaan litiumista ja kobolttioksidista koostuva akkukemia ei enää ole edullisimmasta päästä koboltin viime vuosien hinnannousun takia.

LCO-akun ominaispiirteet eli sen vahvuudet eri ominaisuuksien suhteen esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. LCO-akun ominaispiirteet

Kuvassa esitettyjen ominaisuuksien valossa LCO-akkua voidaan pitää nykypäivänä melko haastavana akkutyypinä tehorojoitusten ja turvallisuuskysymysten takia. Akun tehoa joudutaan rajoittamaan ladattaessa ja purkaessa, ettei synny lämpökarkaamisen vaaraa.

3.2.5 LTO Litium-Titanaattioksidi

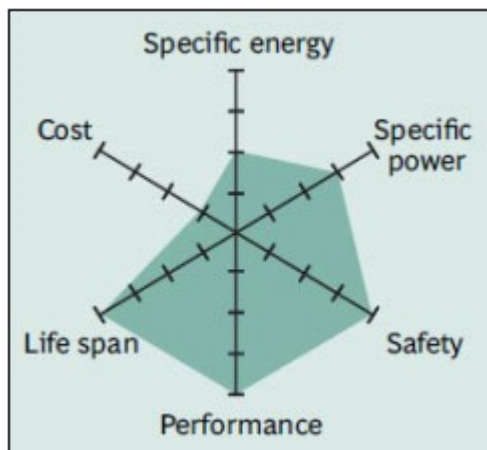
LTO-akkukemia on poikkeava muihin litiumioniakkuihin verrattuna siten, että akun anodi ei ole tavanmukaisesti valmistettu grafiitista vaan mikroskooppisen pienistä litiumtitanaattikristalleista. Tästä syystä anodin kokonaisreaktiopinta-ala on erittäin suuri, mikä mahdollistaa poikkeuksellisen nopean purku- ja latausnopeuden.

Vaikka LTO-akkujen energiatiheys on tyypillisesti vain 60–110 Wh/kg ja hankintahinta korkea, ovat akun muut ominaisuudet erinomaiset kulkuneuvoihin, joiden toimintamatkan ei tarvitse olla useita satoja kilometrejä yhdellä latauskerralla. Akku myös kestää alhaisia toimintalämpötiloja erinomaisesti muihin akkuteknologioihin verrattuna, saavuttaen jopa 80 % normaalista kapasiteetistaan vielä -30 °C:n lämpötiloissa. (GWL 2021.)

LTO-akun heikon energiatihedyn takia akustosta tulee kookas, mutta julkisessa henkilöliikenteessä tästä ei ole niin suurta haittaa, koska kaupunkibussit ovat mitoiltaan muutenkin kookkaita ja latausinfrastruktuuri voidaan suunnitella vakioreittien mukaan. Latautumistakaan ei tarvitse odotella kauan, koska jo muutaman minuutin latauksen aikana akusto kerää tarpeeksi energiaa, jolla reitti päästään kulkemaan ympäri. Optimaalisesti latauspisteet voidaan sijoittaa joko reitin alkupisteeseen tai päätepysäkille tai vaikkapa molempiin, mikäli reitti on pitkä.

Esimerkiksi Turussa vuonna 2016 käyttöön otetut kotimaiset Linkker-sähköbussit on varustettu 55 kWh:n LTO-akulla niiden erittäin nopean latauskyvyn ansiosta. (Linkker 2019.)

LTO-akun ominaispiirteet eli sen vahvuudet eri ominaisuuksien suhteen esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. LTO-akun ominaispiirteet.

Kuvan piirteistä on helposti nähtävissä, miksi akkutyypin on kelvannut hyvin julkisen liikenteen tarpeisiin. Akun korkea hankintahinta pystytään hyvittämään julkisessa liikenteessä sillä, että LTO-akut ovat yksi turvallisimmista litiumioniakkutyypeistä. LTO-akut myös kestävät ääriämpötiloja erittäin hyvin, eikä niiden käyttöikä kärsi tästä yhtä paljon kuin monilla muilla akkukemioilla.

3.2.6 LFP Litium-Rautafosfaatti

Käytettävien raaka-aineiden kannalta LFP-akut ovat tulevaisuuden kannalta hyvin lupaava vaihtoehto nykyisin suosituimpien litiumioniakkujen rinnalle tai jopa niiden korvajaksi. Litium-rautafosfaattiakuissa ei käytetä arvokasta nikkeliä eikä kobolttia, joiden markkina-arvo on ollut nousussa kaiken aikaa, kun sähköautot yleistyvät ja akkumateriaalien kysyntä kasvaa.

Esimerkiksi Tesla käyttää LFP-akkumoduleita edullisimmassa Kiinassa valmistetuissa automallissaan, mutta Kalifornian tehdas valmistaa samaa Model 3 SR+ mallia NCA-akuilla. Euroopan teillä kulkee molempia malleja ja valmistaja lupaakin LFP-akulla varustetulle autolle hivenen lyhyemmän kantomatkan.

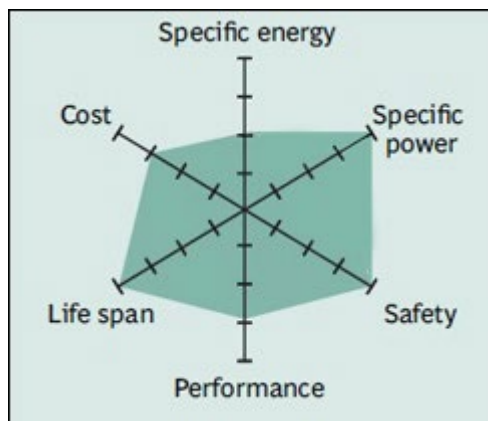
Akkutyypin ominaispiirteiden perusteella asia tyypillisesti onkin näin, sillä LFP-akkujen energiatiheys on alhaisempi kuin NCA-akuilla. LFP-akun kylmän kesto on myös tyypillisesti heikompaa ja akun ominaisuudet heikkenevät kylmissä olosuhteissa voimakkaammin kuin NCA-akkukemialla.

Verrattavat Tesla Model 3 -autot ovat fyysisesti kaikin puolin samanlaisia lukuun ottamatta LFP-akkukemiaa. Kiinalaisen Teslan akkukapasiteetti on pienempi kuin Kalifornian Teslalla, koska akulla on autossa käytettävissä samat ulkomitat, joihin akku pitää saada mahtumaan, mutta akun energiatiheys tilavuuden osalta on alhaisempi.

NCA-akkuihin verrattuna tehty uhraus energiatihedessä ja kylmänkestossa näkyy parantuneena käyttöikä, halvempina hintana ja robustimpana akkukemiana vikatilanteissa, koska reaktiivista nikkeliä ei LFP-akussa ole käytetty. (Battery University 2021a)

Esimerkiksi Turun joukkoliikenteessä käytössä olevissa kiinalaisvalmisteisissa Yutong E15-sähköbussseissa on käytössä 564 kWh:n litium LFP-akku. (Yutong 2022.)

LFP-akun ominaispiirteet eli sen vahvuudet eri ominaisuuksien suhteen esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. LFP-akun ominaispiirteet

Kuvassa näkyy LFP-akun melko tasavahvat ominaisuudet. Heikoimpana ominaisuutena on energiatiheys, joka suurelta osin johtuu koboltin ja nikkelin puuttumisesta tässä akkukemiassa. Näiden korvaaminen rautafosfaatilla lisää akuston massaa, mutta tekee akustosta myös kemiallisesti vähemmän reaktiivisen.

3.2.7 Solid State Battery

SSB, eli kiinteäelektrolyyttiakku on sähkökemialliselta toimintaperiaatteeltaan samanlainen kuin muutkin litiumakut, mutta rakenteeltaan radikaalisti erilainen. Nimensä mukaisesti akun elektrolyytti on nesteen tai geelin sijaan kiinteä epäorgaaninen elektrolyytti, polymeeri tai näiden komposiitti. Elektronit liikkuvat katodin ja anodin välillä, riippuen valitusta elektrolyyttityypistä, joko epäorgaanisia kiderakenteita pitkin tai polymeeriketjuja pitkin.

Akkutyyppi on tällä hetkellä kokeiluasteella mutta monet autovalmistajat, kuten Mercedes, Toyota ja Volkswagen, ovat osoittaneet kiinnostuksensa ja luvannet tuoda kuluttajamarkkinoille uusia kiinteäelektrolyyttiakkuilla varustettuja malleja jo lähitulevaisuudessa. Tällä hetkellä vain Mercedeseltä löytyy tällainen malli, eCitaro G -sähkölinja-auto.

Akkutyypin suorituskyky vastaa NMC-akkua, mutta sen heikkouksia ovat vielä tällä hetkellä valmistuskustannukset ja elektrolyytin heikko toimivuus kylmissä olosuhteissa. Moni valmistaja taistelee vielä myös akun elinikää lyhentävien dendriittien muodostumisen kanssa. Dendriitit ovat ohuita sähköä johtavia säikeitä, jotka muodostuvat akun si-

sään, kiinteään elektrolyyttiin, anodin ja katodin välille aiheuttaen oikosulkuja yksittäisissä akkukennoissa. Tällöin akun kapasiteetti pienenee ja ennen pitkää akku lakkaa toimimasta, kun tarpeeksi akkukennoja on oikosulussa.

Kiinteäelektrolyyttiakun etuja on kuitenkin lukuisia, kunhan säikeiden muodostuminen saadaan aisoihin. Uusimpien kiinteäelektrolyyttiakkujen arvioidaan pääsevän lähelle energiatihelyttä 300 kWh/kg vuoteen 2030 mennessä, mutta tämä voisi nousta vielä korkeammalle, mikäli akuissa pystyttäisiin käyttämään Toyotan visioimaa litiummetallista katodia litiumoksidin sijaan, tarkoittaen erittäin pitkiä toimintamatkoja. Tällainen akku kykenisi latausnopeuksiin, jotka olisivat LFP-akkujakin nopeampia ja alkaisivat haastaa latausajallaan sitä, kuinka nopeasti perinteisen polttomoottoriauton polttoainetankin saa täytettyä polttoaineasemalla. (DNV 2022.)

Turvallisuuskulman kannalta kiinteäelektrodiakku on erinomainen, koska juuri kiinteän elektrolyytin takia akun rakenteessa ei ole enää reaktiivista ja helposti syttyvää nestemäistä elektrolyyttiä, joka vaurioitilanteessa voi alkaa tuottaa myrkyllisiä kaasuja, vuotaa akusta ulos ja syttyä palamaan.

Kuvassa 8 havainnollistettu dendriittien syntyminen kiinteäelektrolyyttiin katodin ja anodin välille aiheuttaen oikosulun.



Kuva 8. Dendriittien synty kiinteäelektrodiakussa.

3.2.8 Na-Ion, Suola-ioniakku

Nimitys Na-Ion tai joskus myös NIB viittaa englannin kielen lyhennelmään natrium / sodium ion battery. Suola-ioniakku on verrattavissa litiumioniakkuihin, mutta litiumin sijaan akussa käytetään sulaa natriumia, joka tekee akusta turvallisemman ja pitkäikäisemmän.

Suola-akun valmistuskustannukset ovat edullisesta natriumista huolimatta hieman litiumioniakkuja korkeammat ja kokoonsa nähden ne ovat myös painavampia.

Jotta akun natrium pysyy sulana, täytyy nykyaikainen akku pitää jatkuvasti 245–350 °C:n toimintalämpötilassa, mikä rajoittaa ratkaisevasti akun potentiaalisia käyttökohteita. Koska lämpötila on keinotekoisesti aina niin paljon ulkolämpötilaa korkeampi, lämpökarkeamisen mahdollisuus normaalissa kuormituksessa on lähes olematon. Tämän ominaisuuden kääntöpuolena on myös suola-akkujen erikoinen ominaisuus sietää myös lämmön putoamista niin alas, että suola muuttuu takaisin kiinteäksi. Kiinteäksi jäähtynyt suola-akku siirtyy horrostilaan ja pystyy säilyttämään varauksensa jopa kymmeniä vuosia, kunhan lämpötila nostetaan takaisin. (Battery University 2022a.)

Suola-akkuja voidaan myös kuljettaa varauksettomina ja jäähdytettyinä ilman, että niiden täytyy noudattaa vaarallisten aineiden kuljetusmääräyksiä. Akku sietää täydellisen jännitteen purun, eikä akuissa ei ole litiumia lainkaan. (Battery University 2022b.)

Akkukennostot on kuitenkin normaalisti eristetty hyvin, joten lämmön ylläpitoon kuluu mahdollisimman vähän energiaa. Eristeiden tuomasta koosta ja massasta johtuen suola-akut soveltuvat parhaiten käyttötarkoituksiin, joissa näillä ominaisuuksilla ei juurikaan ole merkitystä. Kiinteät energiavarastot esimerkiksi sähköautojen latausasemilla tai vaikkapa julkisen liikenteen sähköllä kulkevat linja-autot ovat hyviä vaihtoehtoja. Näissä esimerkeissä akut voidaan pitää vakio- ja vakiolämpötilassa ympäri vuorokauden eikä hyötykuorma tai akuston koko ole niin kriittistä kuin henkilöautoissa ja raskaassa tavaraliikenteessä.

4 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyössä vertailtiin tuotantoasteen saavuttaneita litiumioniakkuja ja kokeiluasteella olevia, tai jo rajoitetussa tuotannossa olevia kiinteäelektrolyyttiakkuja ja suolaioniakkuja ja selvitettiin niille ominaisia piirteitä.

Sähkömoottorit ovat jo selkeästi näyttäneet maailmalle, että autoilun tulevaisuus on sähköistetty, mutta suurin mielenkiinto on nyt siirtynyt etsimään oikeaa akkua sähkömoottoreiden pariin.

Nykyakuista LFP-akut lienevät vahvin kandidaatti henkilöautojen energianlähteeksi niiden johtavan turvallisuuden, suorituskyvyn sekä arvokkaiden metallien tarpeen vähäisyyden takia. Kuitenkaan tulevaisuuden kiinteäelektrodiakkuja ei voi unohtaa, sillä tällä hetkellä niiden heikkoja puolia ovat käytännössä vain pienistä tuotantomääristä johtuva takaa-ajosaama hintakilpailussa, sekä toistaiseksi lyhyt käyttöikä.

Suolaioniakut lupaavat myös suurta potentiaalia edulliseen kiinteään energianvarastointiin. Tätä ei tule unohtaa, vaikka tutkimus rajattiinkin sähköautoihin, sillä sähköautojen pikalatausinfrastruktuurin toiminta voisi nojata vahvasti siihen, että asema varaa ensin suuren määrän sähköenergiaa suolaioniakkuun ja purkaa sen sitten nopeasti ladattavaan autoon.

LTO-akut taas näyttävät kykynsä parhaiten raskaan ja julkisen liikenteen vakioiteillä erinomaisen pikalatauskyvyn ansiosta, tosin uhraten ajomatkaa ja hankintahinnasta. Korkea hankintahinta ja tarkkaan rajattu toimintamatka ovat rajoitteita, joihin liikennöintiyritykset pystyvät myöntymään peruskuluttajaa paremmin. Toisaalta LTO-akkujen käyttöikä on pitkä.

Kokonaisuudesta rakentuu kuva, että yhtä akkukemiaa henkilöautojen, raskaan liikenteen sekä latausinfrastruktuurin käyttöön on lähitulevaisuudessa melko mahdoton valita.

Tulevaisuuden akkuteknologiat ovat siis hyvin spekulatiivisia ja epävarmoja. Tutkimuksesta oli pakko jättää pois useita kokeiluasteella olevia akkuvaihtoehtoja, sillä maailman laboratorioissa syntyy ja kuolee monia akkuratkaisuja, joista monikaan ei koskaan edes kuule. Vertailevan tutkimuksen tulosten parantamiseksi vertailukohteita voisi olla enemmänkin, jolloin kehityksen edetessä voitaisiin karsia pois heikoimmat vaihtoehdot, joista ei ollutkaan huipun haastajiksi.

LÄHTEET

Autoalan tiedotuskeskus 2020. Ladattavien autojen käyttäjätutkimus. Viitattu 2.6.2022.
https://www.aut.fi/ajankohtaista/julkaisuja/ladattavien_autojen_tutkimus

Battery University 2021a. Types of Lithium-ion. Viitattu 30.4.2022
<https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>

Battery University 2021b. Summary Table of Lithium-based Batteries. Viitattu 30.4.2022
<https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries>

Battery University 2022a. Why Does Sodium-sulfur need to be heated. Viitattu 29.5.2022
<https://batteryuniversity.com/article/bu-210a-why-does-sodium-sulfur-need-to-be-heated>

Battery University 2022b. Shipping Lithium-based batteries by Air. Viitattu 29.5.2022
<https://batteryuniversity.com/article/bu-704a-shipping-lithium-based-batteries-by-air>

Bauer, H. 2003. Autotekniikan taskukirja, 6. painos.

Bloomberg 2020. This Is the Dawning of the Age of the Battery. Viitattu 16.12.2021
<https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-12-17/this-is-the-dawning-of-the-age-of-the-battery>

Chapman, B. 2019. How does a lithium-Ion battery work? Viitattu 16.12.2021. <https://lets-talkscience.ca/educational-resources/stem-in-context/how-does-a-lithium-ion-battery-work>

DNV, Det Norske Veritas 2022. Are solid state batteries the holy grail for 2030? Viitattu 29.5.2022.
<https://www.dnv.com/to2030/technology/are-solid-state-batteries-the-holy-grail-for-2030.html>

Finlex 2021a. Hallituksen esitys HE 82/2014. Viitattu 25.7.2021
<https://www.finlex.fi/fi/esitykset/>

Finlex 2021b. Ilmastolaki 609/2015. Viitattu 16.12.2021
<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/>

GWL 2021. LTO Technology. Viitattu 20.12.2021
<https://gwl.eu/LTO-technology/>

ICCT 2010. Carbon Intensity of Crude Oil in Europe. Viitattu 16.12.2021 https://theicct.org/sites/default/files/ICCT_crudeoil_Eur_Dec2010_sum.pdf

ICCT 2021. Battery electric tractor-trailers in European Union: A vehicle technology analysis. Viitattu 15.5.2022
<https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/12/eu-tractor-trailers-analysis-aug21-2.pdf>

Linkker 2019. Viitattu 1.5.2022
<http://www.linkkerbus.com/2019/press-release/srs-equipped-linkker-12le-tested-in-malaga/>

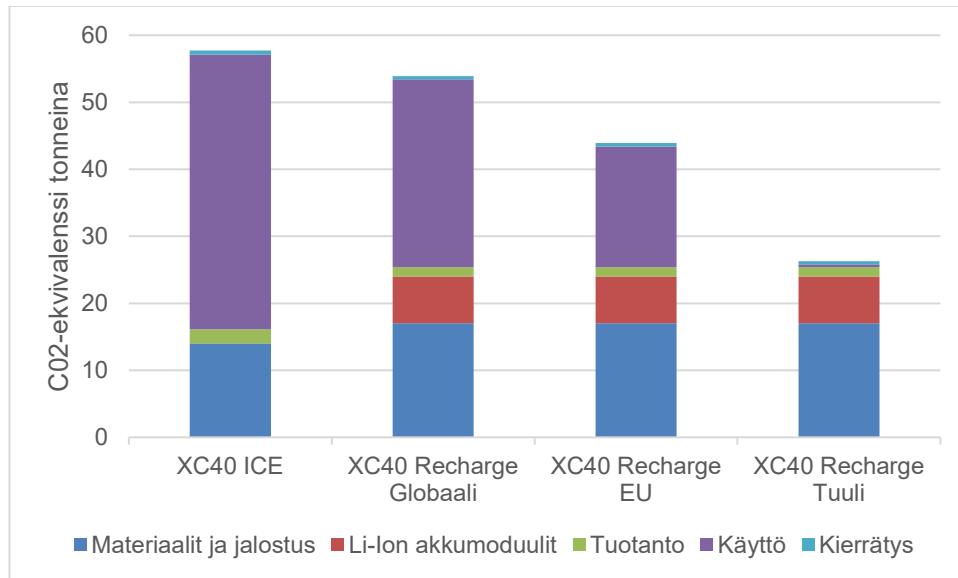
Panasonic 2021. Lithium-ion Batteries. Viitattu 16.12.2021
<https://industrial.panasonic.com/ww/products/pt/lithium-ion>

Volvo 2021. Carbon footprint report, Battery electric XC40 Recharge and the XC40 ICE. Viitattu 16.12.2021 https://group.volvocars.com/news/sustainability/2020/~/_media/ccs/Volvo_carbon-footprintreport.pdf

Yutong 2022. E15 Specification. Viitattu 15.5.2022
<https://en.yutong.com/products/E15-europe.shtml>

Liitteet

Liite 1. Volvo XC40 Elinkaaritutkimustulokset. Päästöt ajoneuvon koko elinkaaren aikana, jonka tulkittu olevan 200 000 kilometrin ajosuorite. (Volvo 2021)



	Materiaalit ja jalostus	Li-Ion akkumoduulit	Tuotanto	Käyttö	Kierrätys	CO ₂ Kokonaispäästöt
	tonnia	tonnia	tonnia	tonnia	tonnia	tonnia
XC40 ICE	14	0	2,1	41	0,6	58
XC40 Recharge Globaali	17	7	1,4	28	0,5	54
XC40 Recharge EU	17	7	1,4	18	0,5	44
XC40 Recharge Tuuli	17	7	1,4	0,4	0,5	26