

Jaakko Frantsi

# VETY- JA SÄHKÖKÄYTTÖISTEN AJO- NEUVOJEN TEKNISTALOUDELLINEN VERTAILU

Kandidaatintyö  
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta  
Tarkastaja: Kari Lappalainen  
Joulukuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Jaakko Frantsi: Vety- ja sähkökäyttöisten ajoneuvojen teknistaloudellinen vertailu  
Kandidaatintyö, 34 sivua  
Tampereen yliopisto  
Tieto- ja sähkötekniikan TkK-tutkinto-ohjelma  
Pääaine: Sähköenergiatekniikka  
Syksy 2021

---

Ilmastonmuutoksen nopeutuessa ja sen vaikutusten pahentuessa maailmanlaajuinen liikenne on siirtymässä fossiilisista polttoaineista uusiutuviin energiateknologioihin. Sähkö- ja vetykäyttöiset ajoneuvot nykyisessä tilassaan ovat varsin uusia, ja kehityksen odotetaan jatkuvan vielä tehokkaammin. Niiden määrän ennustetaan lisääntyvän runsaasti lähivuosina ja vuoden 2035 jälkeen kaikkien myytyjen ajoneuvojen oletetaan olevan sähköisiä.

Kandidaatintyössä suoritettiin sähkö- ja vetykäyttöisten ajoneuvojen välillä teknis-taloudellinen vertailu. Ajoneuvoista keskityttiin lähinnä yksityisautoihin vertailemalla nykyhetkellä markkinoilta löytyvien ajoneuvojen ominaisuuksia. Taloudellisesta näkökulmasta käytettiin kahta eri laskentamenetelmää selvittämään ajoneuvojen pidempiaikaisia kustannuksia. Lisäksi käsiteltiin latausverkon olemassaoloa ja sen luomisen mahdollisuutta. Teknisestä näkökulmasta tutkittiin ajoneuvojen turvallisuutta ja toiminnallisuutta. Tulevaisuuden näkymää huomioitiin myös molempien näkökulmien kannalta.

Sähköautot ovat nykyaikana vetyautoja taloudellisempia. Vetyautojen kalliit ostohinnat, kalliimpi polttoaine sekä usein olematon latausinfrastruktuuri vähentävät niiden käyttökelpoisuutta. Teknisessä vertailussa ajoneuvot olivat turvallisuuden puolesta suhteellisen samankaltaisia. Kantaman ja käyttöiän vertailussa informaatiota ajoneuvoista löytyi vähän, sillä ajoneuvot ovat vielä verrattain uusia. Estimaattien perusteella vetyauton kantama ja käyttöikä vaikuttivat kuitenkin paremmilta. Hyötysuhteessa vetyauto kuitenkin on selkeästi huonompi kuin sähköauto, sillä polttokennon ja elektrolyysin verrattain huonot hyötysuhteet huonontavat kokonaishyötysuhdetta.

Avainsanat: akku, polttokenno, sähköauto, vetyauto

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. SÄHKÖKÄYTTÖINEN AJONEUVO .....	2
2.1 Rakenne .....	2
2.2 Akku.....	3
2.2.1 Litiumioniakku .....	4
2.2.2 Lyijyakku.....	5
3. VETYKÄYTTÖINEN AJONEUVO .....	6
3.1 Rakenne .....	6
3.2 Polttokenno.....	7
3.3 Kiinteä polymeerikenno.....	8
3.4 Vedyn eri värit.....	9
4. SÄHKÖMOOTTORI .....	10
4.1 Tasavirtamoottori .....	10
4.1.1 Harjallinen tasavirtamoottori.....	10
4.1.2 Harjaton tasavirtamoottori .....	11
4.2 Vaihtovirtamoottori .....	11
4.2.1 Induktiomoottori .....	12
4.2.2 Tahtimoottori.....	12
4.2.3 Reluktanssimoottori .....	12
5. TALOUDELLINEN VERTAILU .....	14
5.1 Omistamisen kokonaiskustannukset .....	14
5.2 Nettonykyarvo.....	16
5.3 Latausverkosto.....	19
6. TEKNINEN VERTAILU .....	21
6.1 Turvallisuus.....	21
6.2 Toiminnallisuus .....	23
6.2.1 Kantama .....	23
6.2.2 Käyttöikä.....	25
6.2.3 Hyötysuhde.....	27
7. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄ.....	29
8. YHTEENVETO.....	30
LÄHTEET .....	31

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	Vaihtovirta
CNRS	Ranskan tieteellisen tutkimuksen keskus
DC	Tasavirta
HEPA	Korkean hyötysuhteen hiukkasilma
LCO	Litium-kobolttioksidi
LFP	Litium-rautafosfaatti
LMO	Litium-mangaanioksidi
LTO	Litium-titanaatti
NCA	Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi
NMC	Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi
NPV	Nettonykyarvo
PEMFC	Kiinteä polymeerikenno
PTFE	Polytetrafluorietyyleeni
SoH	Terveysdentila
TCO	Omistamisen kokonaiskustannukset

# 1. JOHDANTO

Maapallon ilmasto on hiljalleen alkanut lämmetä 1900-luvulta lähtien. Suurimpana syynä ilmaston lämpenemiselle on ihmisten aiheuttamat kasvihuonepäästöt, jotka estävät aurinkon säteiden tuoman lämmön karkaamisen takaisin avaruuteen. Ilmastomuutoksen seurauksena vakavien ääri-ilmiöiden määrä on lisääntynyt, arktisten alueiden jääpeite uhkaa sulaa kokonaan ja useita eläinlajeja uhkaa sukupuutto. Maapallon lämpenemisen nopea hidastaminen ja lopullinen pysäyttäminen ovat tärkeitä maapallon elämän kannalta. [1]

Liikenteen osuus maailmanlaajuisista energiaan liittyvistä hiilidioksidipäästöistä oli vuonna 2018 yli viidesosan [2, s. 35]. Polttomoottoriautot ovat vielä yleisimpiä ajoneuvoja maailmassa ja niissä käytetyt fossiiliset polttoaineet, diesel ja bensiini, edesauttavat ilmastomuutoksen jatkoa. Uusien sähkökäyttöisten ajoneuvojen määrä kasvaa kuitenkin huimaa vauhtia ja vetykäyttöiset autot tulevat hyvin mahdollisesti vuosien päästä samalla tahdilla perässä. Vety- ja sähkökäyttöiset ajoneuvojen ympäristöystävälliset ominaisuudet ovat yksi hyvin mahdollinen ratkaisu liikenteen päästöjen vähentämiseen.

Tässä kandidaatintyössä vertaillaan sähkö- ja vetykäyttöisiä ajoneuvoja sekä teknisestä että taloudellisesta näkökulmasta. Taloudellisessa vertailussa tutustutaan kahteen eri kustannusten laskentatapaan: nettonykyarvoon sekä omistamisen kokonaiskustannukseen (Total Cost of Ownership). Tekniseen vertailuun kuuluu turvallisuuden sekä toiminnallisuuden, eli kantaman, käyttöiän ja ajoneuvojen hyötysuhteiden tarkastelu. Lisäksi ajoneuvojen mahdollista latausverkostoa sekä tulevaisuuden näkymää tarkastellaan maailmanlaajuisesti.

Luvussa 2 käydään läpi sähkökäyttöisen ajoneuvon toimintaperusteita ja tarkastellaan energian varastointitapoja. Luvussa 3 tarkastellaan vetykäyttöistä ajoneuvoa samoista näkökulmista. Luvussa 4 käydään lyhyesti läpi ajoneuvoja yhdistävää tekijää, sähkömoottoria. Luvussa 5 suoritetaan ajoneuvojen vertailua taloudellisesta näkökulmasta. Luvussa 6 suoritetaan teknisten ominaisuuksien vertailua ja luvussa 7 tarkastellaan tulevaisuuden näkymää molemmista näkökulmista. Lopuksi luvun 8 yhteenvedossa käsitellään tiivistetysti työn keskeisin sisältö.

## 2. SÄHKÖKÄYTTÖINEN AJONEUVO

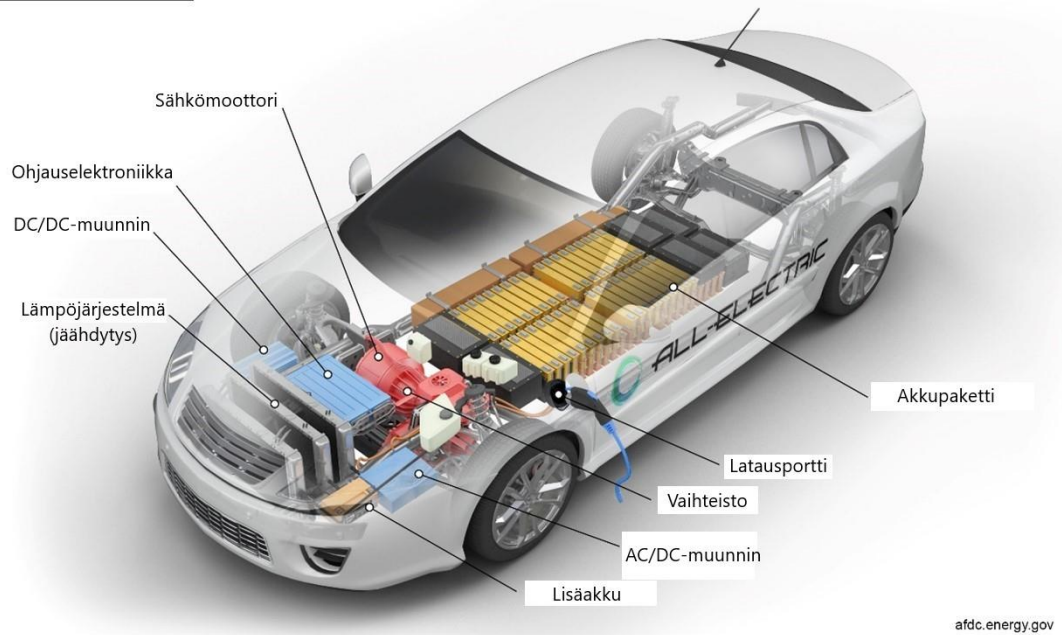
Tässä luvussa käydään lyhyesti sähköauton historiaa, tutustutaan ajoneuvon toimintaperiaatteisiin sekä eri mahdollisiin akkuteknologioihin. Sähkökäyttöisen ajoneuvon nimityksen alle kuuluu niin sanotut täyssähköautot, jotka käyttävät ainoana voimanlähteenään sähkömoottoria, sekä hybridautot, joissa on yleensä sekä sähkö- että polttomoottori. Tässä työssä sähkökäyttöisellä ajoneuvolla viitataan kuitenkin akkusähköautoon, ellei asiasta erikseen mainita.

Sähkökäyttöisten ajoneuvojen aika alkoi jo 1900-luvun alussa, kun maailman ensimmäinen hybridi Lohner-Porsche kehitettiin. Sähköautot olivat 1920-luvulle asti markkinoilla suosittuja, kunnes polttomoottorin kehitys ja öljyn löytäminen sivuuttivat sähköautot vuosikymmenien ajaksi. 1970-luvulla öljyn rajallinen määrä ja fossiilisten polttoaineiden aiheuttamat ympäristöongelmat johtivat vaihtoehtoisten ajoneuvojen kehitykseen. Kehitys oli alkuun varsin hidasta: vielä 2004 hybridajoneuvojen osuus markkinoista oli 0,25 %. [3, s. 2–3] Vuoden 2021 ensimmäisen puoliskon aikana sähkökäyttöisten ajoneuvojen osuus myydyistä ajoneuvoista oli kuitenkin 14 % ja kasvun ennustetaan jatkuvan tulevaisuudessa [4].

### 2.1 Rakenne

Rakenteeltaan sähkökäyttöiset ajoneuvot ovat kuvan 1 kaltaisia. Latausportin kautta tullut vaihtovirtainen sähkö tuodaan AC/DC-muuntimelle, jolloin akkua saadaan ladattua tasavirtaisella sähköllä. Suuri akkupaketti sijaitsee yleensä auton alaosassa, josta energia kulkeutuu etuosassa olevaan moottoriin. DC/DC-muuntimen avulla akkupaketilta tullut jännite alennetaan muun muassa käynnistysakun ja muiden auton lisävarusteiden käytettäväksi. Ohjauselektronikka autossa valvoo sekä latauksen aikana muun muassa lämpötilaa ja virtatilannetta että ajon aikana moottorin toimivuutta.

## Sähkökäyttöinen ajoneuvo



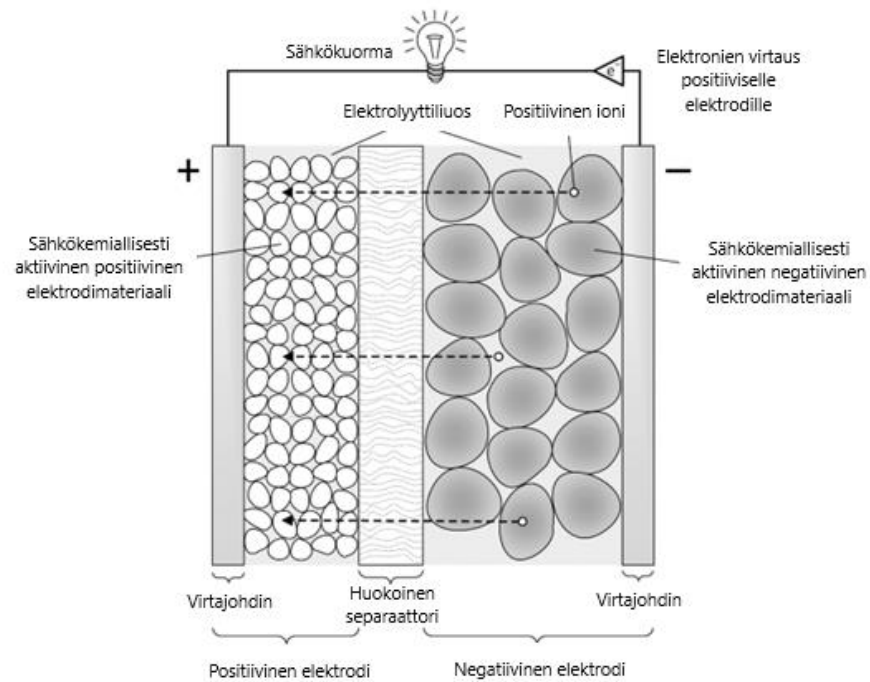
afdc.energy.gov

**Kuva 1.** Sähkökäyttöisen ajoneuvon yleinen rakenne [5, muokattu].

Toiminnaltaan sähkökäyttöinen ajoneuvo on samankaltainen kuin tavallinen polttomoottorilla käyvä ajoneuvo: varastoitunut energia muutetaan moottorin avulla liike-energiaksi, jonka avulla pyöritetään renkaita. Polttoaineen polttamisen sijaan niissä hyödynnetään kuitenkin suurta akkupakettia.

## 2.2 Akku

Sähkökäyttöisissä ajoneuvoissa käytetään akkua energian varastointiin. Akussa on neljä pääkomponenttia: positiivinen elektrodi (katodi), negatiivinen elektrodi (anodi), elektrolyytti sekä separaattori. Elektrolyytin tarkoituksena on kuljettaa sähkövarauksia elektrodien välillä, kun taas separaattori pitää positiiviset ja negatiiviset elektrodit erillään toisistaan. Kuvasta 2 voidaan nähdä pääkomponenttien periaatteellinen sijainti sekä akun toimintaperiaate sitä käytettäessä.



**Kuva 2.** Akun toiminta sähkön purkautuessa [6, s. 28 muokattu].

Akun toiminta perustuu elektronien liikkeeseen sekä hapettumis- ja pelkistymisreaktioihin, joiden avulla saadaan tuotettua sähköenergiaa. Akkua ladatessa katodi hapettuu ja elektronit siirtyvät katodilta anodille. Kun akussa oleva sähkö purkautuu, eli sitä käytetään, tapahtuu taas pelkistymisreaktio katodilla ja elektronit siirtyvät anodilta katodille.

### 2.2.1 Litiumioniakku

Litiumioniakku on nykyaikana sähkökäyttöisille ajoneuvoille ensimmäinen akkuvaihtoehto. Akuille tyypillistä on, että anodi koostuu pääosin grafiitista ja elektrolyytinä toimii litium heksafluorifosfaatti. Akkujen katodille lisättiin alkuvaiheissa litioitua kobolttioksidia (LCO), joka toimi hyvin pienten sähkölaitteiden, kuten puhelimien ja kameroiden kanssa. [7] LCO-akun katodilla purkauksen tapahtuessa kobolttioksidi toimii purkautuneelle litiumille isäntänä ja pelkistyminen etenee reaktioyhtälön



mukaisesti. Vastaavasti anodilla stabiilille grafiitille reaktioyhtälö on



Reaktiot (1) ja (2) ovat akkua ladatessa käänteiset. Nykyään kuitenkin ajoneuvokäytössä katodille käytetään useita eri materiaaleja, joista yleisiä ovat mangaanioksidi (LMO), rau-



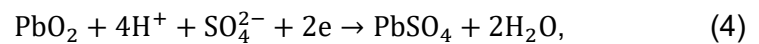
tafosfaatti (LFP), titanaatti (LTO), nikkeli-koboltti-alumiinioksidi (NCA) sekä nikkeli-mangaani-kobolttioksidi (NMC). Suluissa esitetyt lyhenteet ovat akkutyypeille yleisesti käytettyjä nimityksiä. [7] Edellä mainituilla akkutyypeillä on huomattavia eroja eri ominaisuuksissa, kuten syklisessä kestävyudessa, turvallisuudessa, ominaisenergiassa tai käyttölämpötilassa. Näitä sekä muita ominaisuuksia käsitellään tarkemmin luvuissa 5 ja 6 vetykäyttöisten autojen kanssa käydyn vertailun yhteydessä.

### 2.2.2 Lyijyakku

Lyijyakussa on elektrodeina toimivat lyijylevyt ja elektrolyyttinä on rikkihappoa. Lyijyakkuja on halpaa ja helppoa valmistaa sekä ne toimivat hyvin eri lämpötiloissa. Suuren ominaistehon ja korkeiden purkautumisvirtojen johdosta niitä onkin käytetty ajoneuvoissa jo yli vuosisadan ajan käynnistystä varten. Tästä syystä niitä käytetäänkin myös avustavana akkuna sähkö- ja vetykäyttöisissä autoissa litiumioniakkujen sijaan. [8] Lyijyakun anodilla tapahtuva reaktioyhtälö on



jossa kiinteä lyijy muodostaa sulfaatin kanssa lyijysulfaattia. Katodilla tapahtuvan reaktion yhtälö taas on



jossa syntyy lyijysulfaatin lisäksi vettä. Myös reaktiot (3) ja (4) ovat akkua ladatessa päinvastaiset.

Lyijyakut eivät kuitenkaan ole pääenergiavarastona käytössä nykyaikaisissa sähköajoneuvoissa. Muutamia niiden huonoja puolia ovat hidas latausaika, matala ominaisenergia ja rajoitettu sykli-ikä [8]. Nämä ajoneuvolle tärkeät ominaisuudet sekä muiden akkutyypin kehitys lopulta johtivat lyijyakun käytön energiavarastona lopettamiseen.

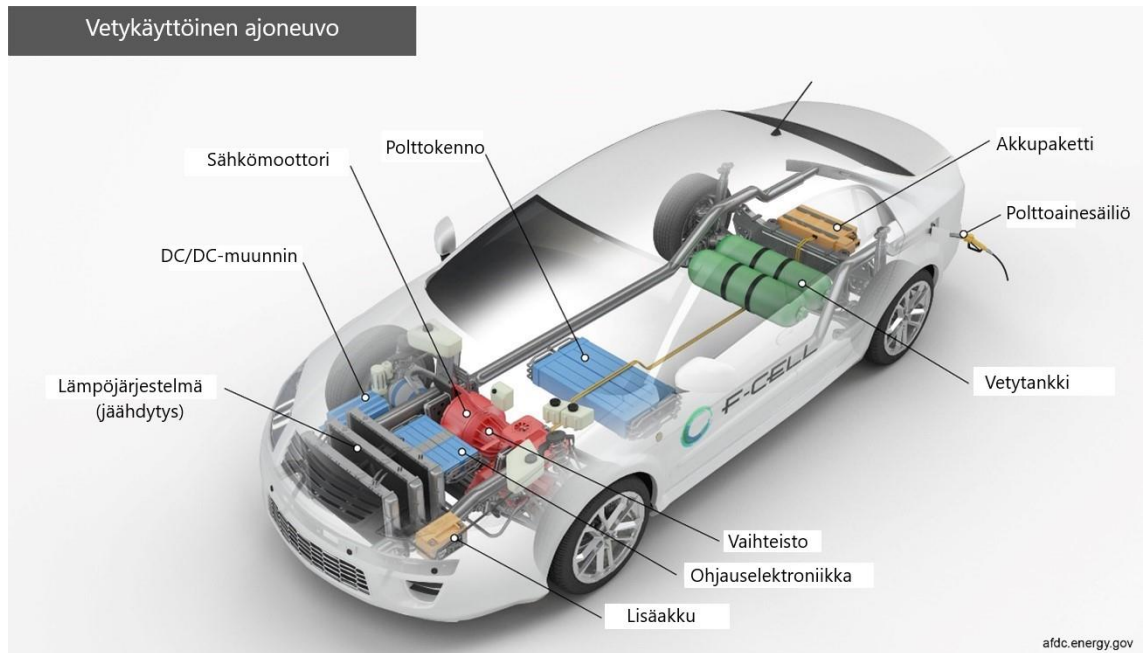
### 3. VETYKÄYTTÖINEN AJONEUVO

Vetykäyttöisen ajoneuvon luvussa käydään lyhyesti vetyauton historiaa ja tutustutaan ajoneuvon sekä polttokennon toimintaperiaatteisiin. Polttokennoista tarkemmin käsitellään ajoneuvokäyttöön soveltuvaa kiinteää polymeerikennoa (PEMFC), ja vedyn eri värien konseptia.

Vetyä alettiin hyödyntää ajoneuvoissa jo hyvin aikaisin 1800-luvulla. Jo vuonna 1807 sveitsiläinen Francois Isaac de Rivaz valmisti nelipyöräisen ajoneuvon, jossa hyödynnettiin vetykaasua varastoimalla sitä ilmapalloon. Vuonna 1860 kehitettiin niin sanottu Hippomobile, jossa oli vetykaasulla toimiva polttomoottori. Ajoneuvot olivat kuitenkin kovin alkeellisia ja jäivät muiden ajoneuvotyyppien jälkeen kehityksessä. 1900-luvun aikana polttokennotekniikkaa kehitettiin huomattavasti eteenpäin ja autojen valmistusta jatkettiin. Vetykäyttöiset autot ovat kuitenkin yleiskäytössä varsin uusi asia, sillä vasta vuonna 2008 ilmestyi ensimmäinen massamarkkinoille suunniteltu vetykäyttöinen auto Honda FCX Clarity. [9] Nykyään vetykäyttöisten ajoneuvojen määrä liikenteessä on noin 35 000, joista suurin osa sijaitsee Etelä-Koreassa, Yhdysvalloissa, Kiinassa ja Japanissa. Kyseisissä maissa onkin jo olemassa jonkinlaisia latausinfrastruktuuria vetyautoille. [10]

#### 3.1 Rakenne

Kuvassa 3 näkyy vetykäyttöisen auton tyypillinen rakenne, joka on hyvin samankaltainen sähköautoon nähden. Selkeinä eroina on vetytankki sekä polttokenno, jonka avulla tuotetaan vetykaasusta sähköenergiaa moottorille. Ajoneuvon taka-akselilla olevaa akkua hyödynnetään jarrutusenergian talteenotossa, mitä voidaan käyttää hyödyksi myös muissa sähkökäyttöisissä ajoneuvoissa. [11]



**Kuva 3.** Vetykäyttöisen ajoneuvon voimansiirron keskeisimmät osat [11].

Vetykäyttöisen ajoneuvon erikoisuutena on se, että jälkituotteena syntyy moottorin käytöstä vain vesihöyryä sekä lämpöä. Ajon aikana vetyauto voi olla päästötön tai peräti ilmaa puhdistava. Polttokenno vaatii varsin puhdasta happea, joten sen kautta kiertävä ilma viedään erilaisten suodattamien läpi, jolloin poistuva ilma on puhtaampaa kuin alkuperäinen ilma. Esimerkiksi Toyota Miraissa käytetyllä HEPA-suodattimella (High Efficiency Particulate Air) voidaan suodattaa ilmasta haitallisia aineita kuten rikkidioksidia, ammoniakkia sekä erilaisia typen oksideja. [14]

### 3.2 Polttokenno

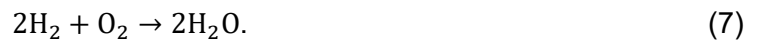
Polttokenno toimii sähkökemiallisena laitteena, jonka tarkoituksena on ajoneuvossa muuttaa kemiallinen energia sähköksi. Akun tavoin polttokenno koostuu elektrolyytistä sekä positiivisesta että negatiivisesta elektrodista. Polttokenno ei kuitenkaan ole energiavarasto, vaan energialähde sähkömoottorin ja vetytankin välissä. Polttokennossa painestettua vetyä viedään anodille ja happea kuljetetaan katodille. Negatiivisesti varautuneella anodilla vetyionit hajoavat negatiivisesti varautuneiksi elektroneiksi ja positiivisesti varautuneiksi vetyioneiksi reaktion



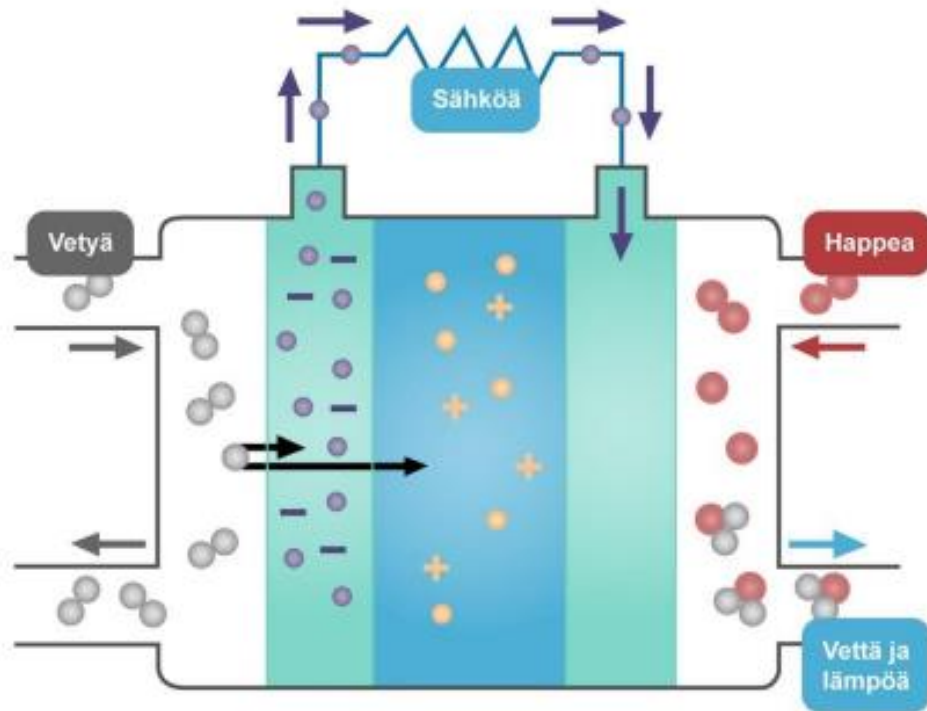
mukaisesti. Elektronit joutuvat kulkemaan katodille erillisen virtapiirin lävitse, jolloin sähkömoottorille saadaan vietyä tarvittua sähköenergiaa. Positiivisesti varautuneet vetyionit kykenevät kulkeutumaan elektrolyytin läpi katodille, jossa ne reagoivat yhdessä hapen sekä elektronien kanssa muodostaen vettä reaktion



mukaisesti. Vetyä siis niin sanotusti poltetaan kennossa, jolloin kokonaisreaktioksi saadaan



Kuvassa 4 on esitettyä kaavion muodossa polttokennossa tapahtuvat reaktiot. [13, s. 7–8]



**Kuva 4.** Polttokennon yleinen toimintaperiaate [12, s. 7].

### 3.3 Kiinteä polymeerikkenno

Tyypillisesti vetykäyttöisissä ajoneuvoissa käytetään kiinteitä polymeerikennoja, jotka toimivat alhaisissa lämpötiloissa hyvällä hyötysuhteella. Elektrolyytinä niissä käytetään siis liuosten sijaan polytetrafluorietyyleeniä (PTFE), jossa alkuperäisestä polyetyleenistä on korvattu vetyatomit fluorilla. Polymeerillä on vahvat sidokset fluorin ja hiilen välillä sekä se on varsin vettähykivää. Lopullinen elektrolyytti saadaan lisäämällä polymeeriin vielä sulfonihappoa  $\text{HSO}_3$ , joka kerää kosteutta säilyttäen kuitenkin vettä hylkivän ominaisuutensa. Hyvin vettä sitovilla alueilla vetyionit muodostavat heikkoja sidoksia rikki-riksidi-ionien kanssa, jolloin ionit pääsevät liikkumaan elektrodien välillä hyvin vapaasti. [13, s. 72–76] Kiinteän polymeerikennon teknisiin ominaisuuksiin tutustutaan tarkemmin teknisessä vertailussa luvussa 6.

### 3.4 Vedyn eri värit

Vaikkei polttokennossa synny reaktiotuotteina saastuttavia aineita, vetykaasun tuottaminen voi kuitenkin olla saastuttavaa. Tuotetulle vedylle voidaan antaa neljä eri väriä: harmaa, sininen, turkoosi sekä vihreä. Harmaalla vedyllä tarkoitetaan fossiilisilla polttoaineilla tuotettua vetyä, kun taas vihreällä vedyllä täysin uusiutuvalla energialla tuotettua vetyä. Niiden välissä sijaitsevat sininen vety, joka on tuotettu ilman hiilidioksidipäästöjä, sekä turkoosi vety, jota valmistetaan pyrolyysin avulla. Pyrolyysi perustuu metaanin termiseen hajoamiseen, jolloin saadaan lopputuotteina vetykaasua sekä kiinteää hiiltä. Sekä turkoosin että sinisen vedyn kohdalla tuotettu hiili sidotaan siten, että niistä ei aiheudu päästöjä. [27]

## 4. SÄHKÖMOOTTORI

Tässä luvussa tutustutaan lyhyesti sähkömoottorin toimintaan ja erilaisiin sähkömoottorityyppeihin, joita hyödynnetään sähkö- ja vetykäyttöisissä ajoneuvoissa.

Sähkö- ja vetykäyttöiset ajoneuvot voidaan molemmat luokitella niin sanottuihin täyssähköautoihin, joiden voimalähteenä toimii ainoastaan sähkömoottori. Sen toiminnan perustana on sähköön hyödyntäminen muuttamalla sähköenergia mekaaniseksi energiaksi. Ensiksi tarkastellaan magneettikentän ja virtajohtimien vuorovaikutusta, jossa virtajohtimeen syntyy kaavan

$$F = IlB \quad (8)$$

mukainen voima, jossa  $l$  on johtimen pituus,  $I$  on virta ja  $B$  on magneettivuontiheys. Sähkömoottorissa siis luodaan sähkömagneetti käärittyjen johtimien eli käämien avulla. Roottorissa, eli moottorin pyörivässä osassa vaihdellaan sähkömagneetin napaisuutta ja staattorissa, eli roottoria ympäröivässä osassa on joko kestromagneetteja tai lisää sähkömagneetteja, jotka luovat roottorin kanssa hylkivän magneettisen voiman. Tällöin moottori alkaa pyörimään ja moottorin keskellä oleva akseli tuottaa voimaa, joka ilmaistaan momenttina  $T$  kaavan

$$T = Fr \quad (9)$$

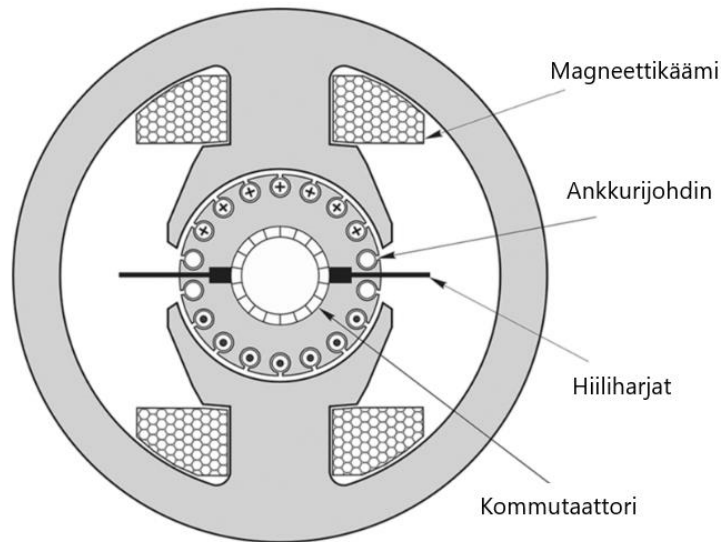
avulla, jossa  $r$  on roottorin säde. [15]

### 4.1 Tasavirtamoottori

Sähkömoottorit voidaan jakaa alustavasti niiden käyttämän virran tyypin perusteella. Tasavirtamoottoreissa tavallisesti hyödynnetään nimensä mukaisesti tasavirtaa.

#### 4.1.1 Harjallinen tasavirtamoottori

Harjallisille tasavirtamoottoreille erikoisuutena on kommutaattorit, jotka kääntävät sähkövirran eri suuntiin roottorin vastakkaisilla puolilla. Tämä pitää huolen siitä, että napaisuus on aina vastakkain, ja roottorin pyörintä säilyy. Kommutaattoreissa on lisäksi kaksi tai useampi hiiliharjaa, jotka muodostavat liukuvia kytkentöjä kommutaattorin kautta virtajohtimille. [15] Kuvassa 5 nähdään perinteisen harjallisen tasavirtamoottorin rakenne.



**Kuva 5.** Harjallisen tasavirtamoottorin rakenne [15].

Kommutaattorit joutuvat kovan mekaanisen rasituksen alle, sillä tasavirtamoottoreissa mekaaninen energia kulkee niiden lävitse moottorille. Tästä syystä harjalliset tasavirtamoottorit eivät ole enää hirveän suosittuja, sillä ne vaativat muita moottoreita huomattavasti enemmän hoitoa. [3, s. 55]

#### 4.1.2 Harjaton tasavirtamoottori

Harjattomassa tasavirtamoottorissa ei ole hiiliharjoja eikä kommutaattoria. Se on nimeltään myös hämmäntävä, sillä se vastaa kestmagnetoitua tahtimoottoria. Erona moottoreiden välillä on kuitenkin niille syötetty aaltomuoto: harjattomalle tasavirtamoottorille syötetään suorakulmaisia aaltoja ja tahtimoottorille taas sinimuotoisia. [6, s. 83–84] Kyseisessä moottorissa ei siis kuitenkaan käytetä tasavirtaa, vaan vaihtovirtaa, jonka aaltomuoto on omalaatuinen.

Harjattomien tasavirtamoottoreiden etu on niiden hyötysuhteessa, sillä magnetointi on niissä erotettuna voimaa tuottavista osista [15]. Harjattomia tasavirtamoottoreita käytetään kuitenkin yleensä vain hybridiajoneuvoissa, joissa moottorin koon ei tarvitse olla suuri. Niitä käytetään myös avustavina moottoreina useissa autoissa esimerkiksi ovien lukitsemiseen, tuulilasiin pyyhkimiseen tai ilmastointiin. [6, s. 84]

### 4.2 Vaihtovirtamoottori

Vaihtovirtamoottori on toinen, nykyään yleisemmin käytetty sähkömoottorityyppi. Vaihtovirtamoottoreissa käytetään myös nimensä mukaisesti vaihtovirtaa. Vaihtosähkösinimuotoisuuden vuoksi kommutaattoreille tai hiiliharjoille ei ole tarvetta. Vaihtovirtamoottorit vaativat täten invertterin käyttöä akun tasasähkömuuntamista varten.

### 4.2.1 Induktiomoottori

Induktiomoottorissa roottoriin indusoituu sähkömagneettisesti virta staattorikäänityksiltä. Staattorikäänitykset siis tuottavat roottorille tarvittavan energian ja säästytään harjallisen tasavirtamoottorin kaltaisilta mekaanisilta rasituksilta. Induktiomoottoireissa magneettikenttä myös liikkuu staattorin mukaisesti. Magneettikentän pyöriminen saadaan luotua tasapainoisen kolmivaihevirran avulla, jolloin jokaisella virralla on sama amplitudi, mutta 120 asteen ero keskenään. [15]

Induktiomoottori on suosittu sen luotettavuuden ja halvan hinnan sekä ylläpidon puolesta. Hyötysuhde induktiomoottorissa on kuitenkin matala, erityisesti alhaisilla tehoilla. [3, s. 56] Induktiomoottoireita esiintyy esimerkiksi Teslan Model S malleissa, joissa moottorit sijaitsevat sekä edessä että takana [6, s. 83].

### 4.2.2 Tahtimoottori

Tahtimoottoireista sähkökäyttöisissä ajoneuvoissa käytetään kestmagneettitahtimoottoria. Rakenne moottorille on induktiomoottorin tapainen, mutta roottorin käänitykset on korvattu kestmagneeteilla. Tällöin se näyttää harjattomalta tasavirtamoottorilta, mutta sille syötetty aaltomuoto on kuitenkin vielä eri. Tahtimoottorit toimivat syötön tahdin mukaan, joka on yleensä 50 tai 60 Hertziä. Tahtinopeus määräytyy napapariluvun ja käytetyn taajuuden mukaan, ja se voidaan ilmaista kaavalla

$$N_s = \frac{60f}{p}, \quad (10)$$

missä  $f$  on taajuus ja  $p$  napapariluku.

Kestomagneetoitua tahtimoottoria käyttävät mm. Nissan Leaf, Volkswagen e-Golf ja Toyota Prius V hybridi. Moottori on hyvin suosittu ajoneuvokäytössä mutta sen hinta on selkeästi, noin 20–25 %, induktiomoottoireita korkeampi. Moottorien tuottama teho on myös selkeästi induktiomoottoireita alempi. [6, s. 83]

### 4.2.3 Reluktanssimoottori

Reluktanssimoottorit ovat yksinkertaisia tahtimoottoireita, jossa roottori on muotoiltu siten, että se asettuu itsestään staattorin tuottaman magneettikentän mukaisesti. Roottorissa ei ole lainkaan käänitystä, joten magnetointi syntyy ainoastaan staattorista. [15] Roottorin ilmväleihin voidaan myös asentaa kestmagneetteja, jolloin saadaan niin sanottu kestmagneeteilla avustettu reluktanssimoottori. Tällaista moottoria käyttää mm.



BMW i3, jossa hyödynnetään moottorityypin korkeaa tehotehokkuutta ja laajaa nopeusalueita [6, s. 85]. Kalliiden hintojen vuoksi reluktanssimoottoreita ei kuitenkaan käytetä vielä laajasti.

## 5. TALOUDELLINEN VERTAILU

Taloudellisessa vertailussa tarkastellaan vety- ja sähkökäyttöisiä autoja kahdella eri las-  
kentamenetelmällä ja lopuksi käydään läpi latausverkoston olemassaoloa ja sen raken-  
tamista taloudellisesta näkökulmasta. Vertailussa käytetään tällä hetkellä myynnissä ole-  
via ajoneuvomalleja. Vetyautoista valittuna ovat vuoden 2021 markkinoita johtavat Hy-  
undai Nexo sekä Toyota Mirai [16]. Sähköautoista ovat vuonna 2020 kymmenen myy-  
dyimmän joukosta valittuina Tesla Model 3 sekä Model Y, Nissan Leaf ja Volkswagen  
ID.3 [38].

### 5.1 Omistamisen kokonaiskustannukset

Total Cost of Ownership (TCO), omistamisen kokonaiskustannukset, on menetelmä,  
jolla voidaan tarkastella hankinnan koko elinkaaren ajalta aiheutuneita kustannuksia.  
Kustannukset, jotka tässä huomioidaan ovat ostohinta, käyttö- ja huoltokustannukset,  
vakuutukset sekä verot. Lopulta auton jälleenmyyntihinta otetaan myös huomioon.

Ostohintojen löytämiseen käytettiin uutena ostettavien ajoneuvojen hintoja Saksassa il-  
man kannustimia. Vertailuun käytetyt autot valittiin lähinnä myyntilukujen perusteella,  
mutta Tesla Model Y lisättiin esimerkiksi vetyautojen hintaluokkaa vastaavaksi. Maaksi  
on valittu Saksa, sillä siellä on tällä hetkellä kattavin eurooppalainen latausverkosto ve-  
tyautoille [10]. Ostohinnat näkyvät taulukossa 1.

**Taulukko 1.** Valittujen ajoneuvomallien ostohinnat uutena.

Auto	Ostohinta
Nissan Leaf	29 990 € [17]
Volkswagen ID.3 Pro	35 460 € [17]
Tesla Model 3	46 560 € [17]
Tesla Model Y Performance	66 965 € [17]
Toyota Mirai	63 900 € [18]
Hyundai Nexo	77 290 € [19]

Autojen käyttökustannuksissa arvioidaan, että niitä käytetään 8 vuoden ajan ja autoa  
tulee ajettua yhteensä 160 000 kilometriä. Tämänhetkinen vetykaasun hinta Saksassa

on 9,50 €/kg [20]. Keskimääräinen sähkön hinta kotitalouksille vuoden 2021 ensimmäisellä puoliskolla oli 0,3193 €/kWh [21]. Taulukossa 2 on esitetty ajoneuvomallien tehokkuudet sekä kuinka suuret kilometrikohtaiset ja kokonaiskustannukset ovat. Laskennassa on oletettu, että hinnat pysyvät samana seuraavan 8 vuoden ajan.

**Taulukko 2.** Tarkkailtavien ajoneuvojen kulutuksen kustannukset.

Auto	Tehokkuus	€/km	Kokonaiskustannus (8 vuotta)
Nissan Leaf	164 Wh/km	0,052	8 378 €
Volkswagen ID.3 Pro	166 Wh/km	0,053	8 481 €
Tesla Model 3	150 Wh/km	0,048	7 663 €
Tesla Model Y Performance	177 Wh/km	0,057	9 043 €
Toyota Mirai	0,84 kg H <sub>2</sub> /100 km	0,080	12 768 €
Hyundai Nexa	0,83 kg H <sub>2</sub> /100 km	0,079	12 616 €

Huolto- sekä korjauskustannukset molemmille ajoneuvoille voidaan arvioida olevan samankaltaisia. Ajoneuvoissa on huomattavasti vähemmän liikkuvia osia verrattuna tavalliseen polttomootoriautoon, mutta erityisosaamista vaativat huoltotoimenpiteet voivat olla kalliimpia. Sähkö- ja vetykäyttöisille henkilöautoille on arvioitu n. 0,061 \$/mi huoltokustannukset, josta saadaan kokonaiskustannukseksi kullekin 5 440 €. [22 s.83, 90]

Ajoneuvot ovat verovapautettuja vuoteen 2025 asti, jonka jälkeen verotus jatkuu ajoneuvon koon sekä moottorin iskutilavuuden mukaan [23]. Moottorin iskutilavuutta ei kuitenkaan voida sähkömoottorisille ajoneuvoille ilmoittaa, joten verovapautuksen oletetaan jatkuvan 8 vuoden ajan.

Vakuutuksen hintaan vaikuttavat monet ajoneuvoihin liittymättömät syyt, joihin voidaan lukea muun muassa vakuutuksen ottajan ikä, sukupuoli, ajokokemus tai aikaisemmat liikennerikkomukset. Ajoneuvojen välillä itsessään ei ole suuria eroja vakuutuksen suuruudessa, joten summaksi valitaan Saksassa vakuutettujen autojen keskiarvo vuodelta 2019. Keskiarvoksi saadaan 593 euroa vuodessa. [24]

Lopuksi autojen jälleenmyyntihinnat otetaan huomioon. Työssä arvioidaan, että arvon aleneminen on samalla tasolla kuin polttomootorikäyttöisillä autoilla. Autojen tyyppien

välillä ei myöskään ole suurta vaikutusta hinnan alenemiseen [25 s. 7]. Kahdeksan vuoden jälkeen voidaan siis arvioida, että autojen ostohinnasta jäljellä on noin 25 % [25 s. 35]. Taulukkoon 3 on laskettu autojen lopulliset omistamisen kokonaiskustannukset lisäämällä ostohintaan edellä lasketut eri kustannukset sekä vähentämällä lopuksi auton jälleenmyyntihinnan.

**Taulukko 3.** Autojen lopulliset omistamisen kokonaiskustannukset.

Auto	Omistamisen kokonaiskustannukset
Nissan Leaf	41 055 €
Volkswagen ID.3 Pro	45 260 €
Tesla Model 3	52 767 €
Tesla Model Y Performance	69 450 €
Toyota Mirai	70 877 €
Hyundai Nexa	80 768 €

Taulukosta nähdään, että omistamisen kokonaiskustannuksien laskennan jälkeen vetykäyttöiset autot ovat vielä huomattavasti sähkökäyttöisiä autoja korkeampi hintaisia. Ajoneuvojen kustannuksien erot syntyivät lähinnä polttoainekustannuksissa sekä alkuperäisissä ostohinnoissa, sillä muut kustannukset ovat arvioitu samankaltaisiksi. Silti huomataan, kuinka ostohinnaltaan hieman hintavampi sähköauto Tesla Model Y on lopulta kokonaiskustannuksiltaan edullisempi kuin vetykäyttöinen Toyota Mirai.

Menetelmässä ei kuitenkaan huomioitu rahan arvon muuttumista ajan myötä, eikä myöskään polttoainekustannuksien mahdollisia muutoksia, joita on ennustettu tapahtuvan tulevaisuudessa. Näitä tarkastellaan tarkemmin seuraavassa luvussa nettonykyarvon laskennan avulla.

## 5.2 Nettonykyarvo

Toinen hyödyllinen työkalu ajoneuvojen kannattavuuden analysointiin on nettonykyarvo (NPV), joka kertoo sijoituksen investoinnin ja kaikkien tulevien rahavirtojen tämänhetkisen rahallisen arvon. Nettonykyarvo lasketaan kaavalla

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (11)$$

jossa  $t$  tarkoittaa aikaa,  $C$  kassavirtaa ajassa  $t$  ja  $i$  käytettyä diskonttokorkoa. Diskonttokorkoa käytetään, sillä rahan arvo tällä hetkellä on suurempi kuin tulevaisuudessa. Diskonttaamalla saadaan laskettua alennuksen määrä rahavirroille ja edelleen nykyarvo. Tässä laskelmassa diskonttokoroksi on oletettu 5 %, joka on pääoman sijoittamiselle mahdollinen korko, mikäli se olisi sijoitettu muualle.

Nettonykyarvon laskemisessa hyödynnetään luvussa 5.1 esitettyjä kustannuksia eri osaluokille. Aiemmin mainitun sähkön hinnan kuitenkin oletetaan nousevan seuraavan kahdeksan vuoden aikana. Hinta perustuu vielä vahvasti fossiilisten polttoaineiden hintoihin, joiden ennustetaan nousevan tasaisesti niiden rajallisen määrän vuoksi. Sähkön hinnan nousulle on esitetty monia eri mahdollisuuksia, jotka riippuvat siitä, kuinka sähköntuotannon eri muotoja lisätään tulevana vuosina. Hinnan vaihtelu tulee myös lisääntymään tulevana vuosina huomattavasti, sillä uusiutuvien energialähteiden osuus sähköntuotannosta tulee olemaan suurempi. [26 s. 10, 15] Nettonykyarvon laskentaa varten kuitenkin on arvioitu sähkön hinnalle noin 2 prosentin vuosittainen kasvu.

Vihreän vedyn hinnan oletetaan taas laskevan seuraavien vuosikymmenien aikana huomattavasti uusiutuvan energian sekä elektrolyysilaitteiden tullessa halvemmiksi. Vihreä vety on kuitenkin vielä huomattavasti kalliimpaa kuin harmaa vety, joka kattaa 95 % käytetystä vedystä Saksassa. [27, s. 4] Laskelmassa siis oletetaan, että vedyn hinta ei muutu tulevien lähivuosien aikana.

Taulukkoon 4 on merkitty nettonykyarvon laskentaan tarvittavat suureet sekä rahavirtojen muutos vuosien myötä. Taulukossa ilmoitetut ajokilometrit jakautuvat tasaisesti käyttövuosille. Laskelmassa tehdään myös oletus, että auton käyttö loppuu vuoteen 8, jolloin vähennetään kokonaissummasta auton jälleenmyyntihinta. Lopullinen tulos siis kertoo kokonaiskustannuksen auton omistamiselle tämänhetkisessä rahallisessa arvossa.

**Taulukko 4.** *Nettonykyarvon laskennan suoritus kahdelle ajoneuvolle.*

<b>Nettonykyarvo</b>	<b>Tesla Model 3</b>	<b>Toyota Mirai</b>
<b>Diskonttokorko</b>	5 %	5 %
<b>Ostohinta</b>	46 560 €	63 900 €
<b>Ajokilometrit vuodessa</b>	20 000	20 000
<b>Käyttövuodet</b>	8	8
<b>Huolto vuodessa</b>	680 €	680 €
<b>Vakuutus vuodessa</b>	593 €	593 €
<b>Sähkö vuodessa</b>	958 €	-
<b>Polttoaine vuodessa</b>	-	1 596 €
<b>Jälleenmyyntihinta</b>	11 640 €	15 795 €
<b>Rahavirrat</b>		
<b>Vuosi 1</b>	2 231 €	2 869 €
<b>Vuosi 2</b>	2 250 €	2 869 €
<b>Vuosi 3</b>	2 270 €	2 869 €
<b>Vuosi 4</b>	2 290 €	2 869 €
<b>Vuosi 5</b>	2 310 €	2 869 €
<b>Vuosi 6</b>	2 331 €	2 869 €
<b>Vuosi 7</b>	2 352 €	2 869 €
<b>Vuosi 8</b>	2 373 € (-11 640 €)	2 869 € (-15 795 €)
<b>NETTONYKYARVO</b>	53 519 €	71 630 €

Taulukosta 4 huomataan samankaltaisia tuloksia kuin luvun 5.1 omistamisen kokonaiskustannuksen laskennassa. Vaikka laskennassa on oletettu sähkön hinnalle kasvua, vetäytön nettonykyarvo jää silti huomattavasti suuremmaksi. Taulukkoon 5 on vielä koottu kaikkien tarkasteltujen autojen nettonykyarvot.

**Taulukko 5.** Lopulliset nettonykyarvot kaikille työssä tarkastelluille ajoneuvoille.

Auto	Nettonykyarvo
Nissan Leaf	39 753 €
Volkswagen ID.3 Pro	44 297 €
Tesla Model 3	53 519 €
Tesla Model Y Performance	70 472 €
Toyota Mirai	71 630 €
Hyundai Nexa	82 754 €

Taulukosta 5 huomataan, kuinka saman hintaluokan ajoneuvo Tesla Model Y Performance saa nettonykyarvokseen 70 472 €, joka jää kuitenkin Toyota Mirain nettonykyarvoa matalammaksi. On myös hyvä huomioida, että käytetty Saksan sähkön hinta on tällä hetkellä Euroopan kalleinta. Käyttämällä vertailussa halvempaa sähköä, joka on esimerkiksi Suomessa 0,1767 €/kWh, saadaan lopputuloksista vielä suotuisimmat sähköautoille. Eri valtioiden antamat avustukset voivat kuitenkin olla riittävän suuria, että vetyautoilu on taloudellisesta näkökulmasta hyvin samalla tasolla sähköautojen kanssa.

### 5.3 Latausverkosto

Suurin vetykäyttöisten ajoneuvojen ongelma on latausverkoston olemassaolon puute. Maailman 540 vetyasemasta 79 % sijaitsee viidessä eri maassa: Japanissa, Saksassa, Kiinassa, Yhdysvalloissa ja Etelä-Koreassa. Loput 21 % sijaitsevat muissa maissa, joissa vetyinfrastruktuuria ei ole vielä niin selkeästi luotu. [10] Lukuisissa maissa, kuten Suomessa, ei siis ole lainkaan vetyasemia, jolloin vetyauton käyttö vaatisi vetykaasun hankkimisen muualta. Suomessa huoltoasemia fossiilisen bensiinin tai dieselin tankkaamiseen on pelkästään Nesteellä 712 [28], ja sähköautojen latauspisteitä löytyy Suomesta lähes 5000 kappaletta [29]. Vetyauto olisi siis monessa maassa myös käytännöllisyyden puolesta hankala.

Taloudellisesta näkökulmasta vetyasemien rakentaminen riittävän verkoston luomiseen vaatii suuria investointeja. Yhdysvalloissa suunniteltujen 111 vetyaseman rakentamisen on arvioitu maksavan noin 1,68 miljoonaa euroa vetyasemaa kohti [30]. Pelkästään kattavan verkoston luominen vaatisi siis usean kymmenen miljoonan investoinnin. Lisäksi

maissa, kuten Suomi, pitäisi vetyautoilusta tehdä kuluttajille houkuttelevampaa, jotta vetyasemien rakentaminen olisi yrityksille tai valtiolle kannattavaa. Vetyautot ovat kuitenkin vielä selkeästi muita vaihtoehtoja hintavampia, eikä moneen maahan vetyasemien suurimittaista rakentamista tule tapahtumaan lähivuosina.

Valtion antama rahallinen tuki on kuitenkin eräs keino nopeuttaa latausinfrastruktuurin luomista. Maailman vetyautoilua johtavassa maassa Etelä-Koreassa investoidaan vetyautoiluun yli 2 miljardin euron edestä vuoteen 2022 mennessä. Rahalla aiotaan edistää muun muassa vetyautojen kehitystä, lisätä niiden määrää ja rakennuttaa uusia vetyasemia. Kuluttajalle tämä näkyy esimerkiksi Hyundai Nexon ostaessa jopa 26 000 euron avustuksena. Vetyasemien rakennuttajalle avustukset ovat myös hyvin suuret, sillä valtion avustukset kattavat noin puolet kokonaishinnasta tällä hetkellä. [31]



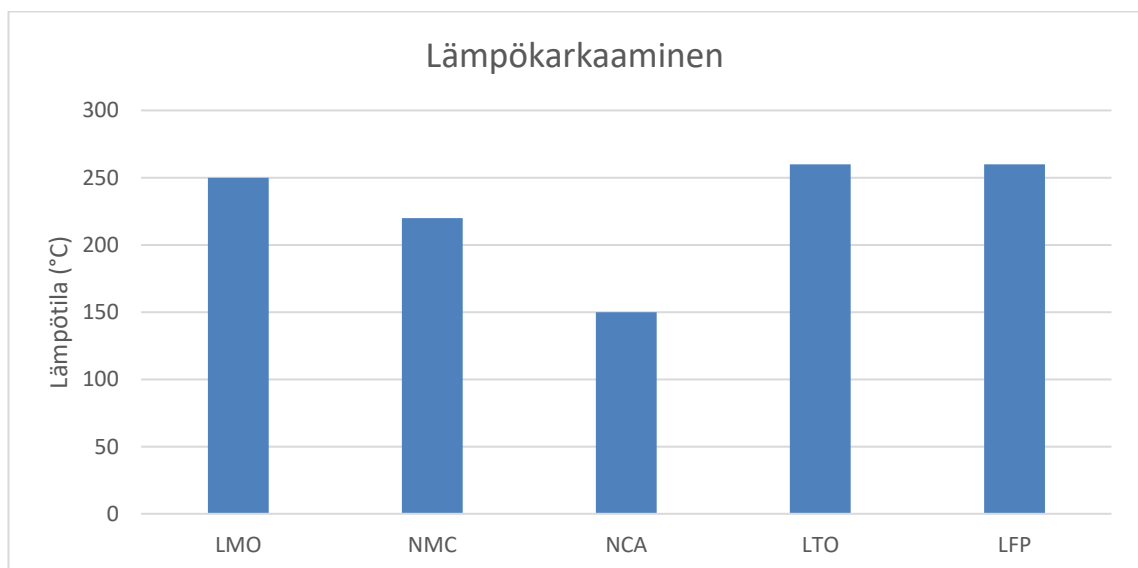
## 6. TEKNINEN VERTAILU

Sähkö- ja vetyajoneuvojen välisessä teknisessä vertailussa tarkkaillaan yleisiä ominaisuuksia, kuten turvallisuutta ja eri toiminnallisuuksia. Luvun loppuosassa käsitellään lisäksi massatuotannon mahdollisuutta.

### 6.1 Turvallisuus

Turvallisuus on yleinen huolenaihe, kun puhutaan sähköakuista sekä vetykaasusta. Vetykaasun yksinkertainen kemiallinen rakenne mahdollistaa sen, että kaasu on varsin tulenarkaa, ja omaa matalan syttymisenergian [32 s. 3]. Sähköakuilla on taas mahdollista muun muassa latauksen aikana tulipalon syttyminen [33]. Mahdollisen onnettomuuden sattuessa litiumioniakun sadat kennot saattavat myös vaurioitua ja siten syttyä palamaan.

Litiumioniakkujen suurimpana turvallisuusongelmana on lämpökarkaaminen. Yleisiä syitä sen alkamiselle ovat liian matala tai korkea virta, jännite tai lataustila, sekä separaattorissa olevat mahdolliset virheet. Seurauksena syntyy metallipinnoitetta ja metallisia dendriittejä, jotka aiheuttavat sisäisiä oikosulkuja. Lopulta kennon sisäinen lämpötila kasvaa liian suureksi, jolloin katodilla oleva oksidi hajoaa ja vapauttaa happea. Tällöin kennon sisällä on happea ja polttoainetta, mikä johtaa rajuun lämpötilan nousuun. Lämpökarkaamisen seurauksena on yleensä sulaminen, rakenteen rikkoutuminen tai jopa räjähdys. [34] Alla kuvassa 6 on esitetty yleisiä litiumioniakkutyyppisiä ja niiden lämpökarkaamisen lämpötilarajoja.



**Kuva 6.** Lämpötiloja, jossa lämpökarkaaminen tapahtuu eri litiumioniakuilla [35, s. 5–6].

Lämpötilarajojen lisäksi on myös tärkeää tietää, kuinka vahvasti eri metallit reagoivat lämpökarkaamisen tapahtuessa. Alhaisten rajojen omaavien NCA- sekä NMC-akun lämpökarkaamisen reaktiot ovat varsin voimakkaita: 470 sekä 200 celsiusasteen muutos minuutissa vastaavasti. LFP-akulle lämpökarkaaminen on taas lähes huomaamaton 1,5 °C:n muutos minuutissa. NCA-akuista ollaan kuitenkin siirtymässä pois toisiin akkutyyppiin turvallisuus- sekä taloudellisista syistä, joten akkujen palamisherkkyyttä esiintyy enemmän vanhemmissa ajoneuvomalleissa. [37]

Lisäksi sähkökäyttöisissä ajoneuvoissa käytetyt akut lisäävät ajoneuvon painoa huomattavasti. Akkupaketti painaa useita satoja kiloja, mikä on moninkertainen verrattuna saman kantaman ajoneuvon vetytankin massa. Tämä akkupaketin tuoma suurempi massa on turvallisuuden näkökulmasta positiivinen asia, sillä yleisesti raskaammat ja isommat ajoneuvot selviävät onnettomuustilanteissa paremmin [36]. Molemmissa ajoneuvotyypeissä painavat voimantuoton osat sekä energiavarastot ovat myös sijoitettu korin alaosaan, mikä lisää ajoneuvon ohjattavuutta ja vähentää auton mahdollisuutta kaatua kyljelleen tai pyörähtää ympäri.

Vetykäyttöisissä autoissa suurin turvallisuusriski liittyy vetykaasun vuotamiseen. Vetykaasu on luonnoltaan palovaarallisuutensa lisäksi hajuton ja myrkytön, mikä tekee siitä vaikeasti huomattavan jopa palamistilanteessa. Tavallisessa käytössä palamistilannetta ei oikein voi syntyä, sillä polttokennon 60–90 celsiusasteen käyttölämpötila on liian alhainen ja kuitenkin polttokennossa tapahtuvan palon vahingot jäisivät vähäisiksi alhaisen vetykaasun määrän takia. Mahdollinen vaaratilanne voi taas syntyä, jos vetykaasua vuotaa hitaasti suljetussa tilassa, esimerkiksi autotallissa. Tällöin vetykaasun kerääntyminen voi johtaa ongelmiin, mikäli kaasun olemassaoloa ei huomata tarpeeksi ajoissa. Vetykäyttöisissä autoissa on siis suuri tarve mittausantureille, jotka havaitsevat mahdollisen vetykaasun vuodon. [32 s. 4]

Onnettomuustilanteissa molempien ajoneuvojen kohdalla on riski polttoainesäiliön puhkeamisesta. Akkupaketille kennojen materiaalivalinnalla on suuri merkitys. Lävistystestissä esimerkiksi NMC-akku syttyy lähes välittömästi palamaan, kun taas LFP-akulla ilmenee lähinnä lämpenemisreaktio [37]. Tulipalo on kuitenkin kovin vaikeaa sammuttaa korkean palamislämpötilan takia ja akustosta vuotaa myös palon aikana myrkyllisiä aineita ympäristöön. Ulospäin voi myös näyttää siltä, että tulipalo olisi sammunut, vaikka akkupaketin sisällä terminen karkaaminen jatkuu. Tämä edelleen lisää paloturvallisuuden riskiä tilanteissa, jossa palo voi levitä ympäristöön. [33]

Vetysäiliön tapauksessa räjähdysten tai tulipalon mahdollisuus on suurempi, sillä vetykaasua vuotaisi lyhyessä ajassa huomattavasti ja onnettomuudessa syntyneet kipinät

voivat helposti sytyttää kaasun. Vetykaasun räjähdysteho on kuitenkin huomattavasti heikompi kuin esimerkiksi bensiinin ja vetysäiliön rikkoutuminen ylipäättään on hyvin epätodennäköistä. Kipinointi voidaan hyvin suurelta osin myös estää katkaisemalla yhteys akkuun, joka on syynä noin 85 % paloista onnettomuustilanteissa. Tavalliseen polttomoottoriautoon verrattuna vetykäyttöiset ajoneuvot ovat hyvin samalla linjalla turvallisuuden puolesta. [32 s. 4–5] Mikäli sähkö- ja vetykäyttöisten ajoneuvojen ongelmallisuudet esimerkiksi vetykaasun sekä akun tilanteen suhteen huomioidaan, ei kumpikaan ajoneuvo ole toista merkittävästi vaarallisempi.

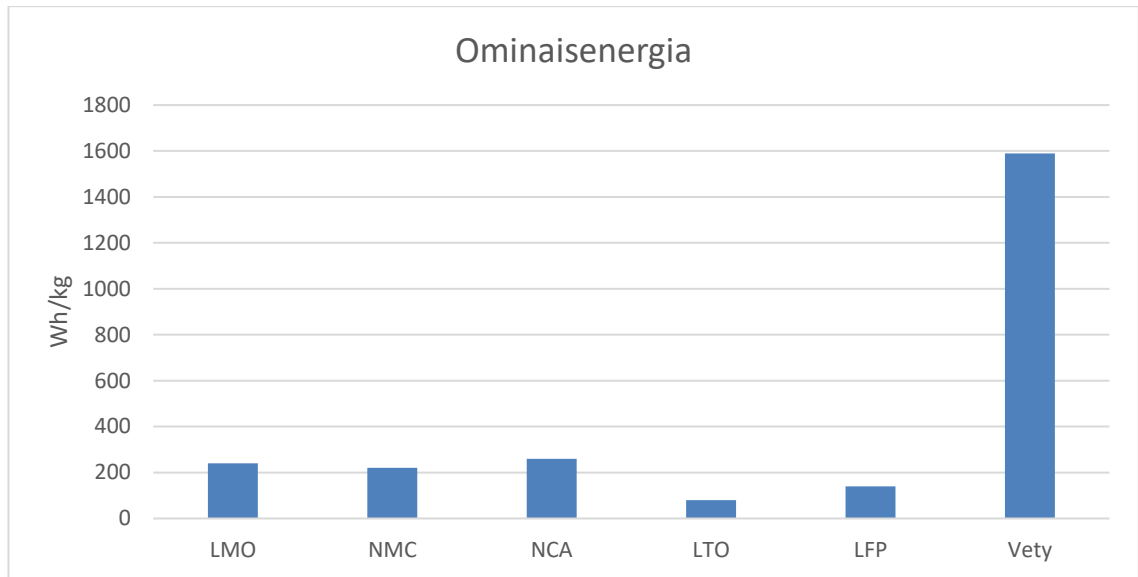
## 6.2 Toiminnallisuus

Toiminnallisuuden luvussa tarkastellaan vety- ja sähkökäyttöisten ajoneuvojen ominaisuuksia, kuten kantamaa, käyttöikää, latausaikaa ja energian hyötykäyttöä. Ajoneuvoja tutkitaan yleisestä näkökulmasta sekä hyödyntäen taloudellisessa vertailussa käytettyjä ajoneuvomalleja.

### 6.2.1 Kantama

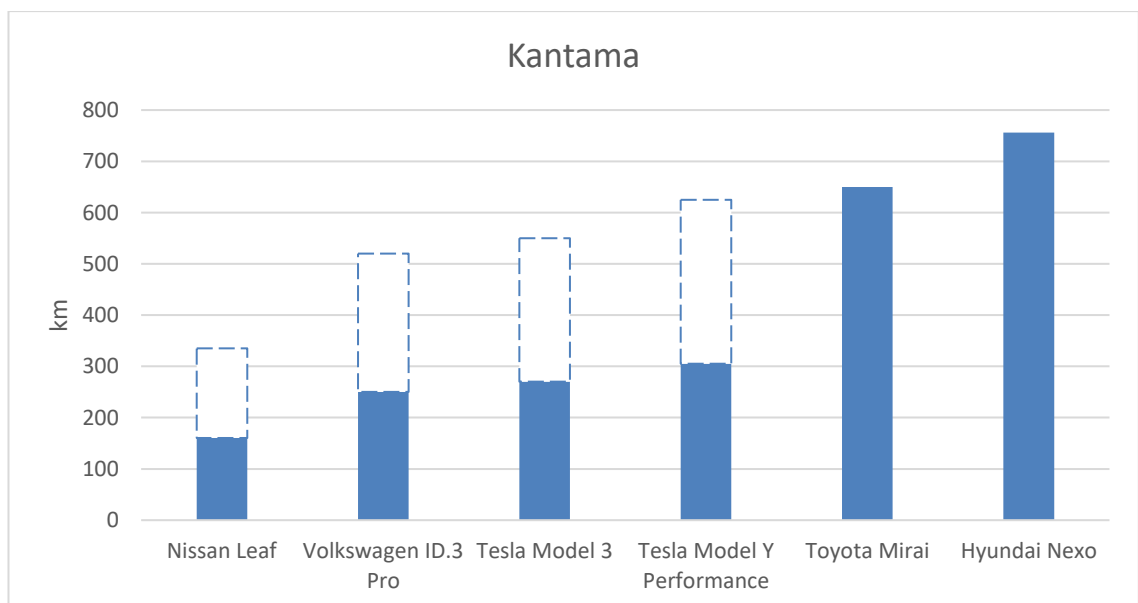
Eräs tärkeä ominaisuus auton käytännöllisyyden kannalta on kantama, joka oli pitkään suuri ongelma sähkökäyttöisissä ajoneuvoissa. Vielä ennen 2000-lukua tyypillistä oli, että kantamat jäivät alle 150 kilometrin [3 s. 3]. Akkujen kehitys on kuitenkin ollut nopeaa, ja sähkökäyttöiset ajoneuvot ovat nykyään kilpailukykyisempiä muiden ajoneuvotyyppien kanssa. Vetykäyttöisiin ajoneuvoihin verrattaessa tarkastellaan ensin ominaisenergioita, joka ilmaistaan wattitunteina kilogrammaa kohti.

Eri akkutyypin sekä paineistetun vedyn ominaisenergiat näkyvät kuvassa 7. Vetyä käytetään yleensä paineistettuna joko 350 tai 700 baarin paineella ajoneuvoissa [39, s. 77]. Tämä johtuu siitä, että tavallisissa ilmanpaine- sekä lämpötilaosuhteissa vedyn tiheys on varsin matala,  $0,0838 \text{ kg/m}^3$  [32], jolloin riittävän energiamäärän varastointi olisi ajoneuvokäyttöä varten hankalaa.



**Kuva 7.** Ominaisenergiat eri akuille ja paineistetulle vedylle [7][35, s. 5][39, s. 86].

Kuvasta 7 nähdään, kuinka vedyllä on huomattavasti korkeampi ominaisenergia verrattuna erilaisiin akkutyyppeihin. Paineistettua vetyä on siis helpompi säilöä kilogrammaa kohti. Vetytankit saadaan myös energiatiheydeltään erinomaisiksi, jolloin tankin tilavuuden kannalta ei synny ongelmaa [39, s. 77]. Ominaisenergian ero näkyykin ajoneuvoissa siten, että sähköajoneuvon akkupaketti on huomattavasti painavampi kuin vetytankki. Kantaman kannalta suuri ominaisenergia on puoleensavetävää, sillä siten on helpompaa saavuttaa suuri energiakapasiteetti kevyemmällä ajoneuvolla. Kantamia luvun 5 taloudellisen vertailun ajoneuvoille on esitetty kuvassa 8.



**Kuva 8.** Arvioituja kantamia työssä aikaisemmin esitetyille ajoneuvoille. Kuvassa olevat palkit katkoviivoilla esittävät muutosta kantaman suuruudessa lämpötilan tai ajonopeuden sekä -käyttötymisen muuttuessa. [17][18][40].

Kuvasta 8 nähdään, kuinka vertailussa käytetyillä vetykäyttöisillä autoilla ilmoitetut kantamat ovat pidemmät kuin sähkökäyttöisillä autoilla. Katkoviivoista myös huomaa, kuinka ympäristöolosuhteet vaikuttavat akkujen toimintaan. Kun lämpötila putoaa 23 celsiusasteesta -10 celsiusasteeseen ja lämmitys laitetaan päälle, kylmän kelin arvioitu kantama samoilla nopeuksilla on noin 65–78 % alkuperäisestä [17]. Vetykäyttöisille ajoneuvoille lämpötilan muutoksen vaikutus on pienempi kuin sähkökäyttöisille ajoneuvoille. Cleveland Staten yliopiston tutkimuksessa tutkittiin lämpötilan vaikutuksia sen pudotessa 50–60 fahrenheitasteesta 22–32 fahrenheitasteeseen. Tulokset osoittivat, että vetykäyttöisille busseille esiintyvä kantaman vähenemä on 23,1 %, kun taas sähkökäyttöisille busseille kantaman vähenemä on 37,8 %. [41 s. 3]

Kuvassa 8 esitetyt kantamat näyttävät myös seuraavan autojen hintaluokkia, sillä kantaman ero halvimpien ja kalliimpien mallien välillä on suuri. Kalliimpiin hintaluokkiin mentäessä sähköautot pääsevät kuitenkin vetyautojen kantamien tasolle. Luksusautoista voidaan valita esimerkiksi sähköauto Mercedes EQS 450+, jolle on arvioitu kantamaksi 470–895 kilometriä, ja hinnaksi ajoneuvolle tulisi noin 106 000 euroa [17]. Kantaman puolesta vetykäyttöiset ajoneuvot vaikuttavat kuitenkin olevan parempi vaihtoehto, sillä akkupaketin koko ja massa rajaavat ajoneuvojen tämänhetkistä kehitystä huomattavasti enemmän kuin vetytankit sekä polttokenno.

### 6.2.2 Käyttöikä

Käyttöikään ajoneuvoissa vaikuttaa useat tekijät ja tarkan käyttöiän arvioiminen on hankalaa. Litiumioniakuille haitallisia tekijöitä ovat esimerkiksi aika, lämpötila, korkeilla ja matalilla varaustiloilla toiminta, korkeat sähkövirrat sekä käyttösyklien määrä. Myös latauskäytännöt, esimerkiksi pikalatauksen käyttö nopeuttaa akun ikääntymistä. [42] Käyttöikää akuille voidaan tarkastella esimerkiksi sen terveydentilan (SoH – State of Health) arvioinnilla, joka määrittää akun jäljellä olevan hyödyllisen eliniän. Arviointia voidaan suorittaa laskemalla syklejä, kapasiteettiä sekä käyttötunteja. [6, s. 50]

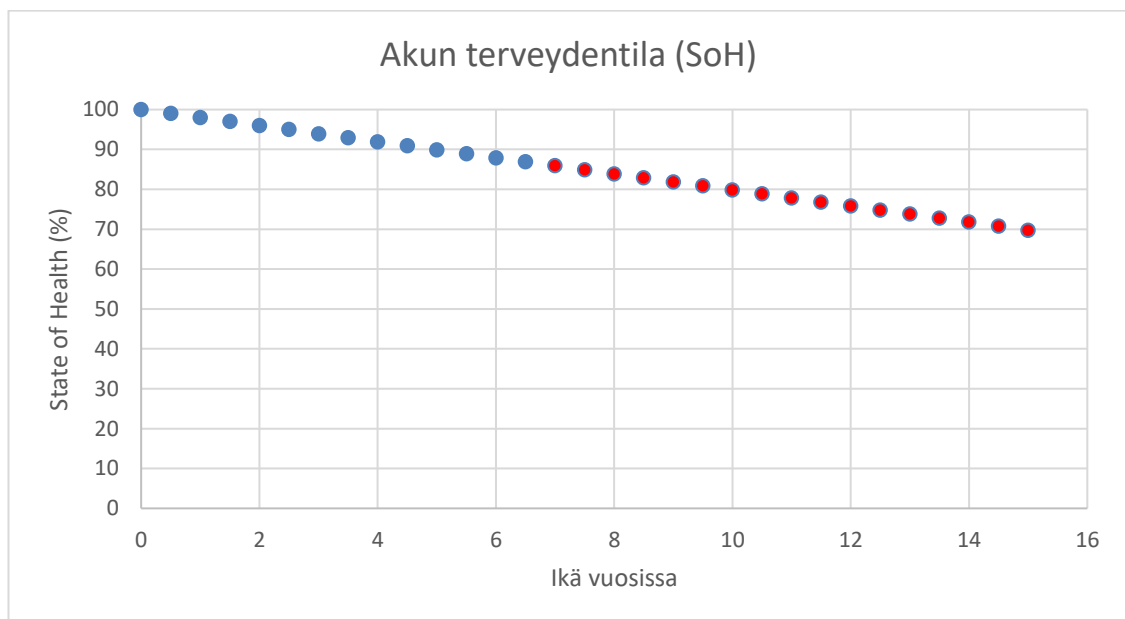
Vetykäyttöisille ajoneuvoille polttokennon käyttöikään vaikuttavat haitallisesti samat tekijät, kuten korkea jännite sekä lämpötila. Lisäksi eliniän pidentämistä varten tärkeää on muun muassa veden käsittelyn parantaminen, metallisaasteiden passivointi tai poistaminen sekä hapettumisvakauden parantaminen. Polttokennon heikentymistä voidaan seurata esimerkiksi tarkkailemalla nykyisen tehon suhdetta nimellistehoon tai kennojännitteen laskua tietyllä ajanjaksolla. [13, s. 24–25, 129]

CNRS:n (French National Centre for Research) polttokennojen heikentymisen tutkimuksessa päädyttiin tulokseen, että 5000 käyttötunnin jälkeen kennojännitteen lasku oli 11

$\mu\text{V}$  kullekin kennolle tunnissa ja tehokkuudessa esiintyi 9 % häviö alkutilanteeseen verrattuna. Teholle on asetettu yleisesti 10 %: alenemisen raja, joten arvioitu käyttöikä tällöin olisi yli 6000 tuntia. [43 s. 10] Käyttöikä voidaan muuttaa kilometreihin käyttämällä 70 km/h keskinopeutta, joka on karkea arvio kaupunki- ja moottoritieajon väliltä. Kilometreinä saadaan täten arvioitua käyttöäksi yli 420 000 km.

Sähkökäyttöiselle autolle käyttöiän määrittämiseen voitaisiin hyödyntää eri akkutyypin syklistä kestävyttä. Sykli-ikä ilmaisee kuinka monta lataus-purkausjaksoa akku kestää ennen kuin sen toiminta heikentyy merkittävästi. Eri akkutyypeille sykli-ikä vaihtelevat 300–7000 syklin välillä. Sykli-ikä vaihtelevat kuitenkin huomattavasti purkaus-syvyyden, eli akun nimelliskapasiteetista purkautuvan kapasiteetin osuuden, ja lämpötilan mukaan. [7] Sykli-ikä määrän perusteella käyttöikä on siis vaikea arvioida.

Sähköautoille on kuitenkin arvioitu eri automallien seurannalla akkujen keskimääräinen heikentyminen, jonka avulla saadaan akuille 86,5 %:n SoH kuuden vuoden ja kahdeksan kuukauden jälkeen. Annettu prosenttiluku vastaa jäljellä olevaa kapasiteettia. [42] Olemassa olevaa keskimääräistä akkujen heikentymien käyrää voidaan siis ekstrapoloida, jolloin saadaan kuvassa 9 esitetty käyrä. Käyrän avulla voidaan selvittää, milloin kapasiteetti on 70–80 %, jolloin yleensä on hyvä vaihtaa akkupaketti.



**Kuva 9.** Akun terveydentilan arviointi ekstrapoloimalla olemassa olevaa dataa sähköautojen akkujen heikentymisestä [42]. Punaiset pisteet ovat ekstrapoloituja kuvaajaan.

Kuvan 9 perusteella akut alittaisivat 80 %:n rajan noin kymmenessä vuodessa ja 70 %:n rajan viidessätoista vuodessa. Käyttämällä arvioitua 20 000 kilometrin vuosittaista ajomatkaa saadaan akuille noin 200 000–300 000 kilometriä ajettavaa. Lukema jää siis ve-

tyautoa huomattavasti pienemmäksi. Arvioinnissa käytetyssä tilastossa on kuitenkin mukana vanhempia ja akuiltaan huonompia ajoneuvoja, jotka vaikuttavat kokonaisvaltaiseen lukuun negatiivisesti. Esimerkiksi tässä kandidaatintyössä mainittua Nissan Leafin 24 kWh ja 30 kWh akkujen elinikää on tutkittu tarkemmin. Tutkitut ajoneuvot olivat valmistettu vuodesta 2011 vuoteen 2017 ja huomattiin, että 30 kilowattitunnin akku saavuttaa jo 2,1 vuodessa 85 %:n SoH rajan. 24 kilowattitunnin akku saavutti tämän rajan 4,6 vuodessa, mutta molemmat ovat kuitenkin selkeästi alempia kuin kuvan 9 kuvaajassa. [44, s.1, 7] Teslan julkaisemissa tiedoissa Teslan autojen akkukapasiteetin säilyvyyden nähdään taas olevan huomattavasti kuvaa 9 parempia. 322 000 kilometrin jälkeen akuilla on vielä keskimäärin jäljellä yli 85 % kapasiteetista [45].

Tuloksista vety- sekä sähkökäyttöisille ajoneuvoille nähdään, että varianssi on suurta. Käyttöikään vaikuttavia tekijöitä on monta, ja ideaaliolosuhteissa sekä oikein käytettynä ajoneuvo kestää huomattavasti kauemmin. Tuloksien perusteella voitaisiin sanoa, että yleisesti vetyautojen polttokenno pärjää paremmin kuin sähköautoissa käytetty akku. Tuloksissa käytettiin kuitenkin karkeita arvioita ja nykyiset ajoneuvot saattavat pärjätä tuloksia paremmin.

### 6.2.3 Hyötysuhde

Hyötysuhdetta voi vertailla vety- ja sähköajoneuvojen kannalta monesta eri kohdasta. Kokonaisuudessaan prosessi lähtee sähköä tuottavasta energialähteestä aina sähkömoottorille asti. Tässä työssä ajoneuvojen kannalta käsitellään siis niin sanottua ”well-to-wheel” -hyötysuhdetta, joka käsittelee koko tuotantoketjua. Tuotantoketjun oletetaan alkavan molemmille uusiutuvasta energialähteestä, kuten aurinkokennosta, jolloin esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden tuottaman sähköenergian hyötysuhdetta ei huomioida.

Ensimmäisenä vetyautolle sähkö tulee muuttaa vedyksi elektrolyysin avulla. Elektrolyysin hyötysuhde teollisuudessa on yleensä 60–75 % [13, s. 312]. Tämän jälkeen vetykaasu tulee muuttaa paineistetuksi, jotta sitä voi hyödyntää vetyautoissa. Paineistamisprosessin hyötysuhde on noin 90 % [46, s. 3]. Tämän jälkeen vety kuljetetaan ajoneuville, jotta ajoneuvo voidaan tankata. Kuljetuksesta syntyneitä kuluja ei huomioida tässä vertailussa. Sähköautolle vaaditaan alussa sähkönsiirto sähköverkkoa pitkin, josta syntyi Suomessa 3 %:n häviö [47]. Latauksessa syntyvät häviöt sähkökäyttöisille autoille vaihtelevat 8 ja jopa 40 %:n välillä [46, s. 3][48, s. 2]. Tässä vaiheessa ajoneuvoille voidaan laskea niin sanottu ”well-to-tank” -hyötysuhde, joka kertoo kuinka paljon häviöitä syntyy energian siirtyessä energialähteestä ajoneuvoon.

Ajoneuvoa käyttäessä vety tulee viedä ensin polttokennolle ja sitten invertterin kautta moottorille. Hyötysuhde polttokennolle on 60 %, sähkömoottorille 93 % sekä invertterille 97 %. Sähköautolta sähkö lähtee akkupaketista invertterin kautta moottorille, joiden hyötysuhteet ovat 95 %, 97 % ja 93 % vastaavasti. [39, s. 86] Tässä vaiheessa voidaan siis laskea ”tank-to-wheel” -hyötysuhde, joka kertoo kuinka paljon häviötä syntyy energian siirtyessä energiavarastosta lopulliseen ajoneuvon käyttöön. Lopulliset tulokset jokaiselle hyötysuhteelle löytyvät taulukosta 6.

**Taulukko 6.** Koko tuotantoketjun aikaiset hyötysuhteet vety- sekä sähkökäyttöiselle ajoneuvolle.

Hyötysuhteet	Vetyauto	Sähköauto
Well-to-tank	54–67,5 %	58,2–89,2 %
Tank-to-wheel	54,1 %	85,7 %
Well-to-wheel	29,2–36,5 %	49,9–76,5 %

Kokonaishyötysuhteen kannalta sähkökäyttöinen ajoneuvo on huomattavasti parempi. Käytännössä sähköauto ei ole missään vaiheessa vetyajoneuvoa hyötysuhteelta huonompi, sillä 40 %:n häviöt latauksen aikana ovat yleisesti hyvin harvinaisia.



## 7. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄ

Tulevaisuuden näkymä vety- sekä sähkökäyttöisille ajoneuvoille näyttää varsin valoisa. Pelkästään Euroopassa uskotaan olevan 14 miljoonaa sähkökäyttöistä ajoneuvoa vuonna 2025 ja vuodelle 2030 ennustetaan luvun nousseen jo 33–40 miljoonaan [4]. Autoissa olevien akkujen kokonaiskapasiteetin uskotaan olevan myös kymmenkertais- tunut vuoteen 2030 mennessä 1800 gigawattituntiin, josta osa voi muun muassa auttaa sähköverkon tasapainon ylläpitämistä. [49, s. 58]

Litiumioniakkujen rinnalle ennustetaan myös uusia akkuteknologioita, kuten litiumilma-akku, litiumrikkiakku sekä natriumioniakku. Litiumilma-akkujen ei kuitenkaan uskota nä- kevän huomattavaa markkinakasvua ennen vuotta 2030. Monilla suurilla akkuvalmista- jilla on tutkimus- ja kehitysohjelmiä luvassa litiumilma-akuille ja tuotteiden kaupallistami- sen eteen löytyy jo yritystä. Litiumrikkiakuilla on nykyään jo kaupallisia tuotteita, joilla on kaksinkertainen ominaisenergia (400–500 Wh/kg) sekä samankaltainen sykli-ikä li- tiumioniakkuun nähden. Markkinoiden uskotaan kasvavan huomattavasti vuoteen 2030 mennessä. Natriumioniakun uskotaan olevan käytetty enemmän muihin tarkoituksiin, sillä sen energiatiheys ei olisi riittävä ajoneuvokäyttöön. [49, s. 58–62]

Vetyinfrastruktuuriin liittyviä mittavia strategioita on esitetty monien maailman johtavien vetytalouksien puolesta. Etelä-Koreassa kannustetaan vetyautojen ostoon lähes 27 000 euron kannustimilla, jotta kunnianhimoinen 3 miljoonan vetyauton tavoite saavutettaisiin vuoteen 2040 mennessä. Kyseiseen vuoteen mennessä on myös suunniteltu investoin- teja 37 miljardin dollarin edestä luomaan vetyä tuottavia uusiutuvia energialähteitä. [31] Saksassa budjetti vetystrategialle on myös suuri: yli 21 miljardia euroa, josta investoi- daan jo vuoteen 2026 mennessä yli 12 miljardia. Investointeihin kuuluvat muun muassa vedyn tuotanto ja hyödyntäminen, vetyinfrastruktuuri ja tutkimus- sekä kehitystyö. Vetyä halutaan myös tuottaa nykyisen harmaan vedyn 95 % osuuden sijaan huomattavasti vih- reämmin ja kasvattaa elektrolyysifasiliiteettien kapasiteettia 750 MW:sta 5 GW:iin. [27]

## 8. YHTEENVETO

Työssä tutkittiin vety- ja sähkökäyttöisiä ajoneuvoja teknisestä sekä taloudellisesta näkökulmasta. Taloudellisesta näkökulmasta vetyautot ovat vielä selkeästi sähköautoja jäljessä. Halvimmat sähköautot ovat jopa tuplasti halvempia jo pelkältä ostohinnaltaan, ja rahallinen ero käyttäen elinkaarilaskentamenetelmiä pysyy hyvin samankaltaisena. Saman hintaluokan autoilla ilmenee myös suuria eroja mm. polttoainekustannuksissa, jolloin muodostuu hintaero sähköautojen hyväksi. Vetyautojen käytössä on myös suuria ongelmia latausverkoston puolella. Monessa maassa, kuten Suomessa, latausverkosto on olematon. Vetyauton käyttö ei siis ole lainkaan käytännöllistä ja pienenkin verkoston luominen vaatii kymmenien miljoonien investoinnin.

Teknisestä näkökulmasta käsiteltiin ensin turvallisuutta, jossa molemmilla on omat heikkoutensa. Vetykaasun ominaisuudet ovat huonoja palamistilanteissa ja akkujen käyttäytyminen muun muassa lataus- ja onnettomuustilanteissa voi aiheuttaa suuria ongelmia sekä ympäristölle että palohenkilökunnalle. Tavallisella käytöllä kunnossa olevan ajoneuvon kuitenkin pitäisi olla yhtä turvallinen kuin esimerkiksi polttomoottoriauto.

Kantamaa ja käyttöikää vertaillessa informaation puute aiheutti ongelmia, jolloin useita arvioita jouduttiin hyödyntämään. Estimaattien perusteella kuitenkin vaikuttaisi, että vetyautot ovat kyseisissä kategorioissa sähköautoja edellä. Hyötysuhteita laskiessa näkyi selkeästi, että sähköauton hyötysuhde on suurempi jokaisessa tuotantoketjun vaiheessa. Elektrolyyysin ja polttokennon hyötysuhteet ovat selkeitä heikkoja kohtia vetyautolle, kun taas sähköauton ainoana heikkoutena ovat latauksessa syntyvät häviöt.

Tulevaisuudessa vety- ja sähkökäyttöisten ajoneuvojen ennustetaan syrjäyttävän polttomoottorikäyttöiset ajoneuvot, ja useiden valtioiden valtavat investoinnit tukevat tätä mahdollisuutta. Jo nykyisellä tasolla ajoneuvot ovat kilpailukykyisiä ja niiden uskotaan olevan vielä enemmän puoleensavetäviä tulevien vuosien aikana. Ajoneuvojen kehitys sekä lisääntyminen tukee myös mahdollisesti energiasektoria suurella varastointikapasiteetilla.

# LÄHTEET

- [1] O. Hoegh-Guldberg, D. Jacob, M. Taylor, M. Bindi, S. Brown, I. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante, K. L. Ebi, F. Engelbrecht, J. Guiot, Y. Hijikata, S. Mehertra, A. Payne, S. I. Seneviratne, A. Thomas, R. Warren, and G. Zhou, *Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems*, IPCC, 2018, 138 p.
- [2] IEA, *The role of CCUS in low-carbon power systems*, IEA, Paris, 2020, Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-ccus-in-low-carbon-power-systems> (Viitattu 1.11.2021)
- [3] A. Khajepour, M. S. Fallah, A. Goodarzi, *Electric and Hybrid Vehicles : Technologies, Modeling and Control - a Mechatronic Approach*, John Wiley & Sons, Incorporated, 2014, 415 p.
- [4] Virta, *The global electric vehicle market overview in 2022: statistics & forecasts*, 2021. Saatavissa: <https://www.virta.global/global-electric-vehicle-market> (viitattu 29.10.2021)
- [5] U.S. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy: Alternative Fuels Data Center, *How do all-electric cars work?* 2021, Saatavissa: [Alternative Fuels Data Center: How Do All-Electric Cars Work? \(energy.gov\)](https://www.energy.gov/alternative-fuels-data-center/how-do-all-electric-cars-work) (viitattu 28.10.2021)
- [6] A. Rautiainen, K. Vuorilehto, A. Supponen, J. Rekola, J. Mäkinen, J. Koskela, *DEE-54206 Electrical energy storages and electric vehicles – Lecture notes*, Tampereen yliopisto, 2019, 119 p.
- [7] Battery University, *BU-205: Types of Lithium-ion*, last updated 22.10.2021, Saatavissa: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion> (viitattu 29.11.2021)
- [8] Battery University, *BU-201: How does the Lead Acid Battery work?*, last updated 21.10.2021, Saatavissa: <https://batteryuniversity.com/article/bu-201-how-does-the-lead-acid-battery-work> (viitattu 11.11.2021)
- [9] T. Perry, *History of Hydrogen Cars and Technology from 1802 to present*, Green Car Future, 5.4.2019, Saatavissa: <https://www.greencarfuture.com/hydrogen/history-of-hydrogen-cars> (viitattu 1.11.2021)
- [10] IEA, *Global EV Outlook 2021*, IEA, Paris, 2021, Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021> (viitattu 1.11.2021)
- [11] U.S. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy: Alternative Fuels Data Center, *How do fuel cell electric vehicles work using hydrogen?* 2021, Saatavissa: [Alternative Fuels Data Center: How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen? \(energy.gov\)](https://www.energy.gov/alternative-fuels-data-center/how-do-fuel-cell-electric-vehicles-work-using-hydrogen) (viitattu 28.10.2021)
- [12] R. Mikkonen, *Polttokennot ja vetyteknologia – luentomoniste*, Tampereen Yliopisto, 2020, 91 s.
- [13] A. L. Dicks, D. A. J. Rand, *Fuel cell systems explained*, Hoboken, New Jersey; Wiley, Chichester, England, 2018, 460 p.

- [14] J. Marsh, *Can Fuel-Cell Technology Clean the Air?*, *Altenergymag*, 29.3.2021, Saatavissa: <https://www.altenergymag.com/story/2021/03/can-fuel-cell-technology-clean-the-air/34725/> (Viitattu 14.11.2021)
- [15] J. L. Kirtley, H. W. Beaty, N. K. Ghai, S. B. Leeb, R. H. Lyon, *Electric Motor Handbook*, 1<sup>st</sup> ed, McGraw-hill Book Company, New York, 1998
- [16] FuelCellsWorks, *Worldwide Sales of Hydrogen Fuel Cell Cars Double from Last Year*, 7.10.2021, Saatavissa: <https://fuelcellsworks.com/news/worldwide-sales-of-hydrogen-fuel-cell-cars-double-from-last-year/> (Viitattu 16.11.2021)
- [17] Electric Vehicle Database, Saatavissa: <https://ev-database.org/compare/cheapest-electric-vehicle> (Viitattu 16.11.2021)
- [18] H2, *Toyota Mirai*, Saatavissa: <https://h2.live/en/fuelcell-cars/toyota-mirai/> (Viitattu 16.11.2021)
- [19] Hyundai, *Nexo Preise und technische Daten*, 2021, Saatavissa: <https://www.hyundai.de/hyundai.de/files/8f/8fa77d98-9f09-4920-903b-75fea4c3aeab.pdf> (Viitattu 16.11.2021)
- [20] Clever-tanken, Saatavissa: [https://www.clever-tanken.de/tankstelle\\_details/7105](https://www.clever-tanken.de/tankstelle_details/7105) (Viitattu 17.11.2021)
- [21] Eurostat, *Electricity price statistics*, last updated 9.11.2021, Saatavissa: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity\\_price\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics) (Viitattu 17.11.2021)
- [22] A. Burnham, D. Gohlke, L. Rush, T. Stephens, Y. Zhou, M. A. Delucchi, A. Birky, C. Hunter, Z. Lin, S. Ou, F. Xie, C. Proctor, S. Wiryadinata, N. Liu, M. Boolor, *Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification for Vehicles with Different Size Classes and Powertrains*. United States, 2021
- [23] European Alternative Fuels Observatory, *Germany*, Saatavissa: <https://www.eafo.eu/countries/germany/1734/incentives> (Viitattu 17.11.2021)
- [24] *Simple Germany, Car Insurance In Germany, 17.9.2021*, Saatavissa: <https://www.simplegermany.com/car-insurance-germany/> (Viitattu 17.11.2021)
- [25] C. Harto, *Electric Vehicle Ownership Costs: Today's Electric Vehicles Offer Big Savings for Consumers*, Consumer Reports, 2020
- [26] M. Afman, S. Hers, T. Scholten, *Energy and electricity price scenarios 2020-2023-2030*, CE Delft, Delft, 2017
- [27] M. Fuhrmann, *Germany's National Hydrogen Strategy*. In *Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute Monthly Report*, Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute (MCGSSI), 2020
- [28] Neste, Saatavissa: <https://www.neste.fi/asemat> (viitattu 19.11.2021)
- [29] Lumme Energia, *Sähköauton Lataus*, Saatavissa: <https://www.lumme-energia.fi/sahkoauton-lataus> (Viitattu 19.11.2021)
- [30] M. Koleva, M. Melaina, *Hydrogen Fueling Station Cost*, Department of Energy Hydrogen Program Record, 2020

- [31] J. Nakano, *South Korea's Hydrogen Industrial Strategy*, Center for Strategic and International Studies (CSIS), 5.11.2021, Saatavissa: <https://www.csis.org/analysis/south-koreas-hydrogen-industrial-strategy> (Viitattu 19.11.2021)
- [32] F. Barbir, *Safety issues of hydrogen in vehicles*, Energy Partners, 1999,
- [33] K. Puranen, *Sähköauto syttyi kolmesti – akkupalo on arvaamaton ja vaikea sammuttaa*, Pelastustieto, 28.6.2019, Saatavissa: <https://pelastustieto.fi/pelastustoiminta/operatiivinen-toiminta/sahkoauto-syttyi-kolmesti-akkupalo-on-arvaamaton-ja-vaikea-sammuttaa/#b00e7f4e> (Viitattu 7.11.2021)
- [34] B. Zollo, *Preventing Li-Ion Thermal Runaway During Battery-Cell Test*, ElectronicDesign, last updated 2.11.2020, Saatavissa: <https://www.electronicdesign.com/power-management/whitepaper/21146115/keysight-technologies-preventing-liion-thermal-runaway-during-battery-cell-test> (Viitattu 7.11.2021)
- [35] X. Liu, K. Li, X. Li, *The Electrochemical Performance and Applications of Several Popular Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles – A review*. In *Communications in Computer and Information Science* (CCIS), Springer Verlag, Chongqing, China, IMIOT and ICSEE 2018
- [36] IIHS, *Vehicle size and weight*, last updated April 2021, Saatavissa: <https://www.iihs.org/topics/vehicle-size-and-weight#how-size-and-weight-affect-safety> (viitattu 8.11.2021)
- [37] Powertech, *Safety of Lithium-Ion batteries*, Saatavissa: <https://www.powertechsystems.eu/home/tech-corner/safety-of-lithium-ion-batteries/> (Viitattu 8.11.2021)
- [38] D. Mihalascu, *These are the world's 10 fastest-selling EVs right now*, InsideEVs, 22.9.2021, Saatavissa: <https://insideevs.com/news/534931/the-fastest-selling-evs-worldwide/> (Viitattu 14.11.2021)
- [39] M. Handwerker, J. Wellnitz, H. Marzbani, *Comparison of Hydrogen Powertrains with the Battery Powered Electric Vehicle and Investigation of Small-Scale Local Hydrogen Production Using Renewable Energy*, Hydrogen 2021, 2, pp. 76–100.
- [40] Toyota, *2022 Mirai*, Saatavissa: <https://www.toyota.com/mirai/> (Viitattu 30.11.2021)
- [41] M. Henning, A. R. Thomas, A. Smith, *An Analysis of the Association between Changes in Ambient Temperature, Fuel Economy, and Vehicle Range for Battery Electric and Fuel Cell Electric Buses*, Urban Publications, 2019
- [42] C. Argue, *What can 6,000 electric vehicles tell us about EV battery health?*, Geotab, last updated 7.7.2020, Saatavissa: <https://www.geotab.com/blog/ev-battery-health/> (Viitattu 30.11.2021)
- [43] L. Vichard, F. Harel, A. Ravey, P. Venet, D. Hissel, *Degradation prediction of PEM fuel cell based on artificial intelligence*, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 45, Issue 29, 2020, pp. 14953-14963
- [44] D. Myall, D. Ivanov, W. Larason, M. Nixon, H. Moller, *Accelerated Reported Battery Capacity Loss in 30 kWh Variants of the Nissan Leaf*, Preprints, 2018, 14 pp.

- [45] Tesla, *Impact Report*, 2020, Saatavissa: [https://www.tesla.com/ns\\_videos/2020-tesla-impact-report.pdf](https://www.tesla.com/ns_videos/2020-tesla-impact-report.pdf) (Viitattu 30.11.2021)
- [46] U. Salahuddin, H. Ejaz, N. Iqbal, *Grid to wheel energy efficiency analysis of Battery and Fuel Cell powered vehicles*, International Journal of Energy Research, Volume 42, Issue 10, 2018, pp. 2021-2028
- [47] Statistics Finland, *Energy*, last updated 23.4.2021, Saatavissa: [https://www.stat.fi/tup/suoluk/suoluk\\_energia\\_en.html](https://www.stat.fi/tup/suoluk/suoluk_energia_en.html) (viitattu 30.11.2021)
- [48] A. Kiildsen, A. Thingvad, S. Martinenas, T. M. Sørensen, *Efficiency Test Method for Electric Vehicle Chargers*. In *Proceedings of EVS29 - International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, 2016, 10 pp.
- [49] N. Lebedeva, V. R. Ruiz, M. Bielewski, D. Blagoeva, A. Pilenga, *Batteries - Technology Development Report 2020*, EUR 30507 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-27289-2, doi:10.2760/24401, JRC123165.