



Jaakko Leinonen

Linja-autoliikenteen sähköistäminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

27.5.2021

Tiivistelmä

Tekijä: Jaakko Leinonen
Otsikko: Linja-autoliikenteen sähköistäminen
Sivumäärä: 27 sivua + 1 liite
Aika: 27.5.2021

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine: Autosähkötekniikka
Ohjaajat: Lehtori Pasi Kovanen

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin linja-autoliikenteen sähköistämisen vaikutusta kasvihuonepäästöihin ja latausinfrastruktuurin rakennetta. Työssä käydään läpi sähkö- ja polttomootorilinja-autojen voimalinjat, mutta työ keskittyy sähkölinja-autoihin.

Työ on tehty kirjallisuusselvityksenä. Sähköntuotannosta syntyviä päästöjä verrataan polttomootorikäyttöisiin diesel- ja biokaasuvaihtoehtoihin. Sähkölinja-autojen latausinfrastruktuurin rakenteesta tarkastellaan käytettäviä laturityyppejä sekä linja-autojen käytön aikaista pikalatausta ja varikoilla tapahtuvaa hidaslatausta.

Selvityksen perusteella sähkölinja-auton sähkönkulutuksen päästöt todettiin hyvin pieniksi laskettuna Suomen sähkönkulutuksen päästökertoimella. Sähkölinja-autojen latauksen odotetaan keskittyvän varikoille. Todettiin myös, että käytönaikaisessa latauksessa on mahdollisuus käyttää induktiivista latausta pantografilatauksen sijasta. Linja-autoliikenteen sähköistäminen on tärkeä askel kaupunkiliikenteelle. Osalla yrittäjistä on jo asia hallussa ja uusia sähkölinja-autoja tulee jatkuvasti enemmän liikenteeseen.

Avainsanat: linja-auto, bussi, liikenne, sähköistäminen, sähkölinja-auto

Abstract

Author: Jaakko Leinonen
Title: Electrification of Bus Transport
Number of Pages: 27 pages + 1 appendix
Date: 27 May 2021

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Automotive Engineering
Professional Major: Automotive Electronics Engineering
Supervisors: Pasi Kovanen, Senior Lecturer

This thesis studies the effect of bus electrification on greenhouse gas emissions and the structure of charging infrastructure. The power lines of electric and internal combustion engine buses are reviewed, but the focus is on electric buses.

The thesis was carried out as a literature review. Emissions from electricity generation are compared to emissions from diesel and biogas powered alternatives in buses. Regarding the charging infrastructure for electric buses, different types of chargers are examined as well as fast charging during bus operation and slow charging at depots.

Based on the thesis the emissions from electricity consumption in electric buses were found to be very low, calculated by the emission factor for electricity consumption in Finland. Charging of electric buses is expected to focus on depots. It was found that it is possible to use inductive charging instead of pantograph charging during in-use charging. The electrification of bus transport is an important step for urban transport. Some entrepreneurs are already in a good situation and more and more new electric buses are coming to service in traffic.

Keywords: bus, electric, electrification, transport, traffic

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähkö- ja polttomoottorilinja-autojen voimalinjat	2
2.1	Sähkölinja-autot	2
2.1.1	Sähkölinja-autojen määrän kehitys	2
2.1.2	Toiminta eri sääolosuhteissa	3
2.1.3	Sähkömoottori	5
2.1.4	Regeneratiivinen jarrutus	8
2.1.5	Akusto	8
2.1.6	Litiumioni akuston valmistusprosessi	10
2.2	Diesellinja-autot	11
2.3	Biokaasu	13
3	Lähipäästöt sähköntuotannon päästöihin verrattuna	14
3.1	Sähköntuotannon ja akuston päästöt	14
3.1.1	Suomen sähköntuotanto	14
3.1.2	Litiumioniakuston ympäristövaikutus	15
3.2	Lähipäästöt	16
3.2.1	Ajoneuvoliikenteen hiukkaspäästöt	16
3.2.2	Diesel- ja biokaasu linja-autojen lähipäästöt	16
3.3	Sähköntuotanto verrattuna lähipäästöihin	17
4	Latausinfrastruktuuri	18
4.1	Laturityyppejä	18
4.2	Linja-autovarikolla lataus	20
4.3	Käytönaikainen lataus	21
4.4	Linja-autojen reitit ja latauksen tarve	21
5	Johtopäätökset	22
6	Yhteenveto	24
	Lähteet	25

Liitteet

Liite 1: Sähköntuotannon päästöt

Lyhenteet

AC:	Alternating current. Vaihtovirta.
BMB:	Battery management board. Akunhallintalevy.
BMS:	Battery management system. Akunhallintajärjestelmä.
DC:	Direct current. Tasavirta.
EV:	Electric vehicle. Sähköajoneuvo.
EEV:	Enhanced environmentally friendly vehicle. Paranneltu ympäristöystävällinen ajoneuvo.
HSL:	Helsingin seudun liikenne.
IBIS:	Integrated battery interface system. Integroitu akun liitännäisjärjestelmä.
LFP:	Litium-rautafosfaatti.
LMO:	Litiumioni-mangaanioksidi.
NMC:	Litium-nikkeli-mangaani-koboltti.
PM:	Permanent magnet. Kestomagneetti.
PMAC- moottori:	Permanent magnet alternating current motor. Kestomagneettitahti- moottori.

1 Johdanto

Linja-autoliikenteen sähköistäminen on hyvin olennainen osa julkisen liikenteen tulevaisuutta. Sähkölinja-autot tulevat hiljalleen korvaamaan vanhan diesel- ja biokaasukaluston. Sähkölinja-autojen pääasiallisena tavoitteena on liikenteen päästöjen vähentäminen ja sitä kautta ihmisten terveyden ja hyvinvoinnin parantaminen.

Suhteellisen lyhyen historian ja vähäisen kokemuksen takia niiden käytöstä on kuitenkin vielä paljon opittavaa. Tällä hetkellä niitä eniten rajoittava tekijä on akuston koko ja energiatiheys, jota käsitellään myös tässä työssä. Sähkölinja-autot tuovat tullessaan monia haasteita sähköverkolle ja latausinfrastruktuurin kehitykseen. Ne eivät kuitenkaan ole ainoa vaihtoehto päästötavoitteisiin pääsemiseksi, vaan on myös käytettävä vähäpäästöisempiä diesel- ja biokaasulinja-autoja.

Työssä käydään läpi ensin sähkö- ja polttomoottorilinja-autojen voimalinjat, keskittyen kuitenkin sähkölinja-autojen käyttämään tekniikkaan. Toiseksi käsitellään ja vertaillaan eri käyttövoimaisten linja-autojen päästöjä ja latausinfrastruktuurin käytettävissä olevia latausmahdollisuuksia. Työ on tehty kirjallisuusselvityksenä.

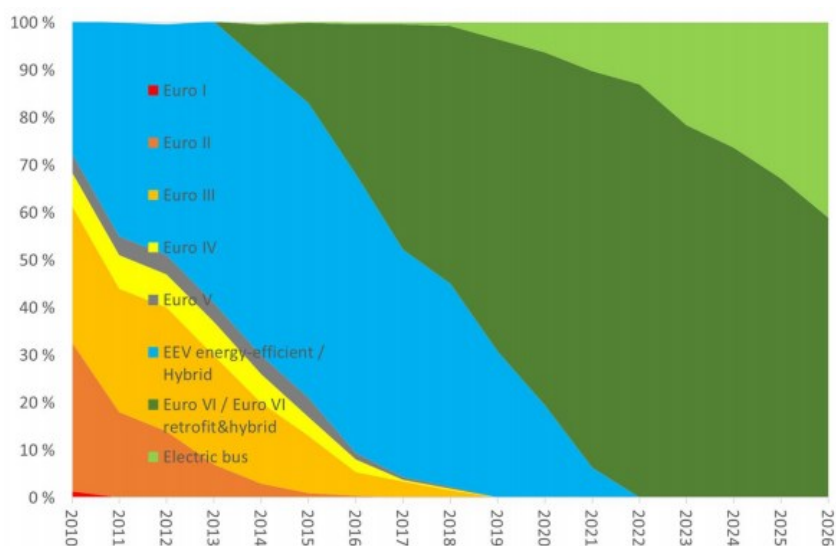
2 Sähkö- ja polttomoottorilinja-autojen voimalinjat

2.1 Sähkölinja-autot

2.1.1 Sähkölinja-autojen määrän kehitys

Sähkölinja-autot ovat osa julkisen liikenteen tulevaisuutta. Pääasiallisena tavoitteena on vähentää liikenteen päästöjä. EU:n puhtaiden ajoneuvojen direktiivin mukaan 2.8.2021 alkaen julkisissa hankinnoissa linja-autojen osalta 41 % tulee olla vähäpäästöisiä ja näistä 50 % tulee olla täyssähköisiä. [Varis 2019: 11.]

Oheisesta kuvasta 1 nähdään Helsingin seudun liikenteen (HSL) linja-autojen kehitys vuodesta 2010 eteenpäin. Sähkölinja-autojen määrän on tarkoitus lisääntyä merkittävästi tulevaisuudessa. Vuonna 2025 tavoitteena on 30 % sähköbusseja ja suunnitelman mukaan jo vuonna 2030 jopa 50 % busseista toimisi sähköllä. Kuvasta nähdään myös diesel- ja hybridibussien määrien muutokset euro päästöluokituksin.

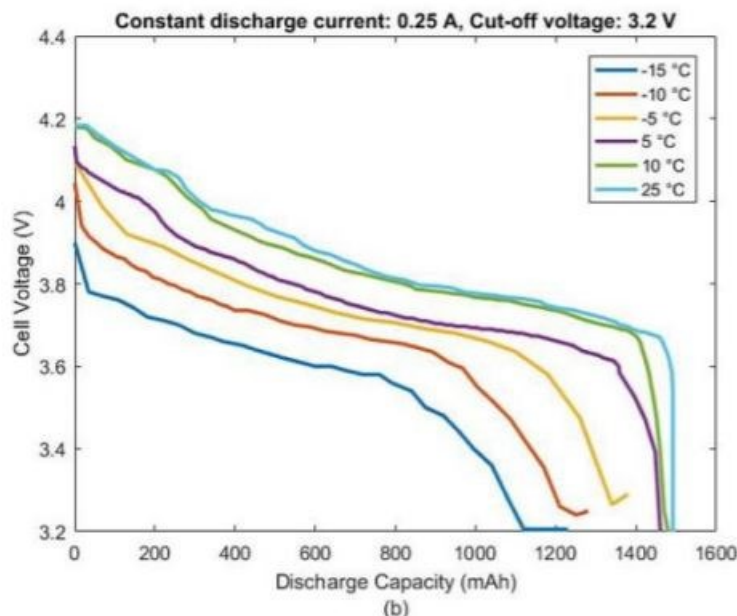


Kuva 1. HSL:n sähkölinja-auto määrän kehitys [Uusi-Rauva 2020: 9].

Sähkökäyttöisten linja-autojen yleistyessä vaaditaan myös latausinfrastruktuurin kehittämistä. Linja-autojen akkuja on mahdollista ladata varikolla tai pääte-pysäkeillä vuorojen välissä. Tekniikka kehittyy jatkuvasti, joten alan pitää mu- kautua sen mahdollistavien ratkaisujen mukaisesti. Akustot ovat kehittyneet pal- jon, mutta täydellä latauksella mahdollistavat vielä suhteellisen rajallisen ajo- matkan. Tästä syystä ne ovat tällä hetkellä yleistymässä kaupungeissa, missä ajomatkat ovat lyhyempiä. Akku- ja latausteknologian kehittyessä mahdolliste- taan edelleen pidempiä ajomatkoja ja nopeampia latausaikoja.

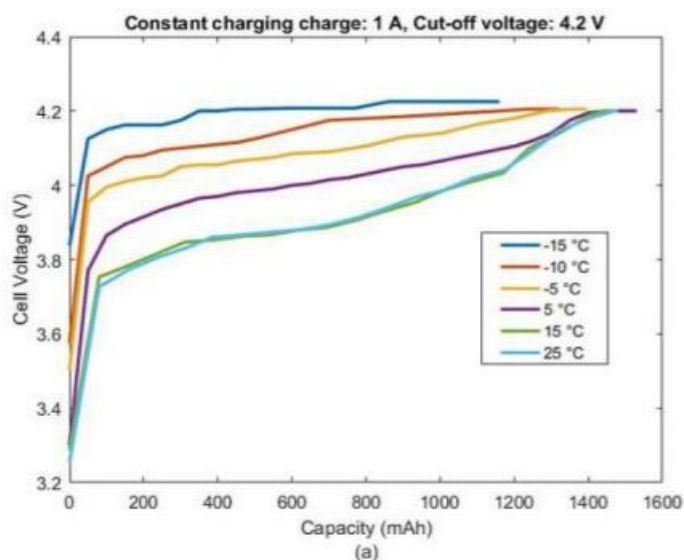
2.1.2 Toiminta eri sääolosuhteissa

Litiumioniakusto on yleisesti käytössä sähköajoneuvoissa, mutta sillä on ongel- mia kylmissä olosuhteissa. Kuvasta 2 nähdään, kuinka akun purkautumiskapasi- teetti laskee merkittävästi lämpötilan laskiessa. Jännite laskee aiemmin ja akus- ton hallintajärjestelmässä määritelty katkaisujännite saavutetaan nopeammin. [Heininen 2020: 6].



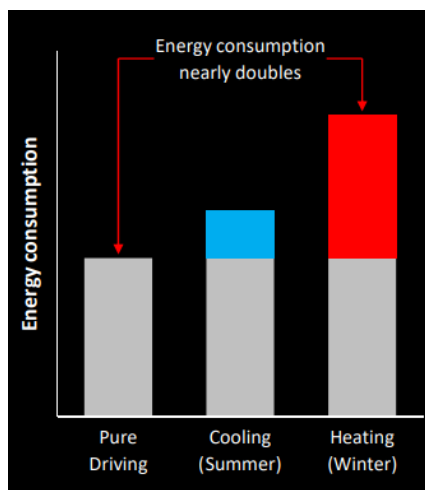
Kuva 2. Kennon jännite kapasiteetin purkautuessa esitettynä eri lämpötiloissa [Heininen 2020: 7].

Sama vaikutus tapahtuu vielä vahvemmin akkua ladattaessa. Kuvasta 3 nähdään jännite akkukennoa ladattaessa eri lämpötiloissa. Kylmässä kennon jännite nousee hyvin nopeasti lähelle katkaisujännitettä, mikä hidastaa latausnopeutta. [Heininen 2020: 7.]



Kuva 3. Kennon jännite latauksessa [Heininen 2020: 7].

Talvella ja kesällä bussit kuluttavat tavallista enemmän energiaa, johtuen lämmityksestä ja ilmastoinnista. Kuvassa 4 vertaillaan puhdasta ajamista kesällä ja talvella ajamiseen. Energian kulutus lisääntyy merkittävästi alhaisessa lämpötilassa. Lämmitys talvella voi melkein jopa kaksinkertaistaa ajoneuvon energian kulutuksen. Linja-autojen korkea kulutus selittyy osittain sillä, että lämpöä pääsee karkaamaan joka pysäkillä ovien avauksien välillä. HSL ainakin toistaiseksi hyväksyy polttoainekäyttöisen lisälämmittimen käytön [Uusi-Rauva 2020].

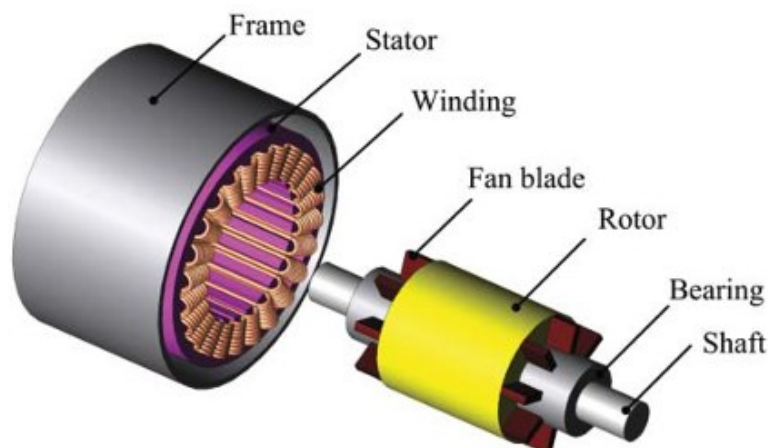


Kuva 4. Energian kulutus talvella ja kesällä
[Karhulahti 2019: 100]

2.1.3 Sähkömoottori

Tasavirta (DC) -käyttöiset moottorit olivat aiemmin laajasti käytettyjä sähköajoneuvojen voimanlähteenä johtuen niiden käytön yksinkertaisuudesta. Ongelmia DC-moottoreissa on alhainen tehon hyötysuhde ja alhaisempi tehotiheys kuin vastaavissa vaihtovirtamoottoreissa (AC). Ne tarvitsevat myös säännöllistä huoltoa. Edellä mainituista syistä niitä ei käytetä enää muuten kuin pienissä sähköajoneuvoissa. [Chau 2015: 19.]

Induktiomoottori on teknologisesti yksi kypsimpiä moottorityyppejä monien komutaattorittomien moottoreiden ohella. Niitä on kahta tyyppiä: vaihekäämiroottorinen ja häkkikäämitetty roottori. Korkean hinnan, huollon tarpeen ja jyrkyyden puutteen vuoksi vaihekäämiroottorinen on näistä kahdesta vähemmän houkutteleva vaihtoehto. Häkkikäämitetyn induktiomoottorin rakenne nähdään kuvassa 5. Staattorissa on kolmivaiheinen ankkurikäämitys. Roottori on varustettu häkkipalkeilla, jotka on oikosuljettu kahdella päätyrenkaalla, jotka voidaan muotoilla tuuletin siiviksi. Näillä saadaan moottoria jäähdytettyä pyörimisen aikana. [Chau 2015: 39.]

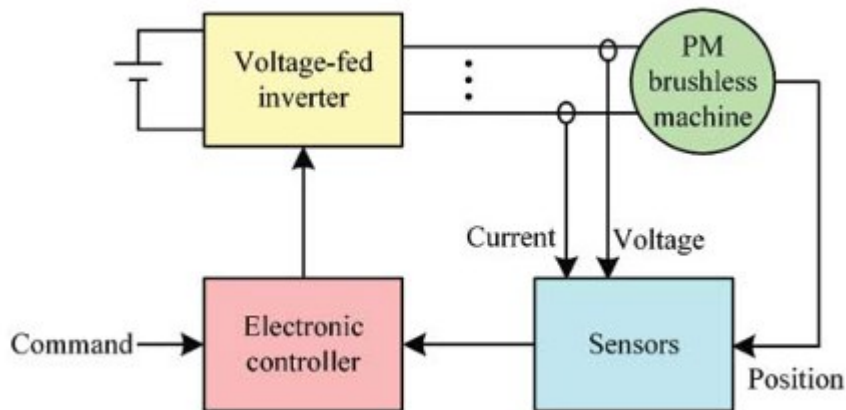


Kuva 5. Induktiomoottorin osat [Chau 2015: 41].

Tehotiheyden ja korkean tehon hyötysuhteen tarpeen koko ajan kasvaessa induktiomoottori on sähköajoneuvokäytössä pitkälti korvattu kestmagneettitahtimoottorilla (PMA-moottori). Kestomagneettien (PM) korkean hinnan, harvinaisten materiaalien ja lämpöstabiilisuuden epävakauden vuoksi kiinnostus induktiomoottorikäyttöön on kuitenkin vielä merkittävää. Alhaisen hinnan, kestäväns rakenteen ja kypsän tekniikan ehdottomien etujen perusteella voi induktiomoottorin käytön kohtalaisen markkinaosuuden olettaa säilyvän EV-moottorikäytössä myös tulevaisuudessa. [Chau 2015: 68.]

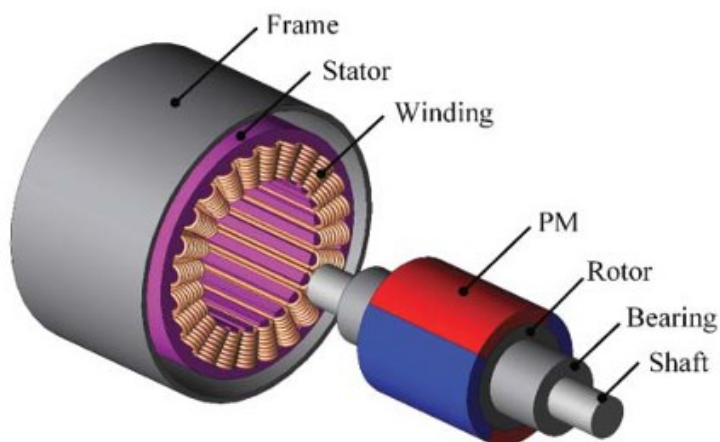
Muiden moottorityyppien ohella PMA-moottori on tällä hetkellä kaikista houkuttelevin moottorivaihtoehto EV-voimanlähteenä. PM-materiaalin ansiosta moottorilla on suuri tehotiheys ja korkea hyötysuhde. PMA-moottori on saavuttamassa määräävän aseman sähkömoottoreiden markkinaosuudessa. Tällä hetkellä käytössä on neljä merkittävää PM-materiaalia: ferriitti, alnico (alumiini, nikkeli, koboltti), samarium-koboltti (Sm-Co) ja neodyymi-rauta-boori (Nd-Fe-B). [Chau 2015: 69.]

PMAC-moottorin järjestelmän rakenne on vastaavanlainen kuin induktiomoottorissa. Merkittäviä vaihtoehtoja ovat mm. yksimoottorinen ja monimoottorinen rakenne. Moottori voi olla myös vaihteellinen tai vaihteeton. [Chau 2015: 70.] Kuvassa 6 nähdään PMAC-moottorin systeemin rakenne, joka koostuu moottorista, invertteristä, elektronisesta ohjainlaitteesta ja neljästä kuvassa näkyvästä sensorista.



Kuva 6. PMAC-moottorisysteemin perusrakenne [Chau 2015: 71].

PMAC-moottori koostuu kuvan 7 mukaisesti staattorista ja roottorista. Induktio-moottoriin verrattuna se on hieman yksinkertaisempi, sillä siitä puuttuu häkkipalkit ja päätyrenkaat. Sen lisäksi siihen liittyvä lämpöhäviö roottorissa ei ole merkittävä, joten se ei yleensä vaadi tuulettimen siipien asentamista roottoriin tai akseliin ilmajäähdytystä varten. [Chau 2015: 72.]



Kuva 7. PMAC-moottorin osat [Chau 2015: 73].

2.1.4 Regeneratiivinen jarrutus

Regeneratiivinen jarrutus on sähkökäyttöisten ajoneuvojen hyödyntämä tekniikka, jossa ajoneuvo muuttaa kineettistä energiaa takaisin sähköenergiaksi ajoneuvon nopeuden hidastuessa tai ajettaessa alamäkeä. Muutettu energia varastoidaan energian varastointilaitteistoon, kuten akustoon tai kondensaattoreihin. Kun regeneratiivisen jarrutuksen vääntö ei riitä ajoneuvon jarrutukseen, käytetään hydraulista jarrutusta tarvittavan hidastuvuuden saavuttamiseksi. [Chau 2014: 672.]

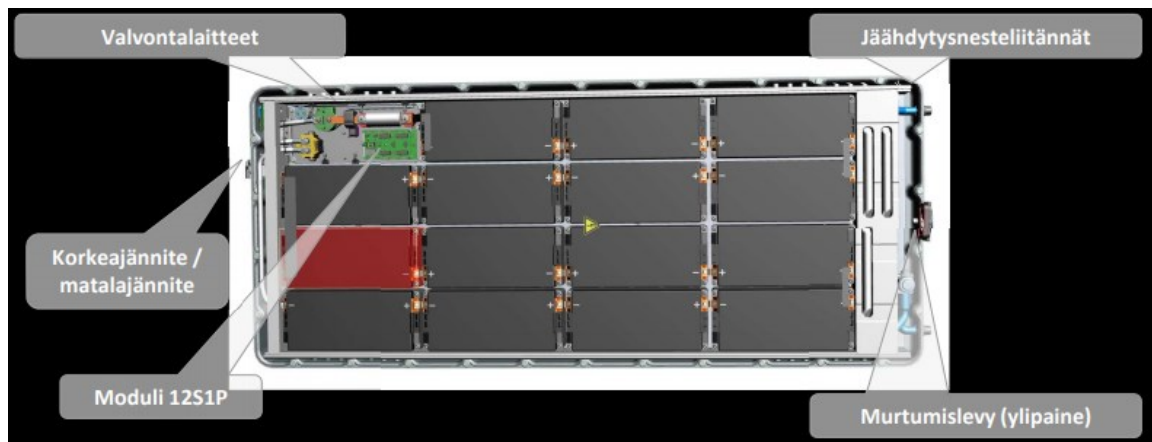
Regeneratiivinen jarrutus vähentää sähköajoneuvojen tarvetta jarruttaa hydraulisesti ja kuluttaa vähemmän niiden jarrupaloja ja jarrulevyjä. Tätä kautta myös haitallisen jarrupölyn määrä vähenee. Jarrupölyn määrää on vaikea arvioida, sillä se riippuu paljon ajotavasta ja liikenteen sujuvuudesta. Regeneratiivisen jarrutuksesta saatava hyöty riippuu paljon kuljettajan ajotavasta, sekä ajettavasta reitistä. [Happo ym. 2020: 44.]

Heinisen opinnäytetyössä [2020: 42] kerättyjen tutkimustulosten mukaan linja-auton virran regenerointi ajon aikana vaihteli yleisesti välillä 0,4–0,5 kWh/km. Korkein saatu tulos oli 0,53 kWh/km ja alhaisin 0,37 kWh/km. Tutkimuksessa linja-auton keskimääräinen kulutus oli 1,6–2,1 kWh/km.

2.1.5 Akusto

Linja-auton akusto koostuu monista korkeajänniteakkupaketeista, jotka taas sisältävät pienempiä akkukennoja. Esimerkiksi Mercedes Benzin eCitarossa on 6–12 korkeajänniteakkupakettia, joista yhteensä painoa kertyy 1500–3000 kg. Energiaa tällainen akusto sisältää noin 150–300 kWh. Energiasisältöä voidaan verrata dieselbussiin niin, että dieselkäyttöisen bussin tankin paino olisi noin 200 kg ja energiasisältö noin 2100 kWh. [Karhulahti 2019: 98.] Akuston suurin ongelma tällä hetkellä on siis sen suuri koko ja paino. Toisin sanoen akuston energiatihedys tulisi olla vielä paljon parempi, että päästäisiin dieselkäyttövoimaista linja-autoa vastaavalle tasolle.

Kuvasta 8 nähdään eCitaron korkeajänniteakuston turvallisuutta lisääviä komponentteja. Valvontalaitteet valvovat akuston lämpötilaa, latausta ja muita turvallisuustoimintoja. Akusto jäähdytetään erillisen jäähdytyskierron kautta. Moduulien ohella on myös kolme suojaletettä. Kaksi niistä erottaa korkeajänniteakustot korkeajännitevälipiiristä ja yksi kytkee akustoja aktivoitaessa päälle esilatausvasituksen, jotta kennoaurioilta vältytään. [Karhulahti 2019: 112.]



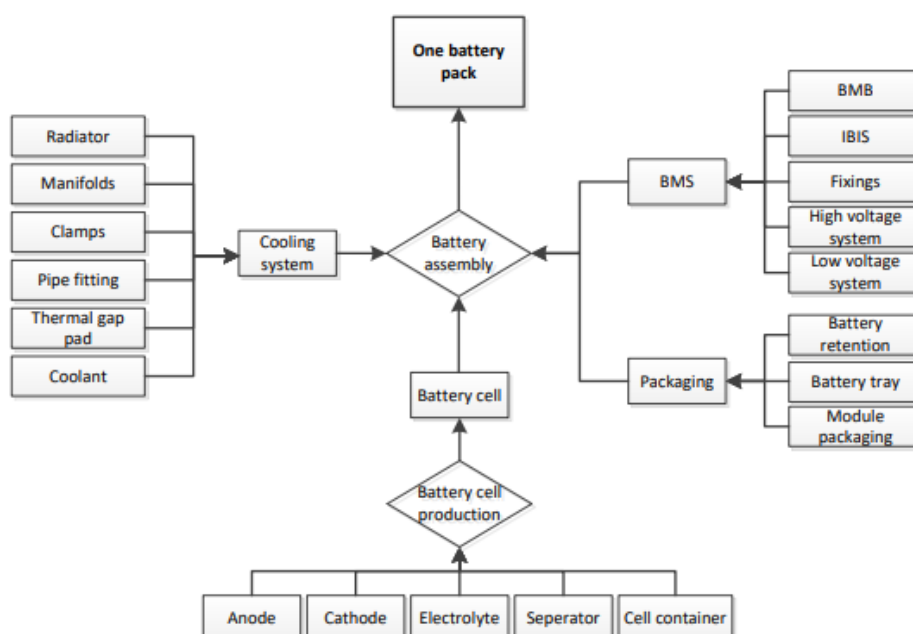
Kuva 8. Korkeajänniteakuston rakenne [Karhulahti 2019: 112].

Esimerkiksi yksi AKASOL valmistajan korkeajänniteakkuklusteri sisältää 15 moduulia, joissa yhteensä 180 kennoa jännitealueella 486–756 V. Sen energiasisältö on 25 kWh, ja sen paino on noin 250 kg sisältäen telineen. Se käyttää kennotyyppiä Samsung PHEV 37 Ah, ja sen kennokemia on NMC. Sen ihanteellinen kennolämpötila on 25 °C. Jäähdytys toimii aktiivisesti jäähdytyslevyn avulla. [Karhulahti 2019: 113.]

Sähkölinja-autoissa eniten käytetty akkukemia on litiumioni NMC. NMC tarkoittaa yhdistelmää litiumia, nikkeliä, mangaania ja kobolttia. Sitä käytetään ajoneuvoissa, koska sillä on korkea energiatiheys. Muita litiumioniakkukemioita ovat mm. LFP (litium-rautafosfaattiakku) ja LMO (litiumioni-mangaanioksidi).

2.1.6 Litiumioni akuston valmistusprosessi

Akkupaketti koostuu akunhallintasytemistä eli BMS (battery management system), jäähdytysjärjestelmästä, paketoinnista ja akkukennoista. Akkukennot koostuvat viidestä alikomponentista, jotka ovat anodi, katodi, erotin, elektrolyytti ja kennon säiliö. [Ager-Wick Ellingsen ym. 2013: 6.] Suurin osa litiumioniakun valmistuksesta tulevista päästöistä tulee akkukennoista. Kuvassa 9 nähdään yksinkertaistettu kaavio akkusysteemistä. Kaaviossa lyhenteet BMB ja IBIS ovat "battery management board" ja "integrated battery interface system".



Kuva 9. Yksinkertaistettu kaavio akkusysteemistä [Ager-Wick Ellingsen ym. 2013: 7].

Akkukennon (NMC) valmistus esitetään Ager-Wick Ellingsen ym. [2013: 7–8] tutkimuksessa seuraavasti: Anodi koostuu kuparisesta virrankerääjästä, jossa on kerros negatiivista elektroditahnaa. Negatiivinen elektroditahna koostuu pääasiassa synteettisestä grafiitista mutta sisältää myös pieniä määriä sideaineita. Katodi koostuu alumiinisesta virrankerääjästä, jossa on kerros positiivista elektroditahnaa. Positiivinen tahna koostuu pääasiassa sekä positiivisesta että aktiivisesta materiaalista $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$ ja pienestä määrästä hiilimustaa ja sideainetta. Sekä positiivisessa että negatiivisessa elektrodiliitoksessa liuotinta käytetään seosten liettämiseksi; sen jälkeen liuotin haihtuu, kun seokset on laitettu virran kerääjille. Elektrolyytti perustuu suolalitiiumiin heksafluorifosfaatti (LiPF_6) liuottimien seoksessa. Erotin on huokoinen polyolefiinikalvo. Kennon säiliö koostuu monikerroksisesta pussista ja kielekkeistä. Pussi asetetaan kennon komponenttien ympärille, ja sen toinen pää on jätetty auki elektrolyytin täyttämistä varten. Kun elektrolyytti on lisätty ja jakautunut tasaisesti katodin, erottimen ja anodin välillä, kenno suljetaan. Jokaiselle kennolle hitsataan kupariliuska negatiiviselle virrankeräimelle ja alumiiniliuska toiselle virrankeräimelle.

2.2 Diesellinja-autot

Dieselmoottoriset linja-autot ovat olleet pitkään käytössä. Diesel on käyttövoimana luotettava ja varma vaihtoehto. Suurimpia ongelmia sen käytössä ovat korkeat lähipäästöt sekä fossiilisten polttoaineiden käyttö. Vähäpäästöisemmät diesel- ja biopolttoainekäyttöiset linja-autot tulevat olemaan osa HSL:n päästötavoitteiden täyttymistä [Uusi-Rauva].

Päästöjen vähentämiseksi on kehitetty monia ratkaisuja. Nämä ratkaisut ovat pakokaasujen takaisinkierrätysjärjestelmä (EGR), katalysaattori, hiukkassuodatin ja selektiivinen katalyyttinen pelkistäminen (SCR). Tekniikkaa kehitetään edelleen, jotta päästöt saataisiin minimoitua. Dieselkäyttöiset linja-autot tulevat olemaan vielä vuosia käytössä, sähkölinja-autotekniikan ja latausinfrastruktuurin kehityksessä. Talukosta 1 nähdään linja-autoja koskevat EURO-päästöluokitukset. Päästörajoitukset ovat tiukentuneet, ja sallitut päästöt ovat vuonna 2013 tulleessa EURO 6-luokassa vain murto-osan vuonna 1992 voimaan tulleesta EURO 1

-luokasta. Uusia päästöluokituksia on tullut noin neljän tai viiden vuoden välein, joten uuden EURO 7 -luokan voitaisiin arvioida tulevan pian.

Taulukko 1. EURO-päästöluokitukset raskaille dieselautoille, g/kWh (savutus: m⁻¹) [Päästöluokitukset 2021].

Päästöluokka	Käytössä	Testisykli	Häkä (CO)	Hiilivety (HC)	Typenoksidit (NO _x)	Hiukkaset (PM)	Savutus
Euro I	1992, < 85 kW	ECE R-49	4,5	1,1	8,0	0,612	
	1992, > 85 kW		4,5	1,1	8,0	0,36	
Euro II	Lokakuu 1996		4,0	1,1	7,0	0,25	
	Lokakuu 1998		4,0	1,1	7,0	0,15	
Euro III	Lokakuu 1999, vain EEV:t	ESC & ELR	1,0	0,25	2,0	0,02	0,15
	Lokakuu 2000	ESC & ELR	2,1	0,66	5,0	0,10 0,13*	0,8
Euro IV	Lokakuu 2005		1,5	0,46	3,5	0,02	0,5
Euro V	Lokakuu 2008		1,5	0,46	2,0	0,02	0,5
Euro VI	31. joulukuuta 2013		1,5	0,13	0,4	0,01	

* Moottorit joiden puristustilavuus on vähemmän kuin 0,75 dm³ per sylinteri ja tehoalue on korkeammalla kuin 3000 r/min. EEV = "Enhanced environmentally friendly vehicle".

Dieselmoottorissa voidaan käyttää myös uusiutuvaa biodieseliä. Biodieseliä voidaan valmistaa erilaisista biomassoista. Se toimii fossiilisen polttoaineen korvikkeena, ja sen tavoitteena on päästöjen vähentäminen. Esimerkiksi Nesteen MY uusiutuvan dieselin on EU:n uusiutuvaa energiaa koskevan direktiivin mukaan tehdyssä laskelmassa todettu tuottavan 90 % vähemmän päästöjä verrattuna perinteiseen raakaöljypohjaiseen dieseliin [Merkittävästi pienemmät päästöt 2019]. Suurimpia ongelmia biodieselin valmistamisessa isossa mittakaavassa on raaka-aineiden ja valmistuksen kalleus. Tämän takia sen valmistamisessa käytettyä teknologiaa pitäisi kehittää jatkossa, että siitä saataisiin kilpailukykyisempi vaihtoehto fossiiliseen dieseliin verrattuna. [Tabatabaei ym. 2019: 291.]

2.3 Biokaasu

Biokaasu on orgaanisesta aineesta valmistettua helposti syttyvää puhtaasti palaavaa kaasua. Sitä voidaan tyypillisesti valmistaa ruoasta, jäteveden lietteestä, lannoitteesta ja esimerkiksi elintarviketeollisuudesta syntyvistä jätteistä. Kaasu sisältää 40–70 % metaania, josta loppu on suurimmaksi osaksi hiilidioksidia. Biokaasun energiasisältö verrattuna dieseliin nähdään taulukosta 2.

Taulukko 2. Biokaasun energiapitoisuus verrattuna muihin polttoaineisiin [Abbasi ym. 2012: 2].

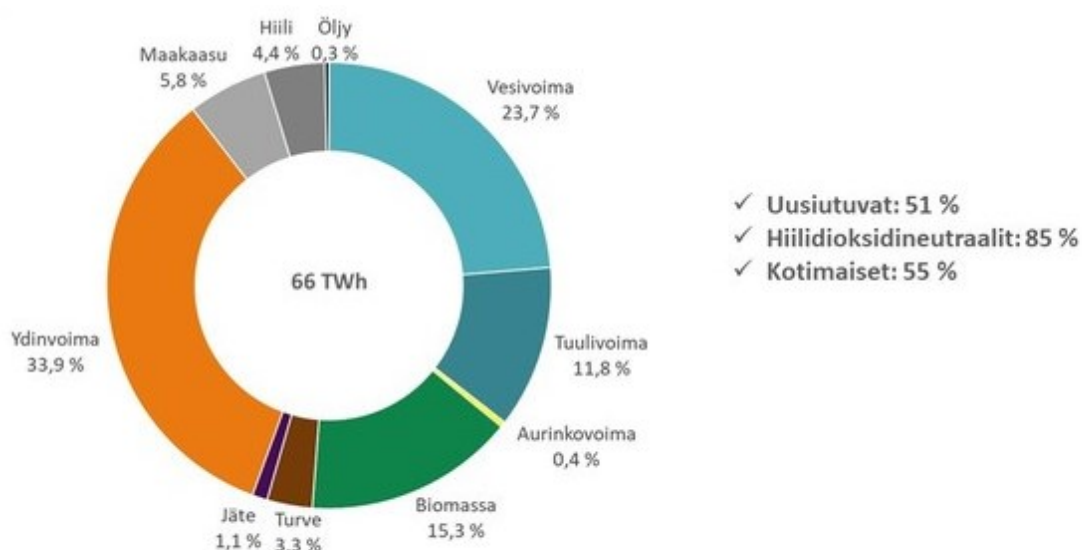
Polttoaine	Energiasisältö
Maakaasu	8 600 kcal m ⁻³
Nestekaasu	10 800 kcal kg ⁻¹
Kerosiini	10 300 kcal kg ⁻¹
Diesel	10 700 kcal kg ⁻¹
Biokaasu	5 000 kcal m ⁻³

3 Lähipäästöt sähköntuotannon päästöihin verrattuna

3.1 Sähköntuotannon ja akuston päästöt

3.1.1 Suomen sähköntuotanto

Suomessa tuotetaan monipuolisesti sähköä. Sähköntuotannon tärkeimmät energianlähteet ovat ydinvoima, vesivoima, kivihili, maakaasu ja puupolttoaineet [Kostama 2020]. Kuvasta 10 nähdään Suomen sähköntuotannon jakautuminen energialähteittäin. Yhteensä energiaa tuotettiin 66 TWh, joista uusiutuvia energian lähteitä oli 51 %, hiilidioksidineutraaleja 85 % ja kotimaisia 55 %.



Kuva 10. Suomen sähköntuotanto energialähteittäin 2020 [Kostama 2020].

Taulukosta 3 nähdään Suomen sähköntuotannon päästökertoimet vuosilta 2018–2020. Päästökertoimet perustuvat kansainvälisen energiajärjestön IEA:n ilmoittamiin kertoiimiin. Liitteestä 1 nähdään energiantuotannon päästöt ilman biotuotantoa kuukausittain aikavälillä 1.2019–2.2021. Sähköntuotannon päästöt vaihtelevat suuresti vuodenajan mukaan.

Taulukko 4. Suomen sähköntuotannon päästökertoimet [Sähköntuotannon CO₂-päästöarvio 2021].

Vuosi	Suomen sähköntuotannon päästökerroin (gCO₂/kWh)	Suomessa kulutetun sähkön päästökerroin (gCO₂/kWh)
2018	101	119
2019	87	101
2020	74	72

3.1.2 Litiumioniakuston ympäristövaikutus

Tutkimukset litiumioniakuston valmistusprosessista tulevista kasvihuonepäästöistä vaihtelevat suuresti. Taulukosta 4 nähdään monissa eri tutkimuksissa selvitetty LMO, NMC ja LFP -tyyppisten akkujen valmistuksesta syntyvät kasvihuonepäästöt. Kasvihuonepäästöt on ilmoitettu kilogrammoina CO₂ vastaavaa määrää kilowattituntia kohden. Päästöissä on eroteltu materiaali- tai osatuotanto ja akkukennojen tuotanto ja asennus. Tutkimuksessa todettujen kasvihuonepäästöjen ero johtuu ensisijaisesti akun rakenteen ja kasvihuonekaasupäästöjen epävarmuudesta kokoonpanoprosessissa [Hao 2017: 9].

Taulukossa 4 selvitettyjen litiumioni-NMC-akun valmistuksesta syntyvien päästöjen keskiarvo on 125,98 kg CO₂/kWh. 150 kWh kapasiteetin akuston voitaisiin siis arvioida tuottavan noin. 18 897 kg CO₂. Tulos saatiin kertomalla akuston valmistuksesta syntyvät päästöt akuston kapasiteetilla.

Taulukko 5. Yhteenveto tutkimuksessa selvitetystä kasvihuonepäästöistä [Hao 2017: 9].

Reference	Battery Type	Battery Mass (kg)	Battery Capacity (kWh)	GHG Emission (kgCO ₂ -eq/kWh Battery)		
				Material/Part Production	Battery Cell Production and Assembly	Total
Notter et al. (2010) [3]	LMO	300	34.2	51	2	53
Majeau-Bettez et al. (2011) [5]	NMC	-	-	143	53	196
Majeau-Bettez et al. (2011) [5]	LFP	-	-	177	69	246
EPA (2013) [9]	LMO	-	-	61.5	1.9	63.4
EPA (2013) [9]	NMC	-	-	86.7	34.3	121
EPA (2013) [9]	LFP	-	-	90.8	60.2	151
Ellingsen et al. (2014) [6]	NMC	253	26.6	65	107	172
Kim et al. (2016) [10]	LMO + NMC	303	24	70	70	140
REET-2015	LFP	230	28	34.6	1.9	36.5
REET-2015	NMC	170	28	35	1.9	36.9
REET-2015	LMO	210	28	31	1.9	32.9
This Study	LFP	230	28	103.8	5.5	109.3
This Study	NMC	170	28	99.9	4.1	104
This Study	LMO	210	28	91.5	5.1	96.6

3.2 Lähipäästöt

3.2.1 Ajoneuvoliikenteen hiukkaspäästöt

Ajoneuvoliikenteestä syntyvistä hiukkaspäästöistä arvioidaan olevan pakokaasuperäisiä 14 %, jarruista 12 %, renkaista 35 % ja tienpinnasta 39 % [Happo ym. 2020: 12]. Sähkölinja-auto ei tuota suoranaisesti pakokaasupäästöjä, joten sen lähipäästöt koostuvat muista edellä mainituista asioista. Regeneratiivisen jarrutuksen ansiosta sähkölinja-auto tuottaa myös vähemmän jarruista syntyviä hiukkaspäästöjä.

3.2.2 Diesel- ja biokaasu linja-autojen lähipäästöt

Diesel- ja biokaasulinja-autojen päästöt nähdään taulukosta 5. Suurin ero kaasu- ja dieselbussien päästöjen välillä oli metaanikaasubusseissa, mikä nosti kaasubussin laskennallisia CO₂-päästöjä. VTT:n vertaillessa vuonna 2012 diesel- ja biokaasu-EEV-linja-autoja kaasulinja-auto päästi 16 % enemmän kasvihuonepäästöjä. Korkeammat päästöt johtuvat biokaasubussin korkeammasta polttoaineenkulutuksesta. Toisaalta biokaasulinja-auto päästi 89 % vähemmän hiukkaspäästöjä. [Kajolinna 2012: 54.]

Taulukko 6. VTT:n alustadynamometrillä mitatut päästöjen keskiarvot ja polttoaineenkulutus [Kajolinna 2012: 54].

Braunschweig-cycle		CO	HC	CH4*	NOx	PM	CO ₂	CO ₂ eq	FC	FC
		g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	kg/100km	MJ/km
Diesel	Euro 1	1.39	0.32	0	15.6	0.436	1219	1219	38.6	16.4
Diesel	Euro 2	1.48	0.19	0	12.9	0.202	1270	1270	41	17.4
Diesel	Euro 3	0.8	0.14	0	8.6	0.195	1189	1189	38.2	16.2
Diesel	Euro 4	2.84	0.1	0	8.4	0.112	1194	1194	38.5	16.4
Diesel	Euro 5**	2.84	0.1	0	8.4	0.087	1194	1194	38.5	16.4
Diesel	EEV	1.12	0.02	0	5.9	0.062	1116	1116	36.4	15.5
CNG	Euro 2	4.32	7.12	2.33	16.9	0.009	1128	1283	42.1	20.1
CNG	Euro 3	0.14	1.67	1.14	9.4	0.011	1257	1295	46.2	22
CNG	EEV	2.27	1.04	0.87	3.2	0.007	1275	1294	46.3	22.7

* For diesel CH4 = 0

** Euro 5 emission factors are estimated by Euro 4 results

PM = Particle emission

FC = Fuel consumption

3.3 Sähköntuotanto verrattuna lähipäästöihin

Suomessa 2020 kulutetun sähkön päästökerroin oli 72 g/kWh. 150 kWh:n akuston lataamisesta syntyisi yksinkertaisesti laskettuna 10,8 kg CO₂-päästöjä. Tulos saatiin kertomalla akuston kapasiteetti päästökertoimella. Linja-auton ajomatkan laskentaan voitaisiin käyttää Heinisen [2020: 42] tutkimuksessa selvitettyjä kulutuksen ja regeneratiivisen jarrutuksen keskiarvoja. Linja-auton kuluksi laskettaisiin siten 1,85–0,45 kWh. Vastaavanlaisella kapasiteetilla varustetun linja-auton ajomatkan yhdellä latauksella voitaisiin siten arvioida olevan n. 210 km. Tulos saatiin jakamalla akuston kapasiteetti linja-auton sähkönkulutuksella. Dieselajoneuvon päästöjen laskentaan voitaisiin käyttää Kajolinnan [2012: 54] tutkimuksessa selvitettyjä EEV-diesellinja-auton tuottamia päästöjä. Samalla ajomatkalla diesellinja-auto tuottaisi CO₂-päästöjä siis noin 234,36 kg. Vastaavasti EEV-biokaasulinja-auto tuottaisi CO₂-päästöjä noin 271,74 kg. Tulokset saatiin kertomalla sähkölinja-auton ajomatka diesel- ja biokaasulinja-autojen päästöillä.

4 Latausinfrastruktuuri

4.1 Laturityyppejä

Kaapelilatauksen etuja ovat teknologian kypsyys, yksinkertaisuus ja alhainen kustannus. Se käyttää yksinkertaisesti pistokkeita ja pistorasioita sähköenergian johtamiseen galvaanisella kontaktilla. [Chau 2014: 675.] Taulukosta 6 nähdään sen IEC 61851-1 -standardin osoittamat lataustehon tasot. Lataustehotasot ovat vaihtovirralla ladattaessa huomattavasti alhaisemmat kuin tasavirralla ladattaessa.

Taulukko 7. IEC 61851-1 standardin mukaiset lataustehotasot [Kongjeen ym. 2018: 4].

Type of Charge	Grid Connection	Voltage	Current	Type of Charge
AC level 1	1 phase	120 V	12–16 A	Slow
AC level 2	1 phase	240 V	<80 A	Slow
AC level 3	1, 3 phase	240 V	>80 A	Slow
DC level 1	-	200–450 V	80 A	Slow
DC level 2	-	200–450 V	200 A	Medium
DC level 3	-	200–600 V	400 A	Fast

Turvallisuus on tärkeässä asemassa kaapelilatauksessa. SAE J1772 -standardi määrittelee keinot sähköiskun välttämiseen. Kun pistoke on pistorasiassa, nastat eivät ole käsin saavutettavissa. Kun pistoke ei ole yhdistettynä, nastat eivät ole sähköistettynä. Lisäksi pistokkeessa on ohjaustappi latausprosessin ohjaimiseksi ja EV:n läsnäolon havaitsemiseksi. Virtapinneissä ei ole jännitettä, kun ohjaustappi on irrotettu eikä ohjaussignaali aktivoi tehonsiirtoa. [Chau 2014: 675.]

Virroitinlatauksessa sähköenergia siirretään linja-auton akustoon käyttämällä pantografia ajoneuvon yläpuolella. Pantografia voidaan käyttää ylhäältä alas tai alhaalta ylös. Virroitinlatauksen latausteho on yleensä 300–450 kW. Pantografien ollessa ajoneuvossa kustannukset ovat suuremmat, mutta sen voittuessa latauslaite on vielä muiden ajoneuvojen käytettävissä. Jos pantografi sijoitetaan

latauslaitteeseen, säästetään sen kustannus jokaiseen linja-autoon sijoittamisesta. Latauslaite toimii laskeutumalla automaattisesti ajoneuvon ollessa sen alapuolella, ja sähkö siirtyy galvaanisella kontaktilla. [Särkkäaho 2017: 11.] Induktiivinen lataus voi päästä samaan teholuokkaan kuin virroitinlataus, mutta alhaisemmilla kustannuksilla ja ilman liikkuvia osia [Calabro ym. 2019: 1]. Kuvassa 11 nähdään sähkölinja-auto latauksessa Helsingin Ruskeasuon pääte-pysäkillä. Pantografi on sijoitettu linja-auton etuakselin kohdalle.



Kuva 11. Linja-auto latauksessa pääte-pysäkillä [Lehtinen ym. 2018: 22].

Induktiivinen laturi toimii siirtämällä sähköenergiaa ajoneuvoon magneettisella induktiolla. Latauksen toiminnan periaate perustuu magneettiseen kytkentään suurtaajuisen muuntajan kahden käämityksen välillä. Ensiökäämi asennetaan laturin liittimeen ja toissijainen käämi on upotettu EV:n sisääntuloon. 50–60 Hz:n päävaihtovirtalähteen virta tasataan ja muunnetaan laturin sisällä 80–300 kHz:n suurtaajuiseksi vaihtovirraksi, minkä jälkeen se siirretään laturin liittimestä EV:n sisääntuloon magneettisella induktiolla ja lopulta korkeataajuinen

vaihtovirta muunnetaan tasavirraksi akun lataamiseksi. Se voi tuottaa suurta tehoa 86 %:n hyötysuhteella. Tehon suuruusluokka on normaalissa latauksessa 6,6 kW ja nopeassa latauksessa 50 kW. [Chau 2014: 676.] Induktiivinen laturi pystyy kuitenkin siirtämään sähköä tänä päivänä jopa 450 kW:n teholla [Calabro ym. 2019: 1]. Koko prosessi tapahtuu ilman galvaanista kontaktia laturin ja EV:n välillä. Suurin hyöty induktiivisella laturilla on turvallisuus, sillä kuljettajan ei tarvitse kytkeä laturia ajoneuvoon. Suurimpia haittapuolia siinä ovat kuitenkin korkeat investointikustannukset, väistämätön induktiohäviö ja suuri vaihtohäviö. [Chau 2014: 676.]

Langaton lataaminen voi mahdollistaa EV:n akuston lataamisen ajon aikana. Tehonlähteen voidaan sijoittaa ajoradan pinnan alle, josta EV ottaa langattomasti virran akun lataamista varten. [Chau 2014: 676.]

4.2 Linja-autovarikolla lataus

Suomen linja-autovarikoilla käytetään hidasta kaapelilatausta [Särkkäaho 2017: 12]. Ajoneuvojen lataus varikoilla tapahtuu pääasiassa yöllä. Linja-autojen latauksen keskittyminen varikoille voi olla ongelmallinen ja vaatii paljon sähköverkkoa. Ongelman ratkaisemiseksi uutta teknologiaa kehitetään jatkuvasti kysynnän kasvaessa. Tähän on nyt ajateltu ainakin kahta mahdollista kuormitusta tasoittavaa vaihtoehtoa. Linja-autovarikoille sijoituvilla akkuvarastoilla saataisiin tasoitettua sähkön kysyntäpiikkejä, jolloin sähköliittymän mitoitus voisi olla kysyntäpiikkiä pienempi. Näin voitaisiin saada mahdollisesti suuria säästöjä sähköliittymän tehomaksun kustannuksissa [Uusi-rauva 2020]. Vehicle-to-grid-tekniologialla mahdollistettaisiin sähköenergian siirto ajoneuvosta takaisin sähköverkkoon kysynnän huippuina ja hiljaisempaan aikaan sähkön siirto ajoneuvoon. Teknologia tasoittaisi sähköverkon kuormitusta, mutta sen käyttö kuluttaa ajoneuvon akustoa enemmän ja sen keskimääräinen hyötysuhde on vain 60–70 %. [Chau 2014: 679–680.]

4.3 Käytönaikainen lataus

Virroitinlatausta käytetään Suomessa käytönaikaiseen lataukseen kaikissa kaupunkiliikenteessä vakituisesti liikennöivissä linja-autoissa. Virroitinlatauspisteen kustannukset vaihtelevat paljon paikan mukaan. [Särkkäaho 2017: 11–12.]

Koska latauspisteiden rakentaminen on kallista, useiden latauspaikkojen rakentaminen ei ole houkutteleva vaihtoehto. Käytönaikainen lataus on kuitenkin järjestettävä, jos varikolla lataus ei ole riittävä vaihtoehto.

4.4 Linja-autojen reitit ja latauksen tarve

Akustojen hinnat ovat laskemassa, ja akkuteknologialla mahdollistetaan pidempiä ajomatkoja. Jos linja-auton reitti on pitkä ja vuorojen välinen aika lyhyt, päätöspäätöksillä latauksen täytyy olla hyvin tehokasta. Isomman akuston sijoittaminen linja-autoon tuo huomattavasti lisää kuormaa ja vie linja-auton kantokykyä, mikä näkyy esimerkiksi sallitussa matkustajamäärässä. Akuston tuoma kuormanlisäys lisää myös linja-auton kulutusta, joten suuren energiatiheiden omaava akusto on hyvin tärkeää. Lyhyemmillä reiteillä linja-auton lataukseen riittää yleensä hidaslataus varikolla yöaikaan.

5 Johtopäätökset

Sähkölinja-autojen päästöt ovat huomattavasti diesel- ja biokaasulinja-autoja pienemmät. Suomessa kulutetun sähkötuotannon päästöjä verrattaessa EEV-dieselin lähipäästöihin, sähköajoneuvon sähkönkulutuksen päästöt olivat noin 95,4 % pienemmät. Laskuissa ei otettu huomioon mm. sähköajoneuvon latauksen tai voimansiirron hyötysuhteita. Sähkölinja-auton 150 kWh:n akuston valmistuksesta syntyvillä päästöillä ajettaisiin EEV-dieselinja-autolla melkein 17 000 km, mutta akuston käyttöiän aikana sähköstä tulee helposti ympäristöystävällisempi vaihtoehto pidemmällä aikavälillä.

Dieselajoneuvon puolesta laskelmissa olisi voitu myös käyttää Euro 6 -päästöluokan linja-autoa, mutta siitä ei löytänyt luotettavia lähipäästötietoja. Esimerkiksi Nesteen MY-dieseliä käytettäessä voitaisiin myös laskea dieselille jopa 90 % pienemmät päästöt ja sitä käytettäessä päästäisiin jo hyvin ympäristöystävälliseen lopputulemaan. Uusiutuvan dieselin ongelma tällä hetkellä on sen kalliimpi hinta verrattuna fossiiliseen polttoaineeseen. Biokaasu oli vaihtoehtoista heikoin sen korkean polttoainekulutuksen ja korkeiden lähipäästöjen takia. Biokaasulla toimivan linja-auton ongelmana on myös biokaasun tankkausinfrastruktuurin heikkous Suomessa. Tällä lopputuloksella suurin panostus pitäisi olla sähköajoneuvojen latausinfrastruktuurin kehityksessä.

Linja-autovarikolla ladattaessa voitaisiin hyödyntää akkuvarastoina esimerkiksi vanhoja linja-autojen akustoja. Näin saataisiin akustoista kaikki mahdollinen hyöty ja sähköverkon kuormitusta saataisiin tasattua. Vehicle-to-grid-järjestelmän hyöty jäisi todennäköisesti suhteellisen pieneksi, sillä sähkölinja-autot ovat pääasiassa joko ajossa tai latauksessa. Akuston ylimääräinen kuormitus olisi myös haitallista, koska akuston eliniän halutaan tietenkin kestävän mahdollisimman pitkään.

Suomen talvessa sähkölinja-autot saattavat joutua toimimaan hyvinkin kylmissä olosuhteissa. Kylmät olosuhteet lyhentävät akuston sallimaa ajomatkaa, ja sisäilman lämmitykseen käytettävä virta kuluttaa huomattavan määrän akuston

kapasiteetista. Polttoainekäyttöinen lisälämmitin on vielä sallittua ainakin HSL:n linja-autoissa, mutta tulevaisuudessa akkujen kehittyessä saatetaan sekin kieltää. Tämä voi tuoda haasteita Suomen linja-autoliikenteelle, mutta toisaalta pääkaupunkiseudun talvet ovat kuitenkin suhteellisen lauhkeita. Käytönaikaisen latauksen suunnittelulla saadaan mahdollisesti syntyviä ongelmia ratkaistua.

Pikalatausasemilla käytetään Suomessa pantografia. Induktiivisella laturilla voitaisiin saada yhtä paljon tehoa halvemmilla kustannuksilla ja ilman liikkuvia osia. Tällöin ei tarvitsisi myöskään miettiä pantografien sijoitusta linja-auton ja latauspisteen välillä. Tulevaisuudessa langattomalla latauksella voitaisiin mahdollistaa linja-autojen lataus myös ajon aikana. Pitkiä matkoja ajavien runkolinjojen ajomatkaa voitaisiin lisätä sijoittamalla esimerkiksi Kehä 1:n ajotien alle langaton lataus. Rakennettavasta infrastruktuurista voisivat hyötyä myös muut liikenteessä olevat sähköajoneuvot.

6 Yhteenveto

Työssä tarkasteltiin sähkölinja-autojen toimintaa ja niiden sähkön kulutusta verrattiin diesel- ja biokaasuvaihtoehtoihin. Päästöjä verrattaessa todettiin sähkön olevan näistä selvästi ympäristöystävällisin vaihtoehto. Vertailussa käytettiin sähkölinja-autojen osalta Suomen koko sähkönkulutuksen päästökerrointa. Voitaisiin siis vielä miettiä, että jos käytettäisiin pelkästään uusiutuvaa energiaa, niin sähkölinja-autot olisivat käytännössä päästöttömiä.

Uusiutuva diesel voi olla tulevaisuudessa sähköajoneuvoihin siirryttäessä tärkeässä roolissa, sillä sen ja kehittyneen päästöjen suodatuksen ansiosta dieselmoottorin päästöt laskevat todella alhaisiksi. Biokaasun voidaan todeta linja-auton polttoaineena olevan nopeasti pois suljettava vaihtoehto.

Latausinfrastruktuurin kehitys on hyvin tärkeässä asemassa, jotta sähkölinja-autoliikenne pystyy kasvamaan. Kehitys voi olla hidasta, mutta nopeasti kehittyvä teknologia saattaa nopeuttaa prosessia.

Linja-autoliikenteen sähköistämisen voidaan tämän tutkimuksen pohjalta osoittaa olevan tärkeässä osassa kasvihuonepäästöjen vähentämisessä. Liikenteen päästöjen vähentyessä myös ihmisten yleinen terveys ja hyvinvointi paranee. Tulevaisuudessa ehkä sallitaankin vain sähköisten linja-autojen liikennöinti varsinkin kaupunkialueilla, missä on paljon liikennettä.

Lähteet

Abbasi, Tasneem; Tauseef, S. M. & Abbasi, S.A. 2012. Biogas Energy. New York: Springer.

Ager-Wick Ellingsen, Linda; Majeau-Bettez, Guillaume; Singh, Bhawna; Srivastava, Akhilesh; Valøen, Lars & Strømman, Anders. 2013. Life cycle assessment of a lithium-ion battery pack. *Journal of Industrial Ecology*. Vol. 18, s. 113–124.

Päästöluokitukset. Verkkoaineisto. Autowiki. <<http://www.autowiki.fi/index.php/P%C3%A4%C3%A4st%C3%B6luokitukset>>. Luettu 28.4.2021.

Calabro, Anthony; Cohen, Ben; Daga, Andrew; Miller, John & McMahon, Frank. 2019. Performance of 200-kW Inductive Charging System for Range Extension of Electric Transit Buses. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo 2019*, s. 1-5.

Chau, K. T. 2015. *Electric vehicle machines and drives*. E-kirja. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.

Chau, K.T. 2014. Pure electric vehicles. Teoksessa Folkson, Richard (ed.). *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*, s. 655–683. Cambridge: Woodhead Publishing.

Sähkön kuukausitilasto. 2021. Verkkoaineisto. Energiateollisuus. <https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/sahkon_kuukausitilasto.html#material-view>. Luettu 29.4.2021.

Sähköntuotannon CO₂-päästöarvio. 2021. Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinainformaatio/co2/>>. Luettu 8.5.2021.

Hao, Han; Mu, Zhexuan; Jiang, Shuhua; Liu, Zongwei & Zhao, Fuquan. 2017. GHG Emissions from the Production of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles in China. Beijing: State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy.

Happo, Mikko; Hosiokangas, Jari & Keskitalo, Toni. 2020. Tieliikenteen eri käyttövoimien ja polttoaineiden lähipäästöt ja niiden haitalliset vaikutukset. Helsinki: Traficom.

Heininen, Sampo. 2020. Electric Bus Power Consumption Study in Nordic Conditions. YAMK-opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Kajolinna, Tuula. 2012. Biogas as a vehicle fuel in commuter buses – Life cycle cost and greenhouse gas study. VTT.

Karhulahti, Markus. 2019. Opas korjaamolle sähköautojen huolto- ja korjaustöiden aloittamiseen. YAMK-opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Kongjeen, Yuttana & Bhumkittipich, Krischonme. 2018. Impact of Plug-in Electric Vehicles Integrated into Power Distribution System Based on Voltage-Dependent Power Flow Analysis. Pathumtani: Department of Electrical Engineering.

Kostama, Jari. 2020. Sähköntuotanto. Verkkoaineisto. Energiatieto. <<https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto>>. Luettu 3.5.2021.

Lehtinen, Annakaisa; Gruzdaitis, Leena & Frilander, Nelli. 2018. Jatkoselvitys sähköbussien edistämiseksi suomalaisilla kaupunkiseuduilla. Helsinki: Liikennevirasto.

Merkittävästi pienemmät päästöt. 2019. Verkkoaineisto. Neste. <<https://www.neste.fi/vastuulliset-ratkaisut/tuotteet/uusiutuvat-polttoaineet/neste-my-uusiutuva-diesel/pienemmat-paastot>>. Luettu 7.5.2021.

Särkkääho, Rauno. 2017. Sähkölinja-autojen lataustekniikat kaupunkiliikenteessä. Insinööriyö. Turun ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Tabatabaei, Meisam; Aghbaslo, Mortaza; Dehghani, Mona; Panahi, Hamed; Mollahosseini, Arash; Hosseini, Mehdi & Soufiyan, Mohamad. 2019. Reactor technologies for biodiesel production and processing: A review. Progress in Energy and Combustion Science. Vol. 74, s. 239–303.

Uusi-Rauva, Ville. 2020. HSL:n opit puhtaan kaluston käyttöönotosta. PowerPoint-esitys.

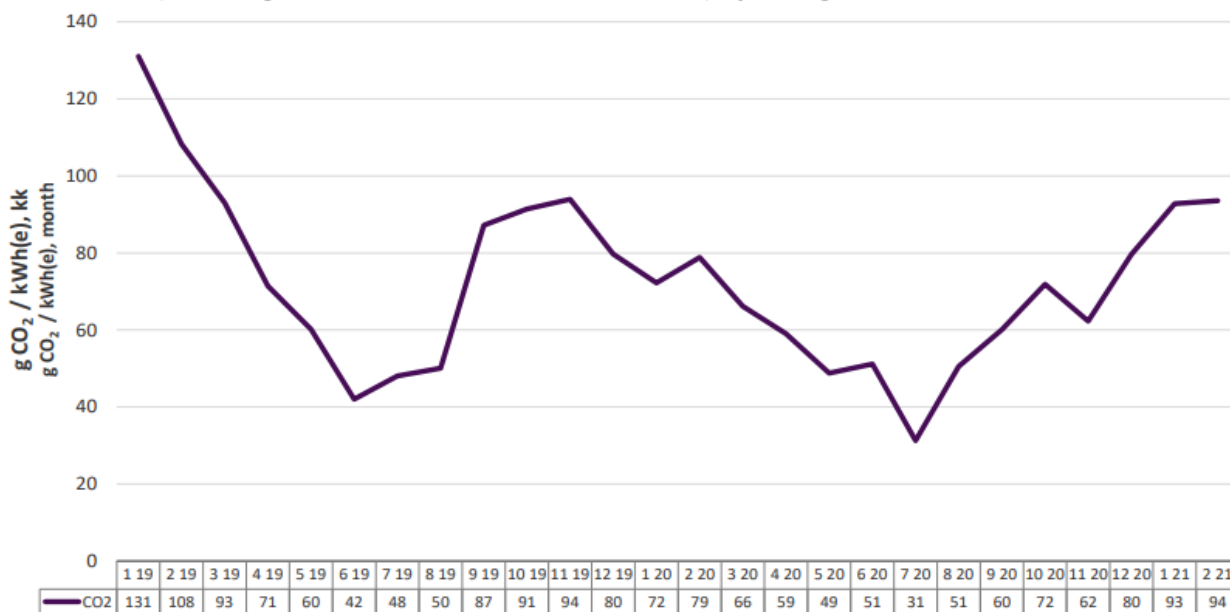
Uusi-Rauva, Ville. 2020. Hankepääällikkö sähköbussit, HSL Helsingin seudun liikenne. Sähköposti 22.4.2020.

Varis, Taneli. 2019. Mikä puhtaiden ajoneuvojen direktiivi? -webinaari. Webinaaritalenne. KEINO-osaamiskeskus/Motiva.

Sähköntuotannon päästöt

CO₂-päästöt (ilman bio-tuotantoa) / koko sähköntuotanto

CO₂-emissions (excluding emissions from biomass combustion) / power generation



- Tuotannon kuukausitilastoon ja vuositilaston ominaislukuihin perustuvia arvioita / Estimates based on monthly and annual generation statistics

* Sisältää: antrasiitti, kivihiili, muut hiiliperäiset sekä koksi-, masuuni- ja CO-kaasut / Includes: anthracite, coal, other coal, coke, blast furnace and CO gases

Kuva 1. Sähköntuotannon CO₂-päästöt (ilman biotuotantoa) [Sähkön kuukausitilasto 2021].