

Jaakko Kauhanen

# LATAAVAN JARRUTUKSEN EDUT JA HAASTEET SÄHKÖAUTOSSA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Tammikuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Jaakko Kauhanen: Lataavan jarrutuksen edut ja haasteet sähköautossa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikka  
Tammikuu 2024

---

Tässä kirjallisuuskatsauksessa käsitellään sähköauton regeneratiivista eli lataavaa jarrutusta. Tavoitteena on vastata tutkimuskysymykseen: "Mitkä ovat lataavan jarrutuksen edut ja haasteet sähköautossa?"

Sähköautot yleistyvät liikenteessä enenevässä määrin ihmisten panostaessa kestävämpään liikkumiseen. Akkuteknologian rajoittaessa sähköautojen kantamaa, sähköauton energiatehokkuuden parantaminen on tärkeä osa sähköauton kehityksen kannalta. Yksi mahdollisuus sähköauton energiatehokkuuden parantamiseen on lataava jarrutus, jossa jarrutusenergiaa otetaan osittain talteen.

Perinteisesti auton hidastaessa osa sen kineettisestä energiasta muuttuu jarrutuksessa hukkaenergiaksi, kuten lämmöksi. Sähköautossa sähkömoottoria käytetään jarrutusilanteessa generaattorina ja auton akkua kuormana, mikä tuottaa hidastamiseen tarvittavan jarrutusmomentin sekä akulle sähköä. Tätä kutsutaan lataavaksi jarrutukseksi. Lataavan jarrutuksen strategia tarkoittaa sähkömoottorin ja kitkajarrujen jarrutusvoimien suhdetta. Lataava jarrutus voidaan toteuttaa sähköautossa kitkajarrujen kanssa rinnakkain tai sarjassa, joista sarjanstrategia on energian talteen ottamisen kannalta tehokkaampaa.

Lataavan jarrutuksen etuja on energian talteenotto, joka parantaa sähköauton energiatehokkuutta, sekä kitkajarrujen vähäisempi käyttö, joka vähentää auton hiukkaspäästöjä. Lataavan jarrutuksen vaikutuksen ollessa suurin, kokonaisenergian kulutus on kaikista pienin ja energian palautussuhde kaikista suurin.

Lataavan jarrutuksen haasteita on järjestelmässä syntyvät energiahäviöt ja lataavan jarrutuksen vaikutus akkuun. Lataavan jarrutuksen järjestelmän mekaanisissa yhteyksissä syntyy energiahäviöitä, jotka vähentävät mahdollista talteen otettavan energian määrää. Lataavan jarrutuksen tuottama sähköenergia on usein korkeajännitteistä ja lyhytaikaista. Korkealla sähkövirralla on merkittävä vaikutus akun lämpötilan nousuun, joka vaikuttaa negatiivisesti akun kuntoon. Oikein ohjattuna lataavan jarrutuksen sähkövirralla on kuitenkin positiivinen vaikutus akun kuntoon.

Avainsanat: lataava jarrutus, regeneratiivinen jarrutus, sähköauto, generaattori, energiatehokkuus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. LATAAVAN JARRUTTAMISEN TEKNIikka .....	2
2.1 Perusperiaate .....	2
2.2 Jarrutuksen strategia .....	4
2.3 Jarrutuksen ohjaus .....	5
3. LATAAVAN JARRUTTAMISEN EDUT .....	7
3.1 Energiatehokkuus .....	7
3.2 Muut edut .....	10
4. LATAAVAN JARRUTTAMISEN HAASTEET .....	11
4.1 Energia häviöt .....	11
4.2 Vaikutus akkuun .....	11
5. YHTEENVETO .....	13
LÄHTEET .....	14

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

<i>ABS</i>	Anti-lock braking system
<i>ECS</i>	Electric stability control
<i>SOC</i>	<i>State of charge</i>
<i>SOH</i>	<i>State of health</i>
<i>CAN</i>	<i>Controller area network</i>

# 1. JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen eteneminen on tämän hetken kiireellisimmistä ja huolestuttavimmista ongelmista maapallolla. Ilmakehän lämpötilan nouseminen on aiheuttanut äärimmäisiä sääoloja, merenpinnan nousua ja biodiversiteetin vähenemistä. Ilmakehän lämpenemisen on saanut aikaan kasvihuonekaasupäästöt. Ilmastonmuutoksen tilanteen ja fossiilisten polttoaineiden rajallisuuden takia on lähivuosina panostettu paljon kestävämpään liikkumiseen.

Yksi kestävämmän liikkumisen vaihtoehto on sähkö- ja hybridautot. Sähköautojen suosio on kasvanut valtavasti viime vuosikymmenten aikana ja niiden suosio kasvaa jatkuvasti. Suomessakin jo kolmasosa uusien autojen myynnistä on sähköautoja (Tilastokeskus. 2024).

Sähköautojen yleistymisen hidasteena on ollut niiden rajallinen kantama polttomoottoriautoon verrattuna. Sähköautojen akkuteknologia on pullonkaula sähköauton kantaman kehityksessä, joten kantamaa on parannettava muilla keinoin kuin sähköenergiaa lisäämällä. Sähköauton kantamaa pystytään lisäämään auton energiatehokkuutta parantamalla tai suurentamalla akun kapasiteettia. Yksi vaihtoehto energiatehokkuuden parantamiseen on hukkaenergian talteen ottaminen, josta suurin osa syntyy jarrutuksessa. Sähköauton suurimpia etuja on mahdollisuus muuttaa osa kineettisestä energiasta muuksi energiamuodoksi jarrutusprosessissa ja sen varastoiminen akussa tai muissa energian varastointilaitteissa. Tätä prosessia kutsutaan regeneratiiviseksi jarruttamiseksi. (Vasiljević et al. 2022) Tässä kandidaatin työssä tarkastellaan regeneratiivisen jarruttamisen etuja ja haasteita sähköautossa. Ensin perehdytään regeneratiivisen jarruttamisen tekniikkaan ja miten se toimii, jonka jälkeen käsitellään mitä etuja ja haasteita tämä tuottaa sähköautolle.

## 2. LATAAVAN JARRUTTAMISEN TEKNIikka

Tässä luvussa tutustutaan lataavan jarrutuksen toimintaperiaatteeseen ja sitä ohjaaviin toimintoihin. Regeneratiivisen jarrutuksen toteutukseen on useita eri tapoja hybridi- ja sähköautoissa. Yleisimmin nämä toteutustavat ovat mekaanisia, elektronisia tai hydraulisia (Vasiljević et al. 2022). Tässä työssä keskitytään sähköautojen regeneratiiviseen jarrutukseen eli lataavaan jarrutukseen, jossa auton kineettinen energia muutetaan osittain takaisin sähköenergiaksi hyödyntämällä sähkömoottorin ominaisuutta toimia generaattorina.

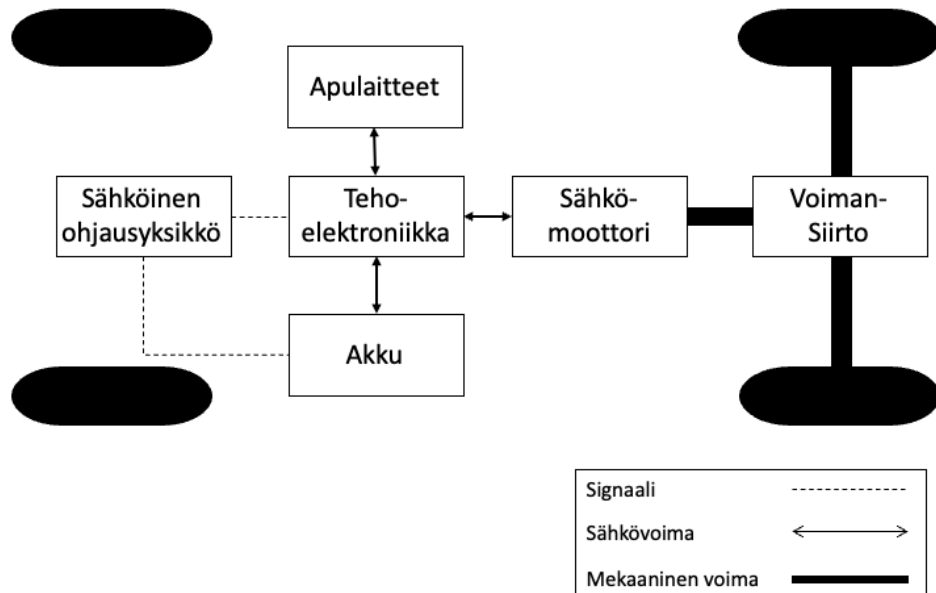
Lataava jarrutus on ominaisuus, joka on mahdollista vain autoille, joissa sähkömoottori tuottaa auton liikuttamiseen tarvittavan vääntömomentin. Peruseriaate lataavassa jarruttamisessa perustuu energian säilymislakiin. Sen mukaan energiaa ei voi luoda uutta eikä tuhota, vaan se voi vain muuttua muodosta toiseksi. Sähköautossa akusta saatava sähköenergia muutetaan auton kineettiseksi energiaksi sähkömoottorin avulla. (Vasiljević et al. 2022) Polttomoottoriauton jarrutukseen, jossa kaikki kineettinen energia muuttuu kitkajarrutuksessa lämpöenergiaksi, verrattuna lataavassa jarrutusprosessissa osa auton kineettisestä energiasta muutetaan takaisin auton akkuun sähköenergiaksi.

Lataava jarrutus on ainoa keino lisätä autonakun varausta ajon aikana (Vasiljević et al. 2022). Lataava jarrutus mahdollistaa siis akun kapasiteettiä suuremman energian käytön latausten välissä.

### 2.1 Peruseriaate

Kuvassa 1 on esitetty yksinkertaistettu kaavio sähköauton voimansiirron tekniikasta. Se koostuu akusta, sähkömoottorista, voimansiirrosta, apulaitteista, tehoelektroniikasta ja sähköisestä ohjausyksiköstä. Voimansiirtoon kuuluvat automallin mukaan vaihteisto, tasauspyörästöjärjestelmä ja vetävät pyörät. Sähköinen ohjausyksikkö taas koostuu voimansiirtoa mittaavista ja optimoivista moduuleista (anturit, liitäntäpiirit ja mikroprosessorit) sekä ajosähkömoottoria ohjaavasta järjestelmästä. Anturit mittaavat järjestelmästä saatavia mitattavia suureita, kuten lämpötilaa, nopeutta, vääntömomenttia, virtaa sekä jännitettä. Mitattavat suureet muutetaan elektroniseksi signaaliksi ohjausyksikölle. Tehoelektroniikkaan kuuluvat auton latausohjain, taajuusmuunnin ja tehomuunnin. (Khajepour et al. 2014)

Sähköisiin apulaitteisiin kuuluvat kaikki muut auton sähkölaitteet, kuten ajovalot, penkinlämmitys ja radio.



**Kuva 1. Kaavio sähköauton voimansiirrosta, muokattu lähteestä (Khajepour et al. 2014, s. 49).**

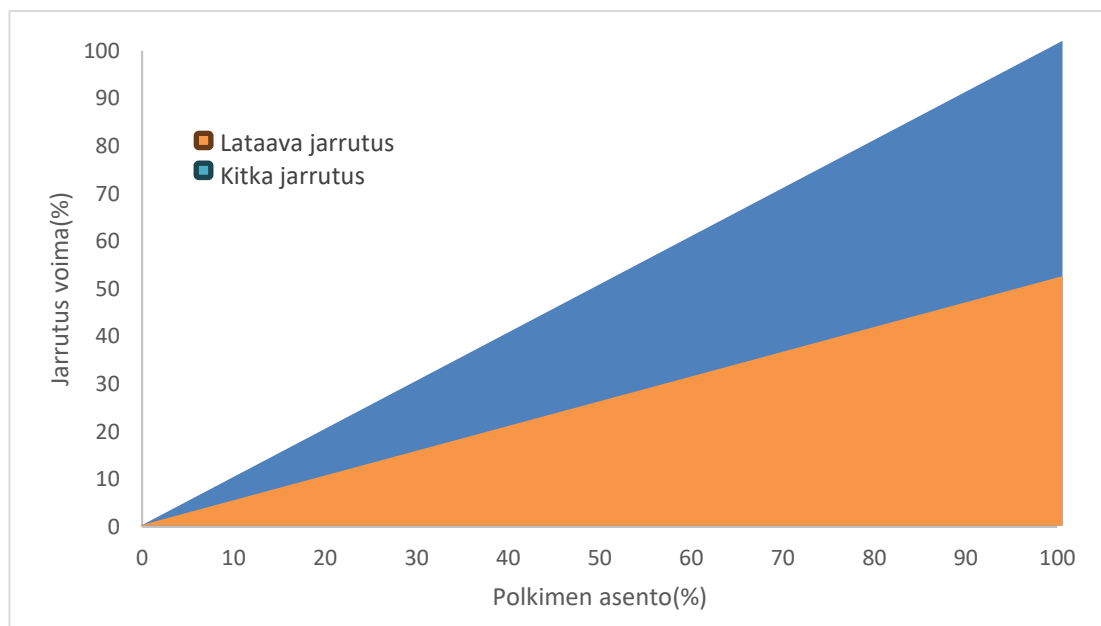
Lataavassa jarrutuksessa kiihdytyksestä poiketen sähkömoottori ei tuota vääntömomenttia auton liikuttamiseen akun energiasta, vaan sähkömoottori toimii generaattorina, jota auton inertia pakottaa pyörimään. Akkua pidetään silloin kuormana, joka saa generaattorissa aikaan autolle tarvittavan jarrutusmomentin samalla tuottaen sähköenergiaa akulle. (Nian et al. 2014) Jarrituksen tuottama jännite muutetaan tehoelektronikan avulla akulle sopivaksi jännitteeksi ja syötetään akkuun.

Lataavaa jarruttamista ei kuitenkaan voida käyttää aina, kuten silloin kun akun varaus on täysi tai akun lämpötila korkea. Siksi sähköautoihin tarvitaan myös lataavan jarrituksen rinnalle perinteiset mekaaniset kitkajarrut. Mekaanisia jarruja tarvitaan myös, jos lataavan jarrituksen tuottama jarrutusmomentti ei täytä tarvittavaa jarrutusmomenttia pysähtymiseen. Mekaaniset jarrut ovat myös siis tarpeelliset sähköauton turvallisuuden kannalta. (Nian et al. 2014)

## 2.2 Jarrutuksen strategia

Lataavalle jarruttamiselle on olemassa kaksi perusstrategiaa, jotka ovat rinnakkais- ja sarjajarrutus (Vasiljević et al. 2022). Nämä jarrutusstrategiat kuvaavat sähkömoottorin tuottaman jarrutusvoiman ja mekaanisten kitkajarrujen tuottaman jarrutusvoiman välistä suhdetta jarrutustilanteessa.

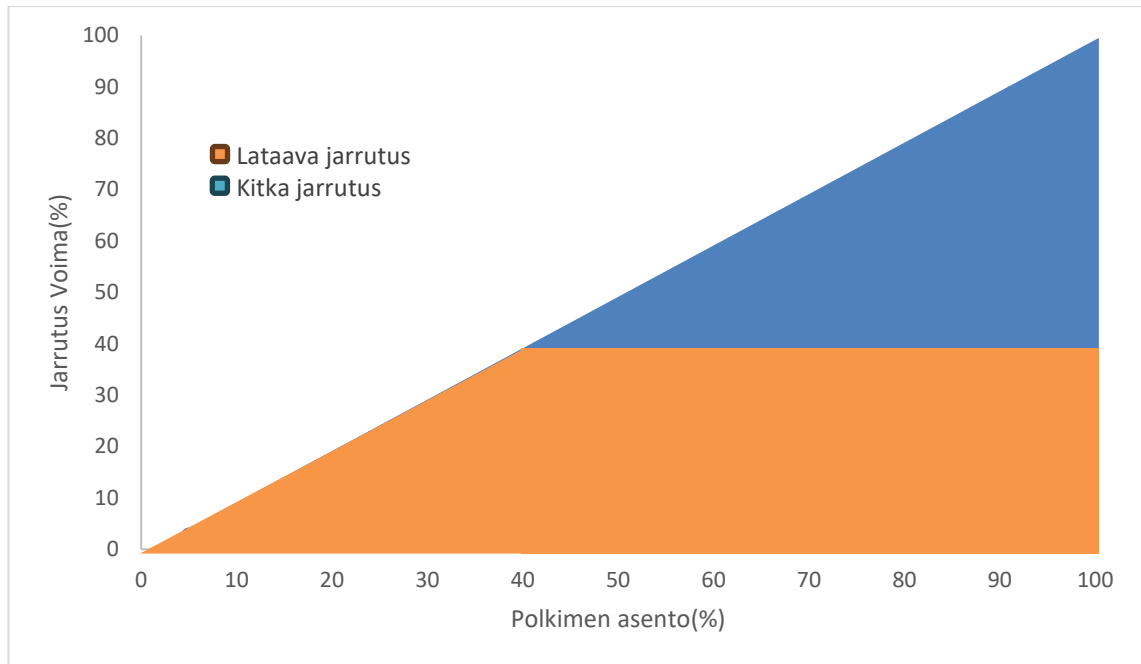
Rinnakkaisjarrutusjärjestelmässä, ajoneuvon jarruttaessa sähkömoottorin lataava jarruttaminen ja kitkajarruttaminen alkavat vaikuttamaan samaan aikaan rinnakkain. Jarrutustehon tarpeen kasvaessa molempien vaikutukset kasvavat. (Jia & Tang 2023) Rinnakkaisjarrutuksessa osa kineettisestä energiasta muuttuu jokaisessa jarrutustilanteessa lämpöenergiaksi kitkajarruissa. Kuvassa 2 on esitetty yksinkertaistettu esimerkkikuvaaja jarrutusvoiman ja polkimen asennon välisestä suhteesta rinnakkaisjarrutusstrategiassa.



**Kuva 2. Rinnakkaisjarrutus, muokattu lähteestä (Chidambaram, R. K. et al. 2023).**

Sarjajarrutusjärjestelmästrategiassa priorisoidaan lataavan jarrutuksen tuottamaa jarrutusvoimaa auton hidastamiseen. Kun jarrutustehon tarve kasvaa lataavan jarrutuksen tuottamaa jarrutusvoimaa suuremmaksi, käytetään kitkajarrujen tuottamaa jarrutusvoimaa täyttämään tarvittava jarrutusteho. (Jia & Tang 2023) Sarjajarrutusjärjestelmästrategia voidaan vielä jakaa jarrutuksen ohjauksen mukaan joko optimaaliseen energian palautusstrategiaan tai optimaaliseen jarrutustehostrategiaan (Chidambaram et al. 2023). Kuvassa 3 on esitetty yksinkertaistettu esimerkkikuvaaja jarrutusvoiman ja polkimen asennon välisestä suhteesta sarjajarrutusstrategiassa.





**Kuva 3. Sarjanjarrutus, muokattu lähteestä (Chidambaram, R. K. et al. 2023).**

Sarja- ja rinnakkaisjarrutusjärjestelmää vertailtiin Jia & Tang (2023) tutkimuksessa simuloimalla samanlaista jarrutustilannetta molemmilla strategioilla. Simuloidussa jarrutustilanteessa sarjajarrutusjärjestelmällä akun varaus nousi 6,5 Wh, rinnakkaisjarrutusjärjestelmällä vastaavasti akun varaus nousi 5,9 Wh. Energian talteenottoaste sarjajarrutusjärjestelmällä saavuttaa 20,5 %, rinnakkaisjarrutusjärjestelmällä vastaavasti energian talteenottoaste saavuttaa 18,6 %. Simulaation perusteella sarjajarrutusjärjestelmästrategia on sopivampi energian talteenottoon ja sillä on suurempi energiatehokkuus. (Jia & Tang 2023)

## 2.3 Jarrutuksen ohjaus

Sähköautoissa toimivat jarruttavina voimina sähkömoottorin tuottama jarrutusmomentti moottorin toimiessa generaattorina sekä perinteiset kitkajarrut. Jotta nämä molemmat autoa hidastavat jarrutusmomentit sekä turvallisuuden kannalta tärkeät toiminnot, kuten ABS (anti-lock braking system) ja ESC (electronic stability control), toimivat kuljettajan aktivoitessa jarrupolkimen, tarvitaan jarrutuksenohjain. Jarrutuksenohjain siis toteuttaa tarvittavan jarrutusskenaarion ja aktivoi sen mukaan sähköisen jarrutusvoiman ja kitkajarrutusvoiman (Vodovozov et al. 2021). Jarrutushetkellä jarrutusohjain analysoi erilaisia parametrejä, kuten liukusuhdetta, vierintävastusta, moottorin vääntömomenttia

ja varaustilaa. Näiden parametrien avulla eri ohjaimet laskevat optimaalisen ohjauksen jarrutusjärjestelmälle. (Chandak & Bhole 2017)

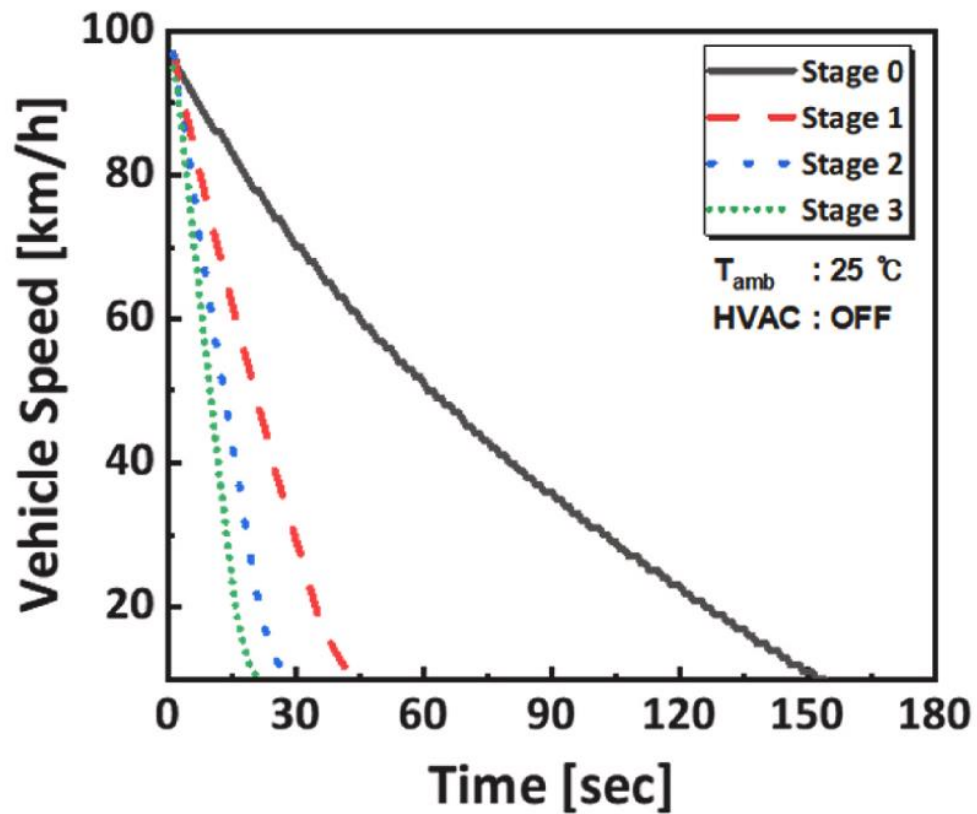
Jarrutuksen ohjaustekniikoita voidaan toteuttaa usealla eri tavalla eri moottorityypeille ja jarrutusstrategioille sopivaksi. Näitä eri moottorin ohjaustekniikoita on tutkittu kirjallisuudessa paljon.

## 3. LATAAVAN JARRUTTAMISEN EDUT

### 3.1 Energiatehokkuus

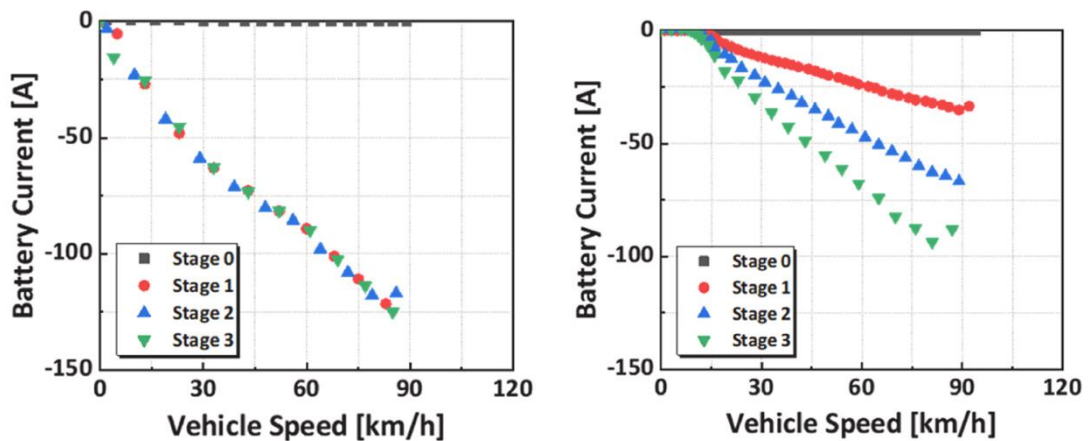
Lataavan jarruttamisen selvä etu on mahdollisuus energian talteenottoon jarrutustilanteessa. Tämän ominaisuuden avulla sähköauton energiatehokkuutta pystytään parantamaan, joka puolestaan lisää auton kantamaa. Lataava jarrutus lisää sähköauton kantamaa 8–25 % (Chidambaram et al. 2023). Lataavan jarruttamisen energiatehokkuutta ja sen vaikutusta auton kantamaan on tutkittu kirjallisuudessa paljon. Suuri osa tutkimuksista ovat lataavan jarrutuksen strategian ja jarrutuksen ohjauksen toteutustapojen optimoimiseen keskittyneitä. Tutkimuksissa tuloksia usein verrataan lataavaan jarrutukseen ilman kyseistä optimointia. Tutkimukset on suoritettu esimerkiksi Matlabin Simulink ohjelmalla tai simuloimalla testejä dynamometritesteillä. Tutkimuksia on myös tehty todellisissa ajotilanteissa.

Lee et al. (2023) tutki lataavan jarrutuksen vaikutusta sähköauton energian kulutukseen todellisilla teillä. Testi ajot suoritettiin reitillä, johon sisältyi moottoritie, maantie sekä kaupunkiosuus. Ennen todellisilla teillä ajettua testiä, tutkimuksessa testattiin akun ja moottorin toimintaominaisuudet dynamometritestissä. Dynamometritestissä auto kiihdytettiin 100 km/h nopeuteen ja pysäytettiin ilman perinteisten kitkajarrujen käyttöä. Lataavan jarrutuksen voimakkuuden tasoa vaihdettiin 0–3 välillä. Kuvassa 4 on esitetty kunkin lataavan jarrutuksen tason nopeusprofiili. Lataavan jarrutuksen tason kasvaessa auton pysähtymiseen kuluva aika ja matka lyhenivät. Auton kiihdytykseen kului lataavan jarrutuksen tasosta riippumatta lähes sama määrä 0,2660–0,2689 kWh energiaa. Jarrutuksen aikana taso 0 ei palauttanut energiaa ollenkaan, kun taas tasot 1, 2 ja 3 palauttivat vastaavasti 0,1398 kWh, 0,1658 kWh ja 0,1750 kWh.



**Kuva 4. lataavan jarrituksen tasojen nopeusprofiilit (Lee et al. 2023).**

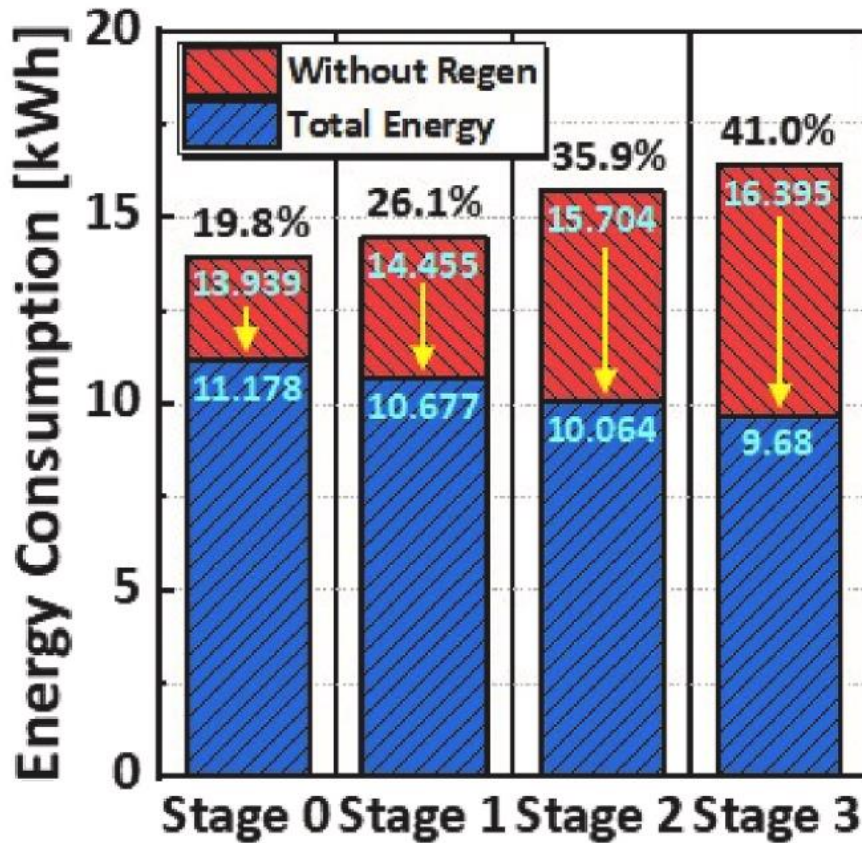
Toisen testin Lee et al. (2023) tekivät pysäyttämällä auton 100 km/h nopeudesta käyttäen myös perinteisiä kitkajarruja. Edellisen testin tavoin kiihdytyksen aikana energian kulutus oli samaa luokkaa, eikä jarrituksessa energiaa palautunut lataavan jarrituksen ollessa tasolla 0. Tasoilla 1–3 kuitenkin energiaa palautui 0,1562 kWh, 0,1596 kWh ja 0,1515 kWh. Kuvassa 5 on esitetty akun virran kuvaaja, kun auto hidastettiin ilman kitkajarruja sekä kitkajarrujen avulla. Kitkajarruja käyttäen akun virta oli sama kaikilla lataavan jarrituksen tasoilla, jonka vuoksi palautetun energian taso oli hyvin lähellä samaa. Ilman kitkajarruja akun virta kasvoi lataavan jarrituksen tasoilla 2 ja 3, noin kaksin- ja kolminkertaiseksi tasoon 1 verrattuna.



**Kuva 5. Akun virta jarrutuksessa kitkajarruilla (vasen) ja ilman kitkajarruja (oikea) (Lee et al. 2023).**

Todellisilla teillä ajetuissa testeissä kerättiin dataa CAN-väylän (Controller area network) kautta. Tähän sisältyi auton nopeus, kaasupolkimen asentotunnistin, moottorin vääntömomentti ja akkuvirta tiedot. Tästä kerätystä datasta huomattiin, että dynamometritestistä poiketen myös tasolla 0 jarrutustilanteissa palautui sähkövirtaa akulle. Tasot 1–3 palauttavat energiaa myös tilanteissa, joissa kaasupoljin on aktiivinen kuten tilanteessa, jossa kaasupoljinta kevennetään ja auton nopeus hidastuu. Taso 0 ei palauta energiaa ollenkaan näissä tilanteissa. (Lee et al. 2023)

Todellisilla teillä ajatussa testissä eri lataavan jarrutuksen tasoilla Lee et al. (2023) totesivat että suuremmilla lataavan jarrutuksen tasoilla oli suurempi energian kulutus ilman lataavan jarrutuksen palautettua energiaa. Suurempi energian kulutus johtuu siitä, että moottorin suurempaa vääntömomenttia sekä useampia hidastumisia tapahtui useammin tasaisessa nopeudessa ja jarruttaessa, jolloin uudelleen kiihdytettäessä kului merkittävä määrä energiaa. Tutkimuksessa myös todettiin, että mitä korkeampi lataavan jarrutuksen taso on ajon aikana, sitä enemmän energiaa palautui lataavan jarrutuksen kautta. Vaikka korkeimmalla lataavan jarrutuksen tasolla energiaa käytettiin eniten, oli kokonaisenergian kulutus pienin, koska lataava jarrutus palautti eniten energiaa takaisin akulle. Kuvassa 6 on esitetty eri tasojen energian kulutus ilman lataavan jarrutuksen palautettua energiaa sekä sen kanssa. Lataavan jarrutuksen tason kasvaessa energian kulutuksen vähenemisen suhde kasvaa. Tasolla 0 lataava jarrutus vähentää energian kulutusta 19,8 % kun taas tasolla kolme suhde on 41,0 %. (Lee et al. 2023)



Kuva 6. Lataavan jarrutuksen tasojen energiankulutus (Lee et al. 2023).

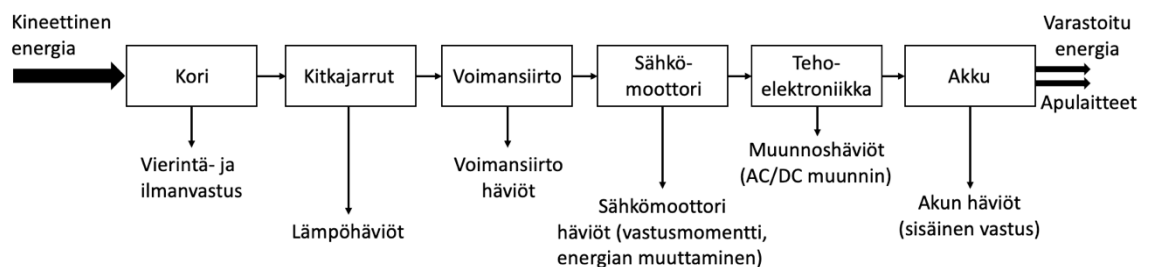
### 3.2 Muut edut

Lataavalla jarrutuksella on korkeamman energiatehokkuuden lisäksi muitakin etuja. Sähköautoissa kitkajarrujen käytön vähenemisen myötä jarrupalat kuluvat vähemmän, joka pienentää jarruista aiheutuvien hiukkaspäästöjen määrää (Vasiljević et al. 2022). Jarrutuksesta syntyvät hiukkaspäästöt kattavat 11–21 % liikenteestä johtuvista PM<sub>10</sub>-hiukkasisista (hiukkaskoko alle 10 mikrometriä) (Grigoratos, T. & Martini, G. 2015).

## 4. LATAAVAN JARRUTTAMISEN HAASTEET

### 4.1 Energia häviöt

Kaikkea kiihdytykseen käytettyä energiaa ei ole mahdollista saada palautettua takaisin lataavalla jarrutuksella. Koska lataavan jarrutusjärjestelmän eri osien välillä on mekaanisia yhteyksiä ja tiettyjä hyötysuhteita, syntyy järjestelmässä energiahäviöitä. Kuvassa 7 on esitetty sähköautossa syntyviä häviöitä, joista osa syntyy myös luonnonilmiöistä johtuvista voimista, joita kohdistuu autoon sen ollessa liikkeessä. Ajoneuvon jarruttaessa nämä luonnonilmiöistä johtuvat voimat edustavat positiivista ilmiötä auton pysähtymisen kannalta, sillä ne lyhentävät jarrutukseen kuluvaan aikaan ja matkaa. On kuitenkin hyvä huomioida, että nämä kineettistä energiaa vähentävät voimat vaikuttavat negatiivisesti lataavan jarrutuksen tehokkuuteen. (Vasiljević, S. et al. 2022)



**Kuva 7. Energia häviöt sähköautossa, muokattu lähteestä (Vasiljević, S. et al. 2022).**

### 4.2 Vaikutus akkuun

Autoteollisuudessa vallitsevaksi akkuteknologiaksi on valikoitunut Litiumioniakku (Li-ion) sen useiden vakuuttavien ominaisuuksien ansiosta. Li-ion-akuilla on korkea teho- ja energiatiheys, korkea jännite, pitkä sykli-ikä ja erinomainen varauksen säilytys. (Muneer et al. 2017, s. 145) Korkea lataus-purkausnopeuden intensiteetti ja Litium-ioni akkujen käyttölämpötila vaikuttavat akun alttiuteen vioille, joka tekee lataavan jarrutuksen avulla akkuun syötetyn virran laadusta merkittävän tekijän akkuun kohdistuvista negatiivisista vaikutuksista. (Chidambaram et al. 2023).

Akun varauksen tila SOC (state of charge) ja akun kunnon tila SOH (state of health) ovat tärkeitä parametrejä lataavan jarrutuksen ohjauksen kannalta. Tarkka SOC:in

mittaaminen johtaa pidempään akun elinikään ja estää akun ennenaikaista vikaantumista. SOC:in arvioiminen on kuitenkin hankala prosessi, johon vaikuttaa moni muuttuja kuten akun ikä, vallitseva ympäristö ja usea tuntematon tekijä. SOH kuvaa akun olemassa olevaa kykyä tuottaa tietty suorituskyky verrattuna kykyyn alkuperäiskunnossa. Akun SOH lasketaan jakamalla akun kapasiteetti sen nimelliskapasiteetilla. Vaikka erilaisia menetelmiä on käytettävissä SOH:in ja SOC:in arvioimiseksi, niiden arvojen tarkka arvioiminen on haasteellista. (Chidambaram et al. 2023).

Lataavan jarrutuksen tuottamalla sähkövirralla on todettu olevan negatiivinen vaikutus akun käyttöikäen, jos akun lämpötila on liian matala tai korkea. Optimaalinen lämpötila hidastamaan akun vanhenemista on 25 °C. (Chidambaram et al. 2023) Lataavan jarrutuksen tuottaman sähkövirran suuruudella on merkittävä yhteys akun lämpötilan muutokseen. Korkea sähkövirta johtaa helposti suureen lämpötilaan akussa, kun taas matala sähkövirta auttaa rajoittamaan lämpötilan kohoamista. (Huang et al. 2015)

On kuitenkin tärkeää ottaa huomioon, että negatiivisista vaikutuksista huolimatta, monissa tutkimuksissa on todettu lataavan jarrutuksen pidentävän akun käyttöikäen, varsinkin korkeilla lataavan jarrutuksen tasoilla. Tämä johtuu siitä, että korkealla lataavan jarrutuksen tasolla akkuun syötetään usein matalalla virralla sähkövirtaa, joka vähentää akun purkaussyvyyttä. (Chidambaram et al. 2023)



## 5. YHTEENVETO

Tavoite kestävämmästä liikkumisesta sähköautojen yleistymisen osalta vaatii kehitystä sähköautojen kantamassa, jotta se ylittäisi polttomoottoriautojen kantaman tasolle. Ennen akkuteknologian läpimurtoa, lataava jarrutus on tärkeä tekijä kantaman lisäämiseen parantamalla auton energiatehokkuutta.

Työssä huomattiin, että lataavan jarrutuksen suurin etu on sähköauton korkeampi energiatehokkuus. Lataavan jarrutuksen ansiosta sähköauton energian kulutus laskee huomattavasti. Lataavalla jarrutuksella on muitakin etuja kuten matalampi hengitettävien hiukkaspäästöjen määrä ja pidemmät huoltovälit kitkajarruille. Lataavalla jarrutuksella on myös positiivisia vaikutuksia akun elinikään oikein säädeltynä.

Lataavan jarrutuksen haasteina voi pitää sen mahdollista negatiivista vaikutusta akkuun, jos sen tuottama sähkövirta nostaa akun lämpötilaa yli optimaalisen lämpötilan. Lataavan jarrutuksen mekaanisissa yhteyksissä syntyviä energiahäviöitä, jotka rajoittavat takaisin kerättävän energian määrää, voidaan myös pitää lataavan jarrutuksen haasteena.

Lataava jarrutus on pitkään ja paljon tutkittu aihe, joka on selvästi hyödyllinen ominaisuus sähköautoissa. Yksi tulevaisuuden tutkimuskohde voisi olla, kuinka lataavassa jarrutuksessa palautettua energiaa voisi mahdollisesti säilyttää eri tavalla, eikä ohjata suoraan takaisin auton akulle. Näin voitaisiin vähentää sähköauton akkuun kohdistuvia negatiivisia vaikutuksia liian korkean sähkövirran takia.

## LÄHTEET

- Chandak, G. A. & Bhole, A. A. (2017). 'A review on regenerative braking in electric vehicle', in *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*. [Online]. 2017 IEEE. pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/IPACT.2017.8245098>
- Chidambaram, R. K., Chatterjee, D., Barman, B., Das, P. P., Daler, T., Daler, J. et al. (2023) Effect of Regenerative Braking on Battery Life. *Energies (Basel)*. [Online] 16 (14), 5303–. <https://doi.org/10.3390/en16145303>
- Grigoratos, T. & Martini, G. (2015). Brake wear particle emissions: a review. *Environmental science and pollution research international*. [Online] 22 (4), 2491–2504. <http://doi.org/10.1007/s11356-014-3696-8>
- Huang, J., Qin, D. & Peng, Z. (2015). Effect of energy-regenerative braking on electric vehicle battery thermal management and control method based on simulation investigation. *Energy conversion and management*. [Online] 1051157–1165. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.080>
- Jia, Q. & Tang, P. (2023). Simulation of Electric Vehicle Regenerative Braking Control Strategy Based on Brake Intention Recognition. *Journal of Physics: Conference Series*. [Online] 2492 (1), 12018–. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/2492/1/012018>
- Khajepour, A., Fallah, M. S. & Goodarzi, A. (2014). *Electric and Hybrid Vehicles Technologies, Modeling and Control - A Mechatronic Approach*. 1st edition. Wiley.
- Lee, G., Song, J., Han, J., Lim, Y. & Park, S. (2023). Study on energy consumption characteristics of passenger electric vehicle according to the regenerative braking stages during real-world driving conditions. *Energy (Oxford)*. [Online] 283128745-. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128745>
- Muneer, T., Kolhe, M. N. & Doyle, A. (2017). *Electric vehicles: prospects and challenges*. Amsterdam: Elsevier.
- Nian, X., Peng, F. & Zhang, H. (2014). Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor. *IEEE transactions on industrial electronics* (1982). [Online] 61 (10), 5798–5808. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2300059>
- Suomen virallinen tilasto (SVT): Mootoriajoneuvojen ensirekisteröinnit [verkkojulkaisu]. Viiteajankohta: 2023, joulukuu. ISSN=1799-2516. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavissa (viitattu 09.01.2024) <https://www.stat.fi/julkaisu/clmqapcgg3ir40bw3v5feh2j>
- Vasiljević, S., Aleksandrović, B., Glišović, J. & Maslač, M. (2022). Regenerative braking on electric vehicles: working principles and benefits of application. *IOP conference series. Materials Science and Engineering*. [Online] 1271 (1), 12025–. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/1271/1/012025>
- Vodovozov, V., Raud, Z & Petlenkov, E. (2021). Review on braking energy management in electric vehicles. *Energies (Basel)*. [Online] 14 (15), 4477–. <https://doi.org/10.3390/en14154477>