

Eevert Vähätörmä

# KIERTOMÄNTÄMOOTTORI SARJA- HYBRIDIAUTON LATAUSMOOTTORINA

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Huhtikuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Eevert Vähätörmä: Kiertomäntämoottori sarjahybridiauton latausmoottorina  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikka  
Huhtikuu 2023

---

Euroopan unionin asettaman päästötavoitteen takia liikenteen päästöjä on vähennettävä ilmastomuutoksen hillitsemiseksi. Tähän pyritään ensisijaisesti sähköistämällä autokantaa. Täyssähköautojen yleistymistä hidastaa kuitenkin latausverkoston rajallisuus, käyttäjien kokemaa toimintasädeahdistus ja korkea hankintahinta, joka johtuu pitkälti suuresta akkukapasiteetista ja kalalliista raaka-aineista. Tähän tarjotaan ratkaisuna kiertomäntämoottoria latausmoottorinaan hyödyntävää sarjahybridiautoa, jossa yhdistetään sähköauton ja polttomoottoriauton parhaat puolet. Päästöt pysyvät kiertomäntämoottorista huolimatta matalana, sillä suurin osa ajosta tapahtuu verkkovirrasta ladatulla sähköllä, aivan kuten täyssähköautolla. Käyttömahdollisuudet eivät kuitenkaan ole yhtä rajatut kuin täyssähköautossa.

Työ on kirjallisuuskatsaus, ja sen tavoitteena on selvittää kiertomäntämoottorin nykyinen kehitystilanne sekä mahdollisuus käyttää kiertomäntämoottoria henkilöauton sähköisen voimalinjan latausmoottorina. Aluksi perehdytään kiertomäntämoottorin toimintaan, hyötyihin, ongelmakohtiin sekä vaihtoehtoihin polttoaineisiin. Tämän jälkeen esitellään autojen erityyppiset sähköiset voimalinjat, joista keskitytään tarkemmin sarjahybridiin. Lisäksi tutustutaan kahteen simuloimalla toteutettuun tutkimukseen, joissa verrataan erilaisia sarjahybridiauton latausmoottoreita. Lopuksi perehdytään kiertomäntämoottoria hyödyntävien sarjahybridiautojen käytännön toteutuksiin, joista usuin ja merkittävin on Mazdan hiljattain julkaisema tuotantoversio Mazda MX-30 e-Skyactiv R-EV.

Työssä havaitaan kiertomäntämoottorin olevan potentiaalinen vaihtoehto sarjahybridiauton latausmoottoriksi hyvien ominaisuuksiensa takia. Näitä ominaisuuksia ovat keveys, pieni koko, hyvä tehopainosuhte, hiljaisuus, värinättömyys, mahdollisuus käyttää hiilineutraaleita polttoaineita sekä yksinkertainen rakenne. Kiertomäntämoottori ei kuitenkaan ole täysin ongelmaton, vaan suurin haaste on heikko hyötysuhde, joka johtuu palotilan epäoptimaalisesta muodosta sekä vuodoista. Ongelman ratkaisemiseksi kiertomäntämoottorin polttoaineensyöttöä sekä sytytystä on kehitetty. Käyttämällä vedyn ja bensiinin muodostamaa polttoaineseosta hyötysuhdetta saadaan nostettua merkittävästi, jolloin myös päästöt pienenevät tyyppien oksideita lukuun ottamatta.

Kiertomäntämoottori on vanha keksintö, mutta uusia tutkimuksia tehdään silti paljon. Kiertomäntämoottorit eivät onnistuneet vakiinnuttamaan asemaansa autoteollisuudessa kilpaillessaan iskumäntämoottoreita vastaan perinteisissä polttomoottoriautoissa, mutta autojen sähköistyminen antaa niille uuden mahdollisuuden. Sarjahybridiauto on potentiaalinen haastaja täyssähköautolle ja kiertomäntämoottorin hyvät ominaisuudet tekevät kiertomäntämoottorista houkuttelevan vaihtoehdon sarjahybridiauton latausmoottoriksi.

Avainsanat: kiertomäntämoottori, wankelmoottori, sarjahybridi, autojen sähköistyminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. KIERTOMÄNTÄMOOTTORIN SUORITUSKYKY .....	2
2.1 Hyödyt.....	2
2.2 Ongelmakohdat.....	3
2.3 Vaihtoehtoiset polttoaineet .....	4
2.3.1 Maakaasu .....	4
2.3.2 Vety .....	5
3. AUTOJEN SÄHKÖISTYMINEN .....	7
3.1 Täyssähkö .....	7
3.2 Hybridi.....	7
3.2.1 Hybridiautojen luokittelu .....	8
3.2.2 Sarjahybridiauton suorituskyky.....	8
3.2.3 Kiertomäntämoottori sarjahybridikäytössä.....	9
3.2.4 Älykäs lataus.....	10
3.3 Massan vaikutus energiankulutukseen.....	10
4. KÄYTÄNNÖN TOTEUTUKSET .....	12
4.1 Prototyypit.....	12
4.2 Tuotantoversiot .....	13
5. YHTEENVETO.....	14
LÄHTEET .....	16

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

EU	Euroopan unioni
AIE	Advanced Innovative Engineering
NO <sub>x</sub>	Typen oksidi
HC	Hiilivety
CO	Hiilimonoksidi
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi
UDDS	Urban Dynamometer Driving Schedule

# 1. JOHDANTO

Liikenteellä on nykypäivänä merkittävä rooli ilmastonmuutoksen kehittymisessä. Euroopan ympäristökeskuksen mukaan liikenne kuluttaa kolmanneksen kaikesta EU:ssa käytettävästä loppuenergiasta. Liikenteen osuus koko EU:n kasvihuonepäästöistä on yli neljäsosa, ja tästä osuudesta henkilö-, kuorma-, rekka- ja linja-autot tuottavat yli 70 % päästöistä. Lisäksi liikenne on merkittävä ilmansaasteiden aiheuttaja kaupungeissa. EU:n tavoitteena on olla kasvihuonekaasupäästöneutraali vuoteen 2050 mennessä. (Euroopan ympäristökeskus 2020)

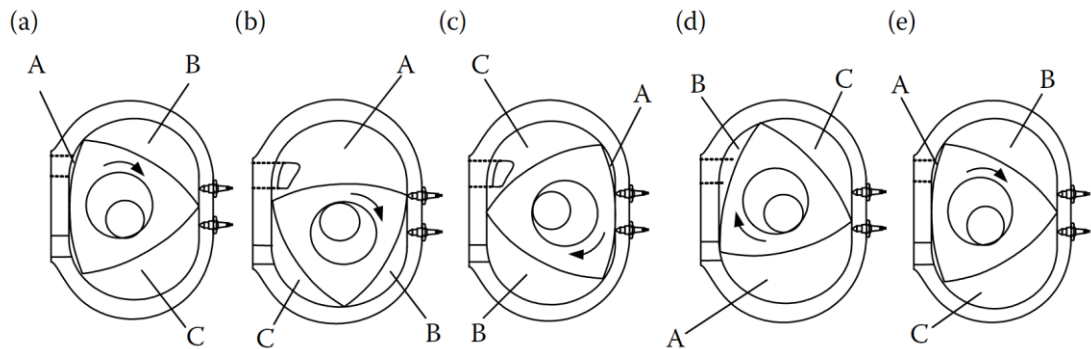
Tällä hetkellä valtaosa liikenteessä olevista ajoneuvoista toimivat joko diesel- tai ottomoottorilla. Kiristyvien päästötavoitteiden takia ne pyritään korvaamaan vähäpäästöisemmällä vaihtoehdoilla, kuten hybridi- tai sähköajoneuvoilla. Täyssähköisten ajoneuvojen yleistymistä hidastaa kuitenkin latausinfrastruktuurin rajallisuus, akkujen korkea hinta sekä käyttäjillä esiintyvä toimintasädeahdistus (engl. range anxiety).

Tässä työssä tarkastellaan wankelmoottorin eli kiertomäntämoottorin soveltuvuutta sarjahybridiauton latausgeneraattorin voimanlähteeksi. Tarkasteltavaksi rajataan vain henkilöautot eli raskaan liikenteen vaihtoehtoihin voimalinjoihin ei perehdytä. Näkökulmana on päästöjen vähennys sekä energiatehokkuus. Lisäksi työssä selvitetään vedyn soveltuvuutta kiertomäntämoottorin polttoaineeksi, ja sen vaikutusta moottorin toimintaan, päästöihin sekä hyötysuhteeseen. Kiertomäntämoottori on kooltaan pieni, ja sillä on hyvä tehopainosuhde. Nämä ovat haluttuja ominaisuuksia hybridiauton voimalinjalle.

Tutkimuskysymyksenä on, millainen on kiertomäntämoottorin nykyinen kehitystilanne ja voidaanko kiertomäntämoottoria käyttää henkilöauton sähköisen voimalinjan latausmoottorina. Tutkimusmenetelmänä käytetään kirjallisuuskatsausta. Aluksi perehdytään kiertomäntämoottorin toimintaan, hyötyihin, ongelmakohtiin sekä vaihtoehtoihin polttoaineisiin. Tämän jälkeen esitellään autojen sähköistymistä ja siihen liittyviä haasteita sekä tutkimuksia kiertomäntämoottorien sarjahybridikäytöstä. Lopuksi tutustutaan kiertomäntämoottoria hyödyntävien hybridiautojen käytännön toteutuksiin.

## 2. KIERTOMÄNTÄMOOTTORIN SUORITUSKYKY

Kiertomäntämoottori on nelitahtiperiaatteella toimiva polttomoottori, joka muuttaa paineen pyörimisliikkeeksi epäkeskorakenteen avulla. Mäntä, jota kutsutaan myös roottoriksi, on muodoltaan sivuiltaan pullistunut kolmio, ja se pyörii epitrokoidisessa kammiossaan. (Ehsani et al. 2010 s. 93–95) Rakennetta on havainnollistettu kuvassa 1.



**Kuva 1.** Kiertomäntämoottorin nelitahtisykli (Ehsani et al. 2010 s. 94).

Männän kolme puolta muodostavat kolme erillistä kammiota, jotka on nimetty kuvassa 1 kirjaimilla A, B ja C. Vaiheessa a ilmapolttoaineseos imetään kammiioon A, ja puristus alkaa vaiheessa b. Vaiheessa c puristustahti on ohi, sytytystulpat sytyttävät polttoaineseoksen ja työtahti alkaa. Vaiheessa d työtahti on ohi ja pakokaasut poistetaan kammiosta. Tämän jälkeen kierto alkaa alusta. Männän kiertäessä yhden kokonaisen kierroksen kaikki neljä tahtia toistuvat jokaisessa kammiossa (A, B ja C) eli yhteensä kolme kertaa. (Ehsani et al. 2010 s. 93–95)

### 2.1 Hyödyt

Kiertomäntämoottorilla on useita etuja verrattuna perinteiseen nelitahtiseen iskumäntämoottoriin. Nämä edut ovat hyödyllisiä erityisesti sarjahybridiautossa käytettävässä moottorissa. Seuraavaksi esitellään merkittävimmät kiertomäntämoottorin hyödyt verrattuna nelitahtiseen iskumäntämoottoriin.

Kiertomäntämoottorin rakenne on iskumäntämoottoria yksinkertaisempi. Kiertomäntämoottorissa ei tarvita kiertokankea, joka muuttaa männän edestakaisen liikkeen pyörimisliikkeeksi, koska pyörimisliike saadaan aikaan pyörivän männän epäkeskorakenteen avulla (Ehsani et al. 2010 s. 93–95). Työtahti toistuu männän kierroksen aikana kolme kertaa ja kerran jokaista kampiakselin kierrosta kohden. Nelitahtisessa iskumäntämoottorissa yksi mäntä tuottaa työtahdin vain joka toisella kampiakselin kierroksella. Tämä

tarkoittaa, että kiertomäntämootorissa sylinterin tilavuus hyödynnetään kaksi kertaa useammin kuin iskumäntämootorissa. Kiertomäntämootorissa ei myöskään ole venttiileitä vaan pyörivä mäntä avaa imu- ja poistokanavat oikeaan aikaan geometriansa avulla. Yksinkertaisemman ja tehokkaammin hyödynnetyn rakenteen takia samantehtoinen kiertomäntämoottori on iskumäntämoottoria noin 50 % pienempi ja kevyempi. Lisäksi kiertomäntämootorissa on vähemmän osia, mikä mahdollistaa moottorin helpomman ja nopeamman valmistamisen. (Ehsani et al. 2010 s. 93–95)

Kiertomäntämoottorin toiminta on lähes värinäöntä, koska männän liike on pyörivää eikä edestakaisia männän iskuja esiinny. Kiertomäntämoottori on myös iskumäntämoottoria hiljaisempi venttiilikoneiston puuttumisen takia. Yksimäntäinen kiertomäntämoottori on käynniltään yhtä tasainen kuin kolmesylinterinen iskumäntämoottori. (Ehsani et al. 2010 s. 93–95) Autoteollisuudessa käytetään usein kaksimäntäisiä kiertomäntämoottoreita (Ehsani et al. 2010 s. 93–95), mikä vastaisi käynnin tasaisuudeltaan kuusisylinteristä iskumäntämoottoria.

Nopeusalue on kiertomäntämootorissa iskumäntämoottoria laajempi pienemmän kitkan, venttiilien puuttumisen, tehokkaan imu- ja poistotahdin sekä männän edestakaisen liikkeen puuttumisen takia (Ehsani et al. 2010 s. 93–95). Kiertomäntämoottorin rakenne mahdollistaa vedyn käyttämisen polttoaineena, sillä imu- ja poistopuoli ovat erillään toisistaan. Tällöin kuumen pinnan aiheuttama ennen aikaisen polttoaineen syttymisen vaara on pieni. (Di Ilio et al. 2020)

## 2.2 Ongelmakohdat

Kiertomäntämoottorilla on myös merkittäviä ongelmakohtia, jotka ovat hidastaneet sen yleistymistä autoteollisuudessa. Nämä ongelmakohdat on pyritty ratkaisemaan tuotekehityksen avulla, mutta haasteita on yhä. Autoteollisuudessa Mazda on merkittävä kiertomäntämoottorien kehittäjä, ja autoteollisuuden ulkopuolella yksi johtavista yrityksistä on AIE (Advanced Innovative Engineering) (Turner et al. 2019). Seuraavaksi esitellään yleisimmät kiertomäntämoottorien ongelmakohdat.

Männän eri puolilla olevissa kammioissa on keskenään suuria lämpötilaeroja, mikä aiheuttaa epätasaista lämpölaajenemista. Lämpölaajenemisen vaikutuksesta männän tiivistäminen on haastavaa (Wu et al. 2014). Vuotoja ilmenee männän sivuilla, kulmissa, sytytystulpan aukon kohdalla ja kärjissä, joista kärkien vuodot ovat merkittävimmät. Niiden osuus on 2/3–3/4 kaikista vuodoista. Kärkitiivisteiden kehittämiseksi on tehty paljon tutkimuksia ja tiivisteitä on myös saatu kehitettyä. Haasteeksi tulevat kuitenkin kalliit ma-

teriallit ja valmistuskustannukset. Lisäksi voitelu on monimutkaisempaa kuin iskumäntämootorissa, koska kärkitiivisteiden molemmat puolet altistuvat polttoaineelle. Tämä johtaa usein liialliseen voiteluun, joka näkyy suurena öljynkulutuksena. (Meng et al. 2023)

Toinen merkittävä haaste on palotilan pitkä ja kapea muoto, jonka vaikutuksesta palaminen on hitaampaa kuin iskumäntämootorissa (Meng et al. 2023). Mikäli kaikki polttoaine ei ehdi palaa ennen poistotahtia, menee polttoainetta hukkaan pakokaasujen mukana, mikä laskee moottorin hyötysuhdetta. Ongelma on pyritty ratkaisemaan nopeuttamalla palamisprosessia sytyttämällä seos kahdella sytytystulppalla (Meng et al. 2023), kuten kuvasta 1 nähdään. Ero on merkittävä yhteen sytytystulppaan verrattuna. Mazda on käyttänyt kilpa-autossaan jopa kolmea sytytystulppaa, mutta lisääntyvien kustannusten ja vuotojen takia käytetään tavallisesti kahta sytytystulppaa. (Meng et al. 2023) Sytytystulppien tilalta on myös kokeiltu lasersytytystä, jolla on päästy vielä parempiin tuloksiin (Loktionov & Pasechnikov 2021). Palotilan haastavan muodon sekä suuren pinta-alan ja tilavuuden suhteen takia jäähdytyksessä menee enemmän lämpöä hukkaan verrattuna iskumäntämootoriin (Meng et al. 2023).

Edellä mainituista syistä kiertomäntämootorin polttoaineenkulutus ja päästöt ovat suuremmat kuin iskumäntämootorissa. Kiertomäntämootoreita pyritään kuitenkin kehittämään jatkuvasti, ja yhtenä vaihtoehtona päästöjen ja kulutuksen parantamiseksi ovat vaihtoehtoiset polttoaineet ja erilaiset polttoaineseokset pelkän bensiinin tilalta.

## **2.3 Vaihtoehtoiset polttoaineet**

Tyypillisesti kiertomäntämootoreissa käytetään polttoaineena bensiiniä, mutta muun muassa dieseliä, lentopetrolia, maakaasua ja vetyä on myös käytetty kiertomäntämootoreissa. Myös polttoaineiden erilaiset seokset ovat mahdollisia. Kaasumaiset polttoaineet, kuten maakaasu ja vety, soveltuvat kuitenkin nestemäisiä polttoaineita paremmin, koska kaasumaisesta polttoaineesta on helpompi muodostaa sylinteriin hyvin palava seos. (Fan et al. 2017) Lisäksi päästötavoitteet ohjaavat pois fossiilisten polttoaineiden käytöstä, jolloin tilalle tulisi löytää hiilineutraaleita vaihtoehtoja. Tarkastellaan seuraavaksi tällä hetkellä lupaavimpia vaihtoehtoja: maakaasua ja vetyä.

### **2.3.1 Maakaasu**

Maakaasua pidetään fossiilisena polttoaineena, mutta synteettistä metaania, joka on kemiallisesti identtistä maakaasun kanssa, voidaan tuottaa vedystä ja hiilidioksidista. Synteettinen metaani on siis hiilineutraalia valmistustapansa takia. Tässä työssä käytetään



kyseisestä polttoaineesta nimitystä maakaasu ottamatta kantaa tapaan, jolla polttoaine on tuotettu.

Maakaasua on käytetty jo pitkään polttoaineena iskumäntämoottoreissa, joten tekniikka on siltä osin tuttua. Hyvänä puolena voidaan pitää helpompaa varastoitavuutta vetyyn verrattuna sekä mahdollisuutta vähentää bensiinin ja dieselin käyttöä liikennepolttoaineena. Kiertomäntämoottorin palotilan epäoptimaalinen muoto asettaa kuitenkin haasteita maakaasun käytölle (Fan et al. 2017). Maakaasulla on hidas palamisnopeus, jolloin riskinä on suuri palamattomien polttoaineiden määrä palotapahtumassa. Palamisprosessia on pyritty parantamaan optimoimalla polttoaineen ruiskutuksen ajoitusta ja kestoai-kaa. (Fan et al. 2017) Tutkimukset kohdistuvat kuitenkin enimmäkseen maakaasun sijasta vedyn hyödyntämiseen kiertomäntämoottoreissa.

### 2.3.2 Vety

Vedyllä on useita ominaisuuksia, joiden avulla kiertomäntämoottorin palamisprosessia saadaan parannettua bensiiniin verrattuna. Vety on lisäksi hiilineutraali polttoaine, ja se nähdään siksi vaihtoehtona fossiilille liikennepolttoaineille. Vetyä saadaan tuotettua ympäristöystävällisesti vedestä elektrolyysillä, jolloin vetyä voidaan pitää myös energia-varastona. Elektrolyysissä vesimolekyylejä hajotetaan sähköenergian avulla vedyksi ja hapeksi (Motiva 2020). Reaktio on vastaava kuin polttokennossa, mutta käänteinen. (Motiva 2020) Sähköenergiana voidaan käyttää esimerkiksi tuulisella säällä tuulivoimaloiden tuottamaa halpaa sähköä.

Vedyllä on laaja syttymisalue, mikä mahdollistaa laihan seoksen käytön. Laihalla seoksella saavutetaan paremman palamisen takia matalampi polttoaineenkulutus ja matalamman palamislämpötilan takia pienemmät NO<sub>x</sub> -päästöt. Toinen vedyn hyvä puoli on nopea palamisnopeus. Nopea palaminen mahdollistaa suuret kierrosnopeudet ja täten suuremman tehon. Lisäksi vedyllä on erittäin korkea diffusiivisuus, minkä vaikutuksesta polttoaineseos sekoittuu täydellisesti. (Ozcanli et al. 2018)

Pienin tarvittava sytytysenergia on vety-ilma-seoksella 0,02 MJ, kun bensiini-ilma-seoksella se on 0,24 MJ. Tämän takia kuumat pinnat ja kaasut voivat aiheuttaa vedyn syttymisen sylinterissä väärään aikaan, mikä pitää huomioida moottorin suunnittelussa. Vedyllä on kuitenkin mahdollista saavuttaa korkeampi puristussuhde kuin bensiinillä, koska vedyn itsesyttymislämpötila on korkea. (Ozcanli et al. 2018)

Vetyä voidaan käyttää kiertomäntämoottorissa joko puhtaana vetynä tai sekoitettuna johonkin toiseen polttoaineeseen. Puhtaasta vedystä ei tule hiilipäästöjä ja moottorin hyötysuhde on mahdollista saada paremmaksi. Haasteena on kuitenkin vedyn pieni tiheys,

joka tekee vedyn varastoisesta vaikeaa. Nykyisellä teknologialla vetyä ei saada säilyttää riittävän pieneen tilaan turvallisesti ja kohtuullisilla kustannuksilla, jolloin energiatiheys jää pieneksi. Tämän takia vety onkin käyttökelpoisempi osana polttoaineseosta, kuin puhtaana vetypolttoaineena. (Ozcanli et al. 2018)

Tutkimuksessa (Amrouche et al. 2014) verrataan kiertomäntämoottorin hyötysuhdetta ja päästöjä sekoittamalla bensiinin sekaan eri pitoisuuksia vetyä. Kyseinen tutkimus on toteutettu kokeellisesti Outboard Marine Corporationin 0,530 L kiertomäntämoottorilla. Akselitehoa vastaava terminen hyötysuhde on noin 28 % parempi verrattuna pelkällä bensiinillä toimivaan versioon, kun polttoaineseoksessa on energiamäärältään 10 % vetyä. Lisäksi HC-päästöt pienenevät 85 %, CO-päästöt 64 % ja CO<sub>2</sub>-päästöt 36 %. Toisaalta NO<sub>x</sub>-päästöt nousevat 137 % korkeammasta palotilan paineesta ja lämpötilasta johtuen (Amrouche et al. 2014). Tuloksista havaitaan merkittäviä eroja pelkkään bensiiniin verrattuna jo huomattavasti matalammillakin vetypitoisuuksilla.

Jatkotutkimuksessa (Amrouche et al. 2016) pyritään pienentämään suuresti nousseiden NO<sub>x</sub>-päästöjen määrää lisäämällä palamiseen yli-ilmamäärää. 1,52 ilmakertoimella ja energiamäärältään 6 % vetyosuudella saavutetaan 61 % pienemmät NO<sub>x</sub>-päästöt pelkkään bensiiniin verrattuna. Hyötysuhde laskee kuitenkin bensiinin tasolle (Amrouche et al. 2016), joten hyötysuhdetta parannettaessa joudutaan tasapainottelemaan hyötysuhteen ja päästöjen välillä. Päästöjä voitaisiin vähentää myös käyttämällä katalysaattoria, mutta edellä mainitussa tutkimuksessa näin ei tehdä.

Vedyn käyttäminen osana polttoaineseosta ei poista vedyn varastoisuuteen liittyvää haastetta, mutta helpottaa sitä, koska tällöin tarvittava vedyn määrä on huomattavasti pienempi (Ozcanli et al. 2018). Vety soveltuu kiertomäntämoottoriin polttoaineeksi ilman merkittäviä muutoksia olemassa olevaan systeemiin ja on siten houkutteleva vaihtoehto hyötysuhteen parantamiseksi. (Ozcanli et al. 2018) Vedyn haasteellisen varastoisuuden lisäksi vedyn käytön yleistymistä liikennepolttoaineena hidastaa vetyjakeluasemien pieni määrä ja niillä sattuneet onnettomuudet.

## 3. AUTOJEN SÄHKÖISTYMINEN

Liikenteen päästöjen vähentämiseksi ajoneuvojen on muututtava vähäpäästöisemmiksi. Tehokkain tapa vähentää ajoneuvojen käytön aikaisia päästöjä on niiden sähköistyminen. Myös vedyn käyttäminen liikennepolttoaineena vähentäisi päästöjä, mutta keskeinen trendi kohdistuu sähköautokannan kasvattamiseen. Sähköistettyjä autoja ovat täyssähköautot sekä hybridisähköautot.

### 3.1 Täyssähkö

Täyssähköauton voimalinja koostuu sähkömoottorista ja akustosta, josta sähkömoottori saa tarvitsemansa energian. Sähkömoottori toimii jarrutus tilanteessa generaattorina, jolloin osa liike-energiasta saadaan ladattua takaisin akkuun. Tämä on merkittävä etu mekaaniseen voimalinjaan verrattuna, sillä mekaanisessa voimalinjassa ei ole mahdollisuutta tällaiselle jarrutusenergian talteenotolle. Sähköauton etuja ovat myös hyvä hyötysuhde, yksinkertainen voimalinja, päästöttömyys sekä hiljainen ja tasainen toiminta. (Ehsani et al. 2010 s. 105–122)

Täyssähköautolla on kuitenkin rajallisuutensa. Akkukapasiteetti tarjoaa vain rajallisen toimintasäteen ja lataaminen on hidasta nestemäisen polttoaineen tankkaamiseen verrattuna. Toisaalta suuri akkukapasiteetti olisi kallis, painava ja päivittäisessä ajossa siitä käytettäisiin vain pieni osa (Friedl et al. 2018). Pieni akkukapasiteetti kuitenkin aiheuttaa toimintasädeahdistusta ja rajoittaa sähköauton käyttömahdollisuuksia. Lisäksi keliolosuhteilla on merkittävä vaikutus sähköauton toimintasäteeseen.

### 3.2 Hybridi

Hybridiauto tarkoittaa kahdesta tai useammasta voimalinjasta koostuvaa autoa. Yleensä hybridiautossa voimalinjoja on vain kaksi, koska muuten rakenteesta tulee monimutkainen (Ehsani et al. 2010 s. 123–150). Sähköisen voimalinjan sisältävä hybridiauto on hybridisähköauto, mutta siitä käytetään yleisesti nimitystä hybridiauto. Tässäkin työssä termillä hybridiauto tarkoitetaan hybridisähköautoa.

Hybridiautossa pyritään hyödyntämään kummankin voimalinjan hyvät ominaisuudet ja vähentämään niiden heikkouksien vaikutusta. Jarrutusenergia saadaan otettua talteen kuten täyssähköautossa. Hybridiautossa ei kuitenkaan ole vastaavaa rajoitetta toimintasäteen suhteen kuin täyssähköautossa.

### 3.2.1 Hybridiautojen luokittelu

Hybridiautot voidaan jakaa kahteen eri pääluokkaan rakenteensa mukaan: sarjahybridi ja rinnakkaishybridi. Luokittelu tehdään energian virtauksen ja komponenttien välisten yhteyksien perusteella. (Ehsani et al. 2010 s. 123–150)

Rinnakkaishybridissä mekaaninen ja sähköinen voimalinja on kytketty vaihteistoon siten, että kumpaakin voimalinjaa, yhdessä tai erikseen, voidaan käyttää auton vetoakselien pyörittämiseen. Riippuen kokoonpanosta, sähkömoottori voi olla joko pelkästään avustava, tai se voi toimia myös ainoana voimanlähteenä polttomoottorin ollessa sammutettuna. Jos sähkömoottori on avustavassa roolissa, polttomoottoria käytetään pääasiallisena voimanlähteenä, mutta tilanne voi olla myös päinvastainen. (Ehsani et al. 2010 s. 123–150)

Sarjahybridissä polttomoottorilla ei ole mekaanista yhteyttä vaihteistoon, vaan pelkkä sähkömoottori liikuttaa autoa. Energian sähkömoottori saa akulta sekä tarvittaessa polttomoottorin pyörittämältä generaattorilta. Sarjahybridiauto on siis toiminnaltaan vastaava kuin täyssähköauto, mutta siinä on lisäksi latausgeneraattoria pyörittävä polttomoottori eli oma latausjärjestelmä aina mukana. (Ehsani et al. 2010 s. 123–150) Sarjahybrididiä voidaankin sanoa pidennetyn toimintamatkan sähköautoksi (engl. range extender).

### 3.2.2 Sarjahybridiauton suorituskyky

Sarjahybridiautossa polttomoottori lataa tarvittaessa akkua eikä sillä ole mekaanista yhteyttä vetäviin pyöriin. Tämä mahdollistaa polttomoottorin toiminnan millä tahansa pyörimisnopeudella ja tehoalueella riippumatta auton nopeudesta. Polttomoottori voi siis ladata akkua parhaalla mahdollisella hyötysuhdealueella. Latauskäytössä olevan polttomoottorin ei tarvitse olla toiminta-alueeltaan niin laaja kuin perinteisessä polttomoottoriautossa, joten myös päästöjen hallinta on helpompaa. (Ehsani et al. 2010 s. 123–150)

Heikkoutena voidaan pitää energian moninkertaista muuttamista muodosta toiseen. Polttomoottori muuttaa polttoaineen kemiallisen energian liike-energiaksi, joka pyörittää generaattoria, joka muuttaa pyörimisliikkeen sähköenergiaksi, joka muutetaan sähkömoottorissa takaisin pyörimisenergiaksi. Energian muuttamisessa muodosta toiseen tulee häviöitä, mikä laskee hyötysuhdetta. (Ehsani et al. 2010 s. 123–150) Sarjahybridiauton akkukapasiteetin on kuitenkin tarkoitus riittää päivittäiseen ajomatkaan ja latausmoottorin toimia vain varavirtalähteenä pidemmällä matkoilla, joten latausmoottori ei ole jatkuvasti toiminnassa. Sarjahybridiautossa ei myöskään tarvita perinteisen polttomoottoriauton ja rinnakkaishybridin tapaan monipykäläistä vaihteistoa, jolloin voimalinjasta saadaan yksinkertaisempi (Ehsani et al. 2010 s. 123–150).

Sarjahybridiauto soveltuu hyvin myös kylmiin olosuhteisiin. Toisin kuin täyssähköautossa, matkustustilan ja akuston lämmittämiseen ei tarvitse käyttää sähköä, koska polttomoottori tuottaa hukkalämpöä ladatessaan akustoa. Myöskään toimintamatkan alenema ei ole yhtä kriittistä kuin täyssähköautossa.

### 3.2.3 Kiertomäntämoottori sarjahybridikäytössä

Kiertomäntämoottorilla on useita ominaisuuksia, jotka tekevät siitä houkuttelevan vaihtoehdon sarjahybridiauton latausmoottoriksi. Näitä ominaisuuksia ovat erittäin pieni koko ja kevyt rakenne, hiljainen ja lähes tärinätön käynti, mahdollisuus halpaan tuotantoon sekä vedyn soveltuvuus polttoaineeksi. (Di Ilio et al. 2020) Seuraavaksi esitellään kaksi tutkimusta, joissa kiertomäntämoottoria verrataan muihin sarjahybridiautoon soveltuviin voimanlähteisiin.

Tutkimuksessa (Ribau et al. 2012) verrataan sarjahybridiautossa olevaa kiertomäntämoottoria perinteiseen nelitahtibensiinimoottoriin, Millerin sykliä hyödyntävään moottoriin sekä mikroturbiiniin. Moottoreiden eri massat on huomioitu lisäämällä kevyempiin versioihin akkukapasiteetin määrää, jotta kaikki versiot ovat yhtä painavia. Tutkimus on toteutettu simuloimalla hyödyntäen todellisia ajodatoja, joihin on lisätty korkean tehontarpeen tilanteita, kuten ylämäkiä. Tällä pyritään huomioimaan todellisessa ajamisessa ilmenevät poikkeukselliset tilanteet. Kiertomäntämoottori on vertailuissa olevista vaihtoehdoista kevyin, joten kiertomäntämoottorilla varustetun auton akkukapasiteetti on suurin. Millerin sykliä käyttävän moottorin hyötysuhde on vertailussa paras, mutta massaltaan se on kiertomäntämoottoria suurempi. Tutkimuksen perusteella kiertomäntämoottorilla varustetun version suorituskyky on suuremman akkukapasiteetin takia kaupunkiajossa paras, mutta pidemmällä ja paljon ajonaikaista akun lataamista vaativilla matkoilla Millerin syklillä toimiva versio on parempi. (Ribau et al. 2012)

Tutkimuksessa (Di Ilio et al. 2020) verrataan bensiini- ja vetykäyttöisellä kiertomäntämoottorilla varustettujen sarjahybridiautojen toimintasäteitä bensiinikäyttöisellä iskumäntämoottorilla varustettuun versioon. Moottoreiden eri massat on huomioitu lisäämällä kevyempiin versioihin akkukapasiteetin määrää, jotta kaikki versiot ovat yhtä painavia. Tutkimus on toteutettu simuloimalla UDDS-ajodataa (Urban Dynamometer Driving Schedule) käyttäen. UDDS vastaa kaupunkiajo-olosuhteita. Tuloksista havaitaan, että bensiinikäyttöisellä kiertomäntämoottorilla varustetulla versiolla päästään pidempi matka kuin iskumäntämoottorilla suuremman akkukapasiteetin takia. Vetykäyttöinen kiertomäntämoottori ei kuitenkaan pärjää tutkimuksessa vedyn huonon energiatihedden ja hankalan varastoitavuuden takia. (Di Ilio et al. 2020) Bensiinin ja vedyn seosta ei käsitellä tutkimuksessa.

### 3.2.4 Älykäs lataus

Sarjahybridiautossa tilanteessa, jossa akku on täysin tyhjä, kaikki auton toimintaan tarvittava energia saadaan latausmoottorilta. Tällaisessa tilanteessa latausmoottorin tehon on oltava yhtä suuri kuin auton sähkömoottorin tarvitseman hetkellisen tehon ja muihin auton toimintoihin vaadittavan tehon summa. Esimerkiksi kiihdytystilanteessa tehontarve on suuri, joten latausmoottori pitäisi mitoittaa maksimitehon mukaan, jotta teho ei lopu kesken missään tilanteessa. Tämä tarkoittaisi kuitenkin suurta, painavaa ja kallista latausmoottoria, jolloin sarjahybridin idea menisi pitkälti hukkaan. Ratkaisuna tähän on akkujen latauksen optimointi, jolla vältetään tilanne, jossa akku on täysin tyhjä ja tehoa tarvittaisiin runsaasti. (Friedl et al. 2018)

Yksinkertaisin ratkaisu edellä mainittuun ongelmaan on asettaa akulle tietty varaustaso, jolloin latausmoottori käynnistyy. Akku ei siis ole tyhjä latausmoottorin käynnistyessä, vaan akussa oleva energia mahdollistaa lyhytaikaiset tehopiikit. Tällöin latausmoottorilta vaadittava teho voi olla huomattavasti sähkömoottorin maksimitehoa pienempi. Latausmoottorin pitää kuitenkin tuottaa riittävästi tehoa moottoritienopeuden ylläpitämiseksi. (Friedl et al. 2018)

Kehittyneempi tapa akun lataamisen optimoimiseksi on niin sanottu älykäs lataus, joka mahdollistaa latausmoottorin entistä tehokkaamman hyödyntämisen. Älykäs lataus toimii siten, että kuljettaja kertoo autolle sijainnin, jonne hän aikoo ajaa, jolloin auto valitsee sopivan reitin ja laskee matkalle tarvittavan energiankulutuksen huomioiden ajonopeudet, korkeuserot, sääolosuhteet, muun liikenteen sekä kuljettajan tyypillisen ajotavan. Kun auto tietää etukäteen tarvittavan energiamäärän, on mahdollista optimoida akun lataaminen juuri kyseiselle matkalle sopivaksi. (Friedl et al. 2018) Tällaisella optimoinnilla on mahdollista käyttää hyvinkin pienitehoista latausmoottoria, koska akun latauksen voi tarvittaessa aloittaa pidemmällä matkoilla jo heti matkan alussa, sillä matkan kokonaisenergiankulutus on laskettu etukäteen.

## 3.3 Massan vaikutus energiankulutukseen

Autojen keskimääräinen massa on kasvanut sähköistymisen vaikutuksesta. Sähköautojen suuri akkukapasiteetti tekee niistä painavia ja hybridiauton monimutkaisempi voimalinja tuo lisäpainoa.

Tutkimuksessa (Turner et al. 2019) selvitetään massan vaikutusta BMW i3 REx sarjahybridiauton energiankulutukseen. Vertailukohtana alkuperäisen 647 cm<sup>3</sup>:n iskumäntämoottorin tilalle asetetaan AIE 225CS kiertomäntämoottori, joka on yksi markkinoiden

kehittyneimmistä kiertomäntämootoreista ja teholtaan lähes sama kuin verrattava moottori. Massaltaan kiertomäntämoottori on 30 kg kevyempi. Tutkimuksessa tehty simulointi osoittaa, että kyseinen massaero on niin pieni, ettei sillä ole merkittävää vaikutusta energiankulutukseen. Massan vähentäminen 5 % pienentää energiankulutusta noin 3 %. Kiertomäntämoottorilla on kuitenkin suurempi polttoaineenkulutus, joten sen hyötysuhdetta pitäisi parantaa 12 %, jotta polttoaineenkulutus olisi akkua ladattaessa sama kuin tutkimuksen alkuperäisellä moottorilla. (Turner et al. 2019)

## 4. KÄYTÄNNÖN TOTEUTUKSET

Kiertomäntämoottoria voimanlähteenään käyttäviä autoja on ollut jo pitkään. Ensimmäinen massatuotettu malli oli NSU Wankel Spider 1960-luvulla. Tämän jälkeen myös monet muut autovalmistajat, kuten Mazda, Citroën, Mercedes-Benz ja Chevrolet ovat valmistaneet kiertomäntämoottoriautoja. Kiertomäntämoottori ei kuitenkaan ole onnistunut vakiinnuttamaan asemaansa autoteollisuudessa ja Mazda lopetti vuonna 2012 viimeisenä autovalmistajana kiertomäntämoottoriautojen valmistamisen. (Schröder 2017)

Autojen sähköistyminen antaa kiertomäntämoottorille uusia mahdollisuuksia osana hybridisovelluksia, eikä kiertomäntämoottorien kehitystä ole lopetettu. Tässä luvussa tarkastellaan kiertomäntämoottoria latausmoottorinaan hyödyntävien sarjahybridiautojen käytännön toteutuksia.

### 4.1 Prototyypit

Useimmat kiertomäntämoottoria käyttävät sarjahybridiautot eivät ole päässeet massatuotantoon, vaan ovat jääneet prototyypeiksi. Tällaisista prototyypeistä esitellään seuraavaksi Audin, FEVin, Valmetin ja Mazdan versiot.

Audi julkaisi vuonna 2010 konseptimallin Audi A1 E-Tron, jossa on 12 kWh:n ajoakku ja latausmoottorina 254 cm<sup>3</sup>:n yksimäntäinen kiertomäntämoottori. Ajoakun kapasiteetti riittää 50 kilometrin ajomatkalle, jota voidaan pidentää 11 litran bensiinisäiliön avulla 250 kilometriin. Kyseinen malli on tarkoitettu kaupunkiautoksi ja painaa alle 1200 kg. Koeajojen perusteella kiertomäntämoottori on niin hiljainen, ettei sen ääni kuulu ajonaikana matkustamoon. Audi A1 E-Tronia valmistettiin yhteensä 100 kappaletta Audin ja Saksan hallituksen yhteistä testiohjelmaa varten. Testiohjelmassa tavalliset autoilijat ajoivat näillä autoilla yhteensä 1,4 miljoonaa kilometriä. Testiohjelman aikana autojen kiertomäntämoottori oli käynnissä vain 13 % koko ajoajasta eli valtaosa ajosta saatiin toteutettua sähköverkosta ladatulla sähköllä. Testiohjelma päättyi vuonna 2016 ja paljasti puutteita Saksan sähköautojen latausverkostosta. Konseptimallia pidettiin toimivana, mutta Audi on kuitenkin keskittynyt täyssähköisten mallien kehittämiseen. (Helander 2023)

Vuonna 2010 FEV esitteli Fiat 500-malliin perustuvan konseptimallin FEV LiiON. Akku, jonka kapasiteetti on 12 kWh, on asetettu auton pohjaan ja kiertomäntämoottori, generaattori sekä 12 litran bensiinisäiliö on mahdutettu alkuperäisen bensiinisäiliön paikalle. Testiaijat antoivat kiitosta erityisesti ennennäkemättömän hiljaisesta ja värinättömästä ajosta. (Green Car Congress 2010)



Valmet esitteli vuonna 2013 ensimmäisen sähköautokonseptinsa, jonka voimansiirtoon kuuluu Wankel SuperTecin kehittämä latausmoottorina toimiva kiertomäntämoottori. 1270 kg painavalla autolla pääsee 17,5 kWh:n akulla kertalatauksella 90 kilometriä, minkä jälkeen matkaa voidaan jatkaa 30 litran polttoainesäiliön avulla. Polttoaineeksi käy sekä diesel että bensiini, mutta kiertomäntämoottori voidaan muuttaa käyttämään myös maakaasua tai vetyä. Kiertomäntämoottoria kuvaillaan hiljaiseksi, kevyeksi, värinättömäksi ja pieneksi. Apulaitteineen se painaa vain 35 kg ja on tilavuudeltaan 350 cm<sup>3</sup> ja teholtaan 18 kW. (Tuulilasi 2013)

Mazdan ensimmäinen kiertomäntämoottoria hyödyntävä sarjahybridiauto on vuonna 2013 julkaistu konseptimalli Mazda 2 EV. Yksimäntäinen moottori on tilavuudeltaan 330 cm<sup>3</sup> ja tuottaa tehoa 28 kW. Kiertomäntämoottori on sijoitettu tavaratilan lattian alle. Testiajossa moottorin ääni on mahdollista kuulla hitaissa nopeuksissa erityisesti takapenkillä istuttaessa, mutta ääni on silti hiljainen. Mazda uskoo konseptimallinsa kaltaisilla kiertomäntämoottoria hyödyntävillä sarjahybridiautoilla olevan tulevaisuudessa valtava potentiaali. (Spinks 2013)

## 4.2 Tuotantoversiot

Toistaiseksi ainoa kiertomäntämoottoria hyödyntävä sarjahybridiauto, joka on päässyt sarjatuotantoon ja myyntiin, on Mazda MX-30 e-Skyactiv R-EV. Se julkaistiin 13.1.2023, ja toimitukset alkavat kesällä 2023, joten kuluttajien käyttökokemuksia ei ole vielä saatavilla.

Mazda kertoo mallin toimintamatkaksi 17,8 kilowattitunnin akulla yhdellä latauksella 85 kilometriä, ja toimintamatkaa voidaan jatkaa 50 litran bensiinisäiliön avulla yli 600 kilometriä. Latausmoottorina toimii yksimäntäinen 830 cm<sup>3</sup> kiertomäntämoottori, jonka teho on 55 kW. Yhdistetty kulutus on 1,0 L/100 km, mikä tarkoittaa hiilidioksidipäästöinä 21 g/km. Mazda perustelee verrattain pientä ajoakun kokoa tyypillisellä käyttäjän päivittäisellä ajomatalla. Suuri ajoakku olisi kallis, painava, veisi paljon tilaa ja olisi suurimman osan ajasta turha. Latausmoottori kuitenkin mahdollistaa myös pidemmät yhtenäiset ajomatkat ja poistaa toimintasädeahdistusta. Myös auton massa on pysynyt kurissa kiertomäntämoottorin keveyden ja pienen ajoakun takia. (Mazda 2013)

## 5. YHTEENVETO

Euroopan unionin päästötavoitteiden takia liikenteen päästöjä on vähennettävä. Päästöjä pyritään vähentämään ensisijaisesti sähköistämällä autokantaa. Täyssähköisten autojen lisäksi hybridautojen määrä on suuressa kasvussa. Sähköautojen yleistymistä hidastavat kuitenkin kallis hankintahinta, latausverkoston rajallisuus sekä käyttäjillä esiintyvä toimintasädeahdistus. Sarjahybridauto on ratkaisu kyseiselle ongelmalle, sillä siinä on yhdistetty sähköauton sekä polttomootoriauton parhaat puolet.

Kiertomäntämoottori on hyvien ominaisuuksiensa takia potentiaalinen vaihtoehto sarjahybridauton latausmoottoriksi. Kiertomäntämoottori on hiljainen, lähes värinätön, pieni, kevyt, rakenteeltaan yksinkertainen ja pystyy käyttämään myös hiilineutraaleita polttoaineita. Aihe on hyvin ajankohtainen ja kiertomäntämoottoriin liittyen tehdään paljon uusia tutkimuksia. Kiertomäntämoottoria hyödyntävistä sarjahybridautoista on tehty prototyyppejä ja Mazda julkaisi hiljattain myös tuotantoversion kyseisellä tekniikalla toimivasta autosta. Kiertomäntämoottorien mahdollisuuksiin sarjahybridautossa siis uskotaan autoteollisuudessa.

Työn tavoitteena oli selvittää kiertomäntämoottorin nykyinen kehitystilanne sekä mahdollisuus käyttää kiertomäntämoottoria henkilöauton sähköisen voimalinjan latausmoottorina. Aluksi esiteltiin syitä kyseisen tekniikan tarpeelle sekä onnistumismahdollisuuksille. Tämän jälkeen perehdyttiin kiertomäntämoottorin toimintaan, hyötyihin ja ongelma-kohtiin, ja verrattiin niitä iskumäntämoottoriin. Autojen sähköistymisen yhteydessä esiteltiin myös kaksi simuloimalla toteutettua tutkimusta, jossa sarjahybridauton latausmoottorityyppejä vertaillaan. Lopuksi perehdyttiin käytännön toteutuksiin.

Työssä havaittiin kiertomäntämoottorin olevan potentiaalinen vaihtoehto iskumäntämoottorille sarjahybridikäytössä. Haasteena ovat kiertomäntämoottorin palotilan kapea muoto sekä vuodot ja niistä johtuva iskumäntämoottoria matalampi hyötysuhde. Näitä ongelmakohtia on kuitenkin pystytty parantamaan tuotekehityksessä. Keskeisimpinä etuina ovat pieni koko, keveys, hiljaisuus sekä yksinkertainen rakenne, joka voisi mahdollistaa iskumäntämoottoria halvemmän tuotannon pienemmän komponenttimäärän takia.

Merkittävä osa uusista kiertomäntämoottoreita koskevista tutkimuksista keskittyy vedyn hyödyntämiseen palamisessa. Puhtaan vedyn käyttäminen polttoaineena on kuitenkin haasteellista vedyn huonon energiatiheyden sekä haastavan varastoimisen takia. Vedyn

ja bensiinin seoksen käyttäminen polttoaineena vaikuttaakin tällä hetkellä käyttökelpoisemmalta vaihtoehdolta. Vety parantaa polttoaineseoksen palamista, jolloin moottorin hyötysuhteesta saadaan parempi. 10 prosentin vetyosuudella moottorin hyötysuhde on 28 % parempi pelkkään bensiiniin verrattuna, ja pienemmilläkin vetyosuuksilla hyötysuhteen parannus on merkittävä. Lisäksi vedyn ja bensiinin seoksella pakokaasupäästöt ovat NO<sub>x</sub>-päästöjä lukuun ottamatta pienemmät. Yli-ilmamäärää lisäämällä NO<sub>x</sub>-päästöt saadaan hyvinkin mataliksi, mutta tällöin joudutaan tasapainottelemaan hyötysuhteen ja päästöjen välillä.

Toinen merkittävä tutkimuskohde on sarjahybridiautojen älykäs lataus, joka mahdollistaa pienitehoisen latausmoottorin käyttämisen. Sarjahybridiauto ei tarvitse yhtä suurta akkukapasiteettia, kuin täyssähköauto, mutta silti suurin osa ajosta tapahtuu verkkovirralla ladatulla sähköllä. Käyttömahdollisuuksiltaan sarjahybridiauto on kuitenkin täyssähköautoa joustavampi. Älykäs lataus optimoisi entisestään akun ja latausmoottorin yhteistyötä, jolloin suuren akun kuljettaminen täyssähköauton tapaan tuntuisi tuhlaukselta.

Autojen tulevaisuuden voimalinjaa ei pystytä varmuudella ennustamaan, mutta sarjahybridiauto on kuitenkin merkittävä haastaja täyssähköautolle. Kiertomäntämoottori on yksi vaihtoehto sarjahybridiauton latausmoottoriksi ja sen hyvät ominaisuudet tekevät siitä houkuttelevan vaihtoehdon.

# LÄHTEET

- [1] Amrouche, F., Erickson, P., Park, J., & Varnhagen, S. (2014). An experimental investigation of hydrogen-enriched gasoline in a Wankel rotary engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(16), 8525–8534. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.172>
- [2] Amrouche, F., Erickson, P. A., Park, J. W., & Varnhagen, S. (2016). An experimental evaluation of ultra-lean burn capability of a hydrogen-enriched ethanol-fuelled Wankel engine at full load condition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(42), 19231–19242. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.267>
- [3] Di Ilio, G., Bella, G., & Jannelli, E. (2020). Performance Evaluation of Extended-Range Electric Vehicles Equipped with Hydrogen-Fueled Rotary Engine. <https://doi.org/10.4271/2020-24-0011>
- [4] Ehsani, M., Gao, Y., & Emadi, A. (2010). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420054002>
- [5] Euroopan ympäristökeskus. Liikenne. Verkkosivu. Päivitetty 5.3.2020. Saatavissa (viitattu 27.1.2023): <https://www.eea.europa.eu/fi/themes/transport/intro>
- [6] Fan, B., Pan, J., Yang, W., Liu, Y., Bani, S., & Chen, W. (2017). Numerical investigation of the effect of injection strategy on mixture formation and combustion process in a port injection natural gas rotary engine. *Energy Conversion and Management*, 133, 511–523. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.070>
- [7] Friedl, H., Fraidl, G., Hubmann, C., Sorger, H., Teuschl, G., & Martin, C. (2018). Range Extender Technology for Electric Vehicles. 2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT), 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICEVT.2018.8628391>
- [8] Green Car Congress. (2010). FEV LiION Vehicle With Wankel Range Extender at the Vienna Motor Symposium. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): <https://www.greencarcongress.com/2010/05/fev-20100512.html>
- [9] Helander, B. (2023). NSU-wankelin jalanjäljissä – Audi A1 e-tron concept noudatti jo vuonna 2010 Mazdan R-EV:n perusajatusta. Moottori. Saatavissa (viitattu 14.3.2023): <https://moottori.fi/ajoneuvot/jutut/nsu-wankelin-jalanjaljissa-audi-a1-e-tron-concept-noudatti-jo-vuonna-2010-mazdan-r-evn-perusajatusta/>
- [10] Loktionov, E. Y., & Pasechnikov, N. A. (2021). First tests of laser ignition in Wankel engine. *Journal of Physics. Conference Series*, 1787(1), 12031–. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1787/1/012031>
- [11] Mazda. (2023). Mazda MX-30 R-EV – uudenlainen, ainutlaatuinen lataushybridi. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): <https://www.mazda.fi/uutiset/uutiset/mx-30-r-ev>

- [12] Meng, H., Ji, C., Wang, S., & Yang, J. (2023). A review: Centurial progress and development of Wankel rotary engine. *Fuel (Guildford)*, 335, 127043–. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127043>
- [13] Motiva. (2020). Vety. Saatavissa (viitattu 24.4.2023): [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava\\_liikenne\\_ja\\_liikkuminen/valitse\\_auto\\_viisaasti/energialah-teet/vety](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/energialah-teet/vety)
- [14] Ozcanli, M., Bas, O., Akar, M. A., Yildizhan, S., & Serin, H. (2018). Recent studies on hydrogen usage in Wankel SI engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(38), 18037–18045. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.202>
- [15] Ribau, J., Silva, C., Brito, F. P., & Martins, J. (2012). Analysis of four-stroke, Wankel, and microturbine based range extenders for electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 58, 120–133. <https://doi.org/10.1016/j.encon-man.2012.01.011>
- [16] Schröder, M. (2017). A brief history of the rotary-engine and its road-going applications. *Carthrottle*. Saatavissa (viitattu 14.3.2023): <https://www.carthrottle.com/post/w3roj27/>
- [17] Spinks, J. (2013). 2013 Mazda 2 EV Rotary Range Extender review. *Drive*. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): <https://www.drive.com.au/reviews/mazda-2-ev-rotary-range-extender-review-quick-drive/>
- [18] Turner, M., Turner, J., & Vorraro, G. (2019). Mass Benefit Analysis of 4-Stroke and Wankel Range Extenders in an Electric Vehicle over a Defined Drive Cycle with Respect to Vehicle Range and Fuel Consumption. <https://doi.org/10.4271/2019-01-1282>
- [19] Tuulilasi. (2013). Valmet Automotive esitteli hybridikonseptin. Saatavissa (viitattu 14.3.2023): <https://www.apu.fi/artikkelit/valmet-automotive-esitteli-hybridikonseptin>
- [20] Wu, W., Lin, Y.-R., & Chow, L. (2014). A Heat Pipe Assisted Air-Cooled Rotary Wankel Engine for Improved Durability, Power and Efficiency. <https://doi.org/10.4271/2014-01-2160>