

Taavi Kasurinen

AUTOJEN PAKOKAASUAHTIMIEN SÄHKÖISTYMINEN

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Taavi Kasurinen: Autojen pakokaasuahtimien sähköistyminen
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Toukokuu 2022

Päästönormien kiristyessä tarvitaan uusia teknologioita henkilöautojen polttomoottoreiden hyötysuhteen ja polttoainetaloudellisuuden parantamiseksi ja eräänä ratkaisuna tähän voidaan nähdä sähköistetyt pakokaasuahdit. Tämän kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on muodostaa lukijalle selkeä katsaus erityyppisiin sähköistettyihin ahtimiin. Työ etenee konventionaalisen ahtimen esittelystä sähköistettyjen ahtimien erilaisiin variaatioihin, niiden etuihin ja ongelmakohtiin, käytännön toteutuksiin ja lopuksi tulevaisuudennäkymiin.

Eryyppisiä ratkaisuita on neljä kappaletta: sähköisesti avustettu pakokaasuahdin, sähköisesti jaettu ahdin, sähköinen kompressori ja sähköinen kompressori sarjaan kytkettynä. Työssä havaitaan, että ratkaisujen keskeisimpinä etuina ovat turboviiveen vähentäminen, moottorin väännön lisäys ja välillisesti tapahtuva polttoaineenkulutuksen pieneneminen. Erilaisten ongelmien havaitaan puolestaan koskevan ratkaisujen sähköisiä komponentteja, sillä sekä sähkömoottorilta että virtalähteeltä vaaditaan runsaasti ominaisuuksia: virtalähteen pitää kyetä purkamaan nopeasti suuria virtoja ja sähkömoottorilta vaaditaan erittäin suuria pyörimisnopeuksia. Muita ongelmia ovat esimerkiksi systeemin inertian kasvu ja sähköenergian siirrossa tapahtuvat häviöt. Tutkimukset osoittavat, että perinteiseen ahtimeen verrattuna sähköiset pakokaasuahdit parantavat moottorin vastetta alakierrosalueella valitusta teknologiasta riippuen 20 – 40 prosenttia, mahdollistavat turboviiveen pienenemisen useilla sekunneilla ja kasvattavat moottorin tehoa jopa kymmeniä prosentteja, mikäli järjestelmässä käytetään riittävän tehokasta sähkömoottoria ja jännitelähdettä.

Työssä havaitaan, että erilaisista eduista huolimatta sähköisten pakokaasuahtimien tulevaisuus on vielä epävarma. Tulevaisuus on osittain sidoksissa polttomoottoreiden tulevaisuuteen ja ratkaisujen takaisinmaksuajaksi nykyisillä polttoainehinnoilla jää useita kymmeniä vuosia. Sekä Garret että Borgwarner ovat esitelleet omat variaationsa ratkaisuista ja tunnetut autovalmistajat, kuten Audi ja Mercedes Benz ovat ottaneet ratkaisuja kokeiluun muutamien automallien osalta, mutta teknologia ei ole vielä laajentunut kiinteäksi osaksi henkilöautoilua. Sähköisten ahtimien hinnan pieneneminen ja etenkin akkuteknologian ja suurnopeusmoottoreiden kehitys voi toisaalta mahdollistaa sähköisten ahtimien laajamittaisemman käytön tulevaisuudessa.

Avainsanat: sähköistetty pakokaasuahdin, sähköinen pakokaasuahdin, turboahdin, sähköisesti avustettu pakokaasuahdin, sähköisesti jaettu ahdin, sähköinen kompressori, sähköinen kompressori sarjaan kytkettynä

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Taavi Kasurinen: Electric turbocharging of cars
Bachelor's Thesis
Tampere University
Mechanical Engineering
May 2022

This thesis is a literature review of electric turbocharging of cars. The objective of the thesis was to familiarize the reader with different variations of electric turbochargers and their pros and cons, performance, applications and future.

Keywords: electric turbocharging, electrically assisted turbocharger, electrically split turbocharger, turbocharger with an additional electrically driven compressor, electric compressor

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

LYHENTEET JA MERKINNÄT

EAT	engl. Electrically Assisted Turbocharger, sähköisesti avustettu pakokaasuahdin
EST	engl. Electrically Split Turbocharger, sähköisesti jaettu pakokaasuahdin
TEDC	engl. Turbocharger With an Additional Electrically Driven Compressor, sähköinen kompressori sarjaan kytkettynä
EC	engl. Electric Compressor, sähköinen kompressori

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. PAKOKAASUAHTIMEN TOIMINTA	3
2.1 Konventionaalinen pakokaasuahdin	3
2.1.1 Turbiini	4
2.1.2 Kompressori	5
2.1.3 Keskiö	5
2.1.4 Hukkaportti	6
2.2 Sähköistetty pakokaasuahdin	6
2.2.1 Sähköisesti avustettu pakokaasuahdin	7
2.2.2 Sähköisesti jaettu pakokaasuahdin	8
2.2.3 Sähköinen kompressori	9
2.2.4 Sähköinen kompressori sarjaan kytkettynä	9
3. SÄHKÖISTETYN PAKOKAASUAHTIMEN SUORITUSKYKY	11
3.1 Hyödyt	11
3.2 Ongelmakohdat	13
3.3 Mittausdata	14
3.4 Taloudellinen kannattavuus	16
4. KÄYTÄNNÖN TOTEUTUKSET	18
4.1 Erityyppiset sähköiset pakokaasuahdit käytännössä	18
4.2 Tulevaisuudennäkymät	19
5. YHTEENVETO	22
LÄHTEET	24

1. JOHDANTO

Pakokaasuahtimien eli tunnetummin turbojen historia yltää yli sadan vuoden päähän. Vuonna 1905 sveitsiläinen insinööri Alfred Büchi patentoi turboahtimena tunnetun teknologian, jonka avulla ottomoottorin hyötysuhde parani, polttoaineen kulutus väheni ja tehontuotto kasvoi (ABB). Ahtimet kehittyivät aksiaalisista radiaalisiksi osana lentokone-teollisuuden innovaatioita 1930-luvulla ja vuoteen 1960 mennessä ne saavuttivat auto-teollisuuden (Cummins).

Ensimmäisenä sarjatuotantoon päätyneenä pakokaasuahdettuna automallina voidaan pitää Oldsmobilen Jetfire –autoa vuodelta 1962, mitä valmistettiin noin 4000 kappaletta. Vähäinen valmistusmäärä johtui heikosta luotettavuudesta ja muita malleja suuremmasta hinnasta. Merkittävimpänä pakokaasuahdettujen autojen kehitysvaiheena nähdään Porsche 911 Turbo –mallin julkaisu vuonna 1974, sillä se oli aikansa nopein sarjatuotantoauto ja todisti aiemmin kömpelönä ja kalliina tunnetun pakokaasuahtimen potentiaalin. Suomalaisille tunnettu Saab 99 Turbo julkaistiin vain neljä vuotta myöhemmin. (Ashdown 2018)

Pakokaasuahtimet muuttivat käsityksen siitä, että moottorin tehon kasvatus johtaisi automaattisesti huonompaan hyötysuhteeseen ja polttoainetaloudellisuuteen. Ahtimen avulla voidaan hyödyntää osa hukkaan menevästä pakokaasujen energiasta ja parantaa siten moottorin termodynaamista hyötysuhdetta. Kiristyvät päästönormit ja tavoitteet entistä pienemmästä polttoainekulutuksesta ovatkin johtaneet pakokaasuahtimien yleisyyteen osana ottomoottoreita. (Woonkul et al. 2017, s. 1)

Ottomoottoreiden kehityksestä ja pakokaasuahtamisen tarjoamista eduista huolimatta merkittävä osa polttoaineen energiasta hukataan lämpönä. Hukattu energia johtaa puolestaan suurempiin päästöihin ja kuluttaa rajallisia fossiilisten polttoaineiden resursseja. (Alshammari et al. 2019, s. 1) EU:n alueella 12 prosenttia hiilidioksidipäästöistä on peräisin henkilöautoista sekä kevytpakettiautoista ja vuoteen 2030 mennessä päästöjä pyritään vähentämään 37,5 prosentilla (Euroopan komissio).

Merkittävimpänä keinona päästöjen vähentämiseksi autovalmistajat näkevät moottoreiden sylinteritilavuuksien pienentämisen (Alshammari et al. 2019, s. 1). Sylinteritilavuuden pienentämisestä aiheutuva moottorin tehon menetys pyritään puolestaan välttämään ahtamalla moottori pakokaasu- tai remmiahtimella tai joissain tapauksissa niiden yhdistelmällä. Perinteisen pakokaasuahtimen mitoitus on sen ominaisuuksiensa vuoksi kuitenkin kompromissi huipputehon ja moottorin hitaille pyörimisnopeuksille saatavan

väännön välillä, mikä aiheuttaa ongelmallisena pidettävää turboviivettä (Brown & Watson 2018, s. 2).

Perinteisen ahtimen ongelmien vuoksi autovalmistajat pyrkivät löytämään uusia ratkaisuja vastatakseen kilpailuun ja eräs tällaisista ratkaisuista on pakokaasuahtimen sähköistäminen. Pyörittämällä turboahtimen kompressoria sähköisesti turboviive vältetään ja samalla ahtimen käyttöalueen parantuessa moottorin tehontuotto ja hyötysuhde paranevat. Tämän kaltainen hybridisaatio perinteisen ottomoottorin ja sähkömoottorin kanssa voi olla avain siirtymään kohti hiilineutraalimpaa maapalloa.

Tässä työssä tutkimusongelmana on selvittää, onko pakokaasuahtimien sähköistäminen toimiva menetelmä moottorin tehon, käyttöalueen ja polttoainetaloudellisuuden parantamiseksi. Ongelmaan perehdytään seuraavien tutkimuskysymyksien avulla: mitä hyötyjä ja haittoja ratkaisusta on, mitkä ovat todelliset suorituskykyarvot tavalliseen turboahtimeen verrattuna, millaisia käytännön sovelluksia sähköisistä ahtimesta on jo käytössä ja mitkä ovat sen tulevaisuudennäkymät.

Tämä työ rajataan koskemaan ainoastaan autoiluun liittyviin sovelluksiin, joten esimerkiksi laivaliikenteessä käytettyihin ratkaisuihin ei perehdytä. Työssä ei myöskään tutustuta muihin kuin turboahtamiseen liittyviin sähköisiin tehonlisäys menetelmiin, joten erilaiset ottomoottorin korvaavat ratkaisut jäävät työn tarkastelukentän ulkopuolelle. Tarkastelu rajataan lisäksi koskemaan pakokaasuahtimien sähköistymistä ja mekaaniset ratkaisut, kuten remmiahtimet suljetaan tutkimuksen ulkopuolelle.

Tässä työssä tutkimusmenetelmänä käytetään kuvailevaa kirjallisuuskatsausta. Aiheeseen perehdytään teoreettisesta näkökulmasta käyttäen aihepiiriin sopivaa tieteellistä kirjallisuutta. Työssä edetään pakokaasuahtamisen perusteista ahtimien sähköistymiseen ja lopuksi syväluotaavampaan tarkasteluun erityyppisten ratkaisujen eduista ja haittapuolista sekä käytännön sovelluksista.

2. PAKOKAASUAHTIMEN TOIMINTA

Pakokaasuahtimella tapahtuva tehonlisäys on prosessi, joka koostuu useasta eri vaiheesta. Polttoaineen palaessa syntyvien pakokaasujen energia hyödynnetään lisäämällä sen avulla palamisprosessiin syötettävää ilmamäärää ja ilmamäärän teoreettinen vaikutus moottorin tuottamaan tehoon P saadaan puolestaan seuraavasta yhtälöstä:

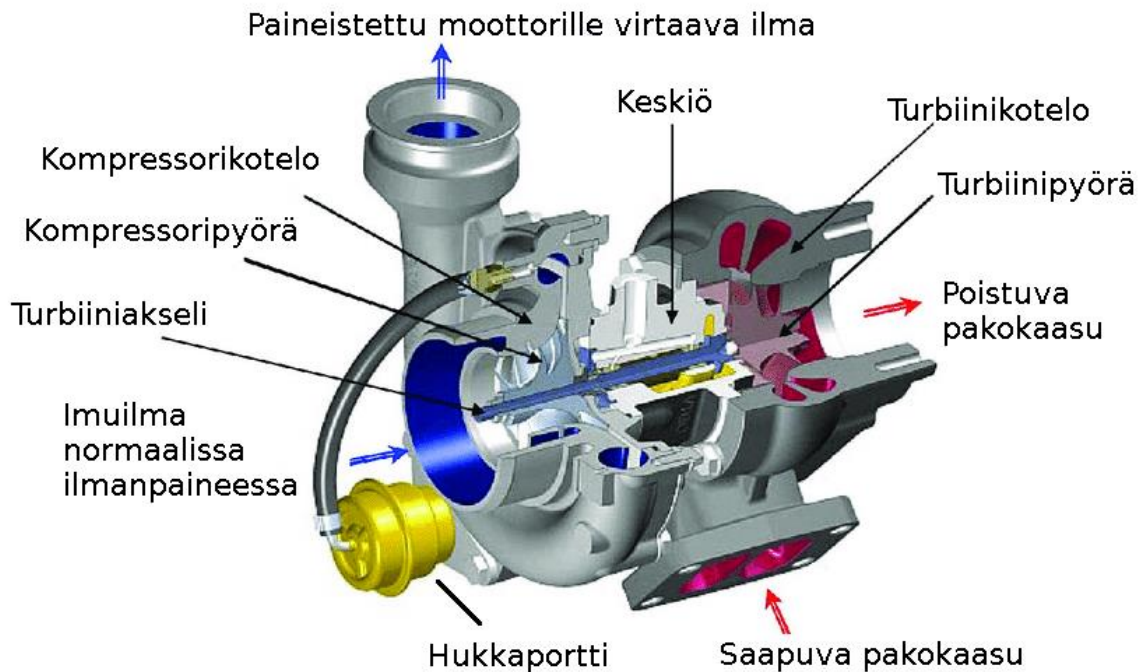
$$P = \frac{\eta_f m_a N Q_{HV} \left(\frac{F}{A}\right)}{n_R},$$

missä η_f on moottorin termodynaaminen hyötysuhde, m_a on prosessissa palavan hapen massa, N on moottorin kampiakselin pyörimisnopeus, Q_{HV} on polttoaineen lämpöarvo, (F/A) on hapen ja polttoaineen suhde ja n_R on kampiakselin pyörimien kierrosten lukumäärä työtahtia kohden. (Heywood 2018, luku 2)

Yhtälöstä havaitaan, että kasvattamalla palamisprosessin hapen määrää voidaan moottoritehoa lisätä. Määrän lisäys puolestaan onnistuu kasvattamalla imusarjassa vallitsevaa ilmanpainetta ja sopivana työkaluna tähän on pakokaasuahdin.

2.1 Konventionaalinen pakokaasuahdin

Konventionaalinen pakokaasuahdin koostuu turbiinista, kompressorista, niitä yhdistävästä keskiöstä ja hukkaportista. Tämän tarkastelun ulkopuolelle jäävät monimutkaisemmat etenkin dieselmootoreissa käytetyt VNT-ahtimet ja erilaiset sarja-ahtamisen muodot. Rakenne on eritelty selkeästi alla olevassa kuvassa 1.



Kuva 1. Pakokaasuahtimen rakenne (Mukaiillen Heinrich 2016, s. 61)

2.1.1 Turbiini

Pakokaasuahtamisen ensimmäisessä vaiheessa palamisprosessissa syntyneet pakokaasut saapuvat ahtimen turbiinikoteloon. Pakokaasujen lämpötila on hyvin korkea, joten turbiinikotelo on tyypillisesti valmistettu valuraudasta tai teräksestä. Turbiinikotelossa pakokaasu pyörittää turbiinipyörän leveintä osaa eli ottopäätä ja lopuksi poistuu pyörän kapeasta osasta eli jättöpäästä pakoputkistoon. Turbiinipyörä on valmistettu puolestaan korkeita lämpötiloja kestävästä seoksesta, kuten Inconelistä. (Import tuner 2011)

Turbiinikotelon eli toiselta nimeltään pakopesän mitoitus vaikuttaa merkittävästi ahtimen suorituskykyyn. Pienempää pakopesää käytettäessä korkeampi pakopaine mahdollistaa pienemmän turboviiveen, mutta toisaalta rajoittaa huippuvirtausta pakopaineen kasvaessa. Suurempi pakopesä puolestaan mahdollistaa paremman virtauksen, mutta suuren turbiinisiiven vuoksi turboviive voi heikentää moottorin käytettävyyttä. Turbiinisiiven inertiaa voidaan toki minimoida valmistamalla se keraamisista teräksen sijaan turboviiveen minimoimiseksi (Nice 2021).

2.1.2 Kompressor

Turbiinipyörä pyörittää turbiiniakselia, joka välittää pyörimisenergian kompressoripyörälle. Kompressorikotelossa normaali-ilmanpaineinen ilma imetään sisään kompressoripyörän ottopäästä, puristetaan korkeapaineeseen ja syötetään kohti moottoria ahtoputkiston kautta. (Import Tuner 2011) Koska kompressorissa virtaava ilma on viileämpää kuin turbiinipuolella, ei kompressorikotelolla ole ahtimen turbiinia vastaavia lämpötilavaatimuksia. Kompressorikotelo onkin valmistettu tyyppillisesti alumiinista (Import Tuner 2011).

Kompressorikotelossa luotu ahtopaine on usein moninkertainen ympäristössä vallitsevaan ilmanpaineeseen verrattuna. Suuren paineen tuottaakseen kompressorin pyörimisnopeus on noin 30-kertainen moottorin pyörimisnopeuteen verrattuna eli jopa 150 tuhatta kierrosta minuutissa (Turbotekniikka). Ilman puristaminen suureen paineeseen aiheuttaa myös sen lämpötilan kasvua, joten sitä jäähdytetään ennen moottorin imusarjaa välijäähdyttimiksi kutsutulla komponentilla.

Pakokaasuahntimen optimaalisimman toiminnan mahdollistamiseksi kompressorin täytyy mitoittaa oikein. Mitoittamiseen vaikuttavat esimerkiksi moottorin iskutilavuus ja tavoiteltu ahtopaine. Kun tunnetaan kompressorin painesuhde ja moottorin tarvitsema ilmamäärä massavirtana, voidaan mitoituksessa käyttää apuna ahdinvalmistajien tarjoamia kompressorikarttoja (Rantanen 2014, s. 17).

2.1.3 Keskiö

Kompressorin ja turbiini liitetään toisiinsa turboahntimen keskiön avulla, joka tukee turbiiniakselin laakereiden varaan. Laakerityyppinä voidaan käyttää liukulaakeria tai kuulalaakeria, joista jälkimmäinen on yleistynyt ominaisuuksiensa vuoksi. (Import Tuner, 2011) Liukulaakerissa ohut öljykerros mahdollistaa akselin liukumisen laakeripintaa vasten, kun taas kuulalaakerissa liukuminen tapahtuu laakerin sisä- ja ulkokehän välisien kuulien avulla. Kuulalaakerin etuna liukulaakeriin verrattuna on pienempi kitka laakeroitavien pintojen välillä sekä kyky kantaa aksiaalista kuormaa. Heikkoutena on puolestaan monimutkaisempi rakenne. (Lehtilä 2017, s. 6, 26)

Turbiiniakselin nopean pyörimisnopeuden ja ahtimen korkean käyttölämpötilan vuoksi keskiön öljyvoitelu on varmistettu liittämällä se moottorin voitelujärjestelmään. Öljyn riittävä tulopaine, öljyn laatu ja myöskin sen vapaa paluu takaisin moottoriin ovat oleellisia ahtimen käyttöänsä kannalta. Lisäksi liukulaakeriahtimissa keskiö ja laakerit jäähdytetään yleensä ainoastaan moottoriöljyn avulla.

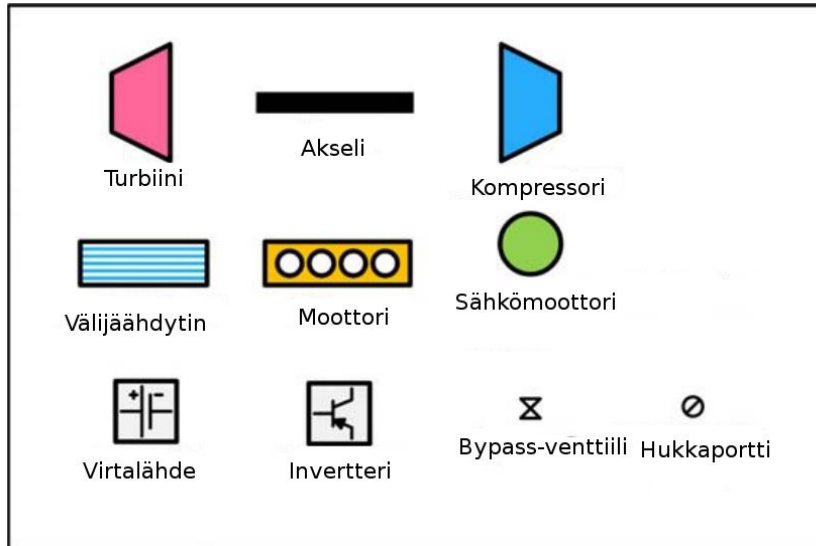
2.1.4 Hukkaportti

Hukkaportti on venttiili, joka mahdollistaa pakokaasun kierrättämisen ahtimen turbiinisiiv-vekkeiden ohi suoraan pakoputkistoon. Hukkaportin avulla ahtopaineen säätö on mahdollista. (Nice 2000) Ilman hukkaporttia pakokaasuahtimen tuottama ahtopaine riippuu ainoastaan moottorin polttoaineensyötöstä ja ahtimen kompressorin sekä turbiinin mitoitusesta. Vääränlainen mitoitus voi johtaa turbiinisiiven liialliseen pyörimisnopeuteen, moottorin ominaisuudet ylittävään ahtopaineeseen ja moottorivaurioon.

Kiinteä hukkaportti on kiinnitetty ahtimen pakopesään läpän avulla, jota ohjataan painekellolla. Ahtopaineen saavuttaessa halutun tason painekello aukaisee läpän ja osa pakokaasuista virtaa turbiinisiivekkeen ohi vakioiden sen pyörimisnopeuden ja ahtopaineen. (Pakarinen, 2018) Myös pakosarjaan kiinnitettyä ulkoista hukkaporttia voidaan käyttää ja hukkaportin ohjaus voidaan lisäksi toteuttaa sähköisesti moottorinohjainta käyttäen mahdollistaen tarkemman ahtopaineen säädön.

2.2 Sähköistetty pakokaasuahdin

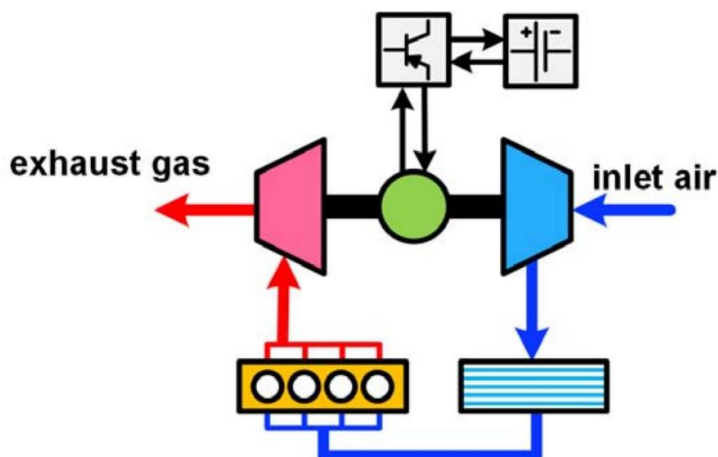
Sähköistetty pakokaasuahdin on toiminnaltaan konventionaalista ahdinta vastaava, mutta se sisältää kompressorin, turbiinin ja keskiön lisäksi komponentit ahtimen sähköistä toimintaa varten: sähkömoottorin ja virtalähteen. Erilaisten komponenttien sijoittelu toistensa suhteen riippuu ahtimen tyypistä, joita ovat EAT (Electrically Assisted Turbocharger), EST (Electrically Split Turbocharger) ja TEDC (Turbocharger With an Additional Electrically Driven Compressor). Edeltävistä poikkeavana variaationa on myös täysin sähköinen EC (Electric Compressor), joka on käytännössä irrallinen sähköinen kompressori. (Woongkul et al. 2017, s. 4) Tässä luvussa käytetyissä kuvissa esiintyvät symbolit on esitelty alla olevassa kuvassa.



Kuva 2. Myöhemmin työssä käytettävät symbolit (Mukaillen Woongkul et al. 2017, s. 4)

2.2.1 Sähköisesti avustettu pakokaasuahdin

Sähköisesti avustetussa pakokaasuahtimessa eli EAT:ssa sähkömoottori on kytketty ahtimen turbiinin ja kompressorin välille alla olevan kuvan 3 mukaisesti. Turbiinin pyörimisnopeuden ollessa hidas sähkömoottori käyttää ulkoista virtalähdettä ja pyörittää turbiinia mahdollistaen ahtimen nopeamman reagoinnin moottorin kuorman muutoksiin. (Woongkul et al. 2017, s. 4) Käytännössä tämä tarkoittaa ahtopaineen nopeampaa kasvua ja moottorin suorituskyvyn lisäämistä sen hitaille pyörimisnopeuksille. Woongkul et al. (2017, s. 4) mukaan sähkömoottoria voidaan käyttää myös suuremmilla kuormilla ulkoisen virtalähteen lataamiseen.

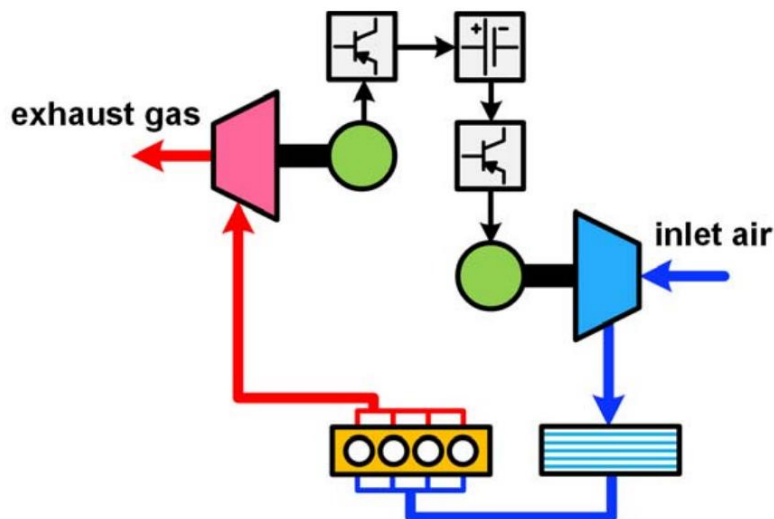


Kuva 3. EAT-tyyppinen ahdin (Woongkul et al. 2017, s. 4)

Koska EAT:ssa sähkömoottori on suoraan kytketty ahtimeen, se lisää kokonaisuuden hitausmomenttia. Sähköisen moottorin tuottama väännönlisäys turbiiniakselille täytyy olla suurempi kuin sen aiheuttama hitausmomentin kasvu, sillä hitausmomentin kasvaessa liian suureksi ahtimen vaste heikkenee, eikä sähkömoottorilla saavuteta tavoiteltavaa hyötyä. Tyypillisesti lisätyn sähkömoottorin hitausmomentti saisi olla suurimmillaan noin puolet turboahtimen hitausmomentista. (Katrašnik et al. 2004, s. 8)

2.2.2 Sähköisesti jaettu pakokaasuahdin

Sähköisesti jaetussa pakokaasuahtimessa eli EST:ssa turbiinin rotaatioenergiaa ei välitetä mekaanisesti turbiiniakselin avulla kompressorille. Woonkul et al. (2017, s. 5) mukaan tässä variaatiossa ahtimen turbiiniin on kiinnitetty generaattori, joka tuottaa sähköenergiaa kompressorin pyörittämiseen. Rakenteessa on myös virtalähde, jonne sähköenergiaa voidaan varastoida turbiinin tuottaessa enemmän virtaa kuin kompressorilla sillä hetkellä käyttää (Woonkul et al. 2017, s. 5).

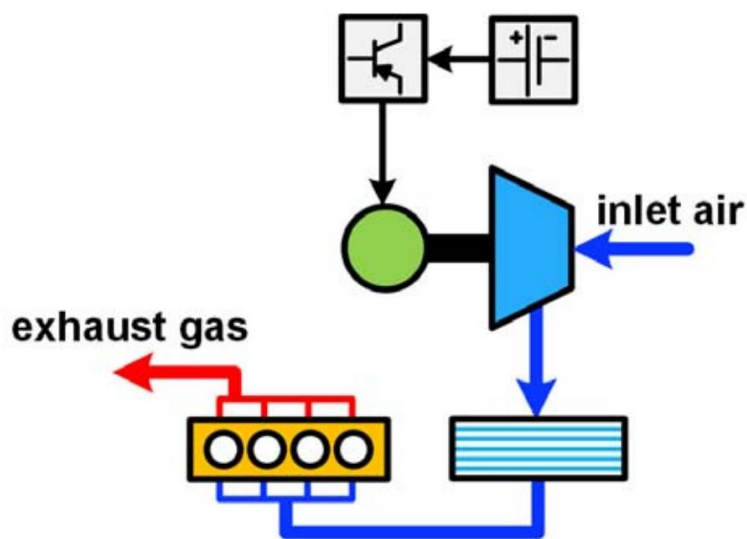


Kuva 4. EST-tyyppinen ahdin (Woonkul et al. 2017, s. 4)

EST:n tapauksessa generaattorin pyörittäminen lisää systeemin vastusta. Generaattori täytyy mitoittaa oikein, jotta kokonaisuuden vaste ei heikkene, mutta riittävä virrantuotto kompressorille onnistuu. EAT:sta poiketen viitearvoja mitoittamiseen ei ole saatavilla.

2.2.3 Sähköinen kompressori

Sähköisen kompressorin eli EC:n tapauksessa konventionaalinen pakokaasuahdin siivutetaan ja ahtopaine tuotetaan erillisen kompressorin avulla. Kompressori saa energiansa ulkoisesta virtälähteestä ja sitä pyöritetään siihen kytketyllä sähkömoottorilla. (Woonkul et al. 2017, s. 4) Ratkaisu on periaatteeltaan samanlainen kuin sähköisesti jaetussa pakokaasuahtimessa, mutta ahdin ei kykene omaan virrantuotantoon, sillä siinä ei ole turbiinin muodostamaa generaattoria. Virtälähteen lataus täytyy siis suorittaa kuormittamalla moottoriin kytkettyä latausjärjestelmää.

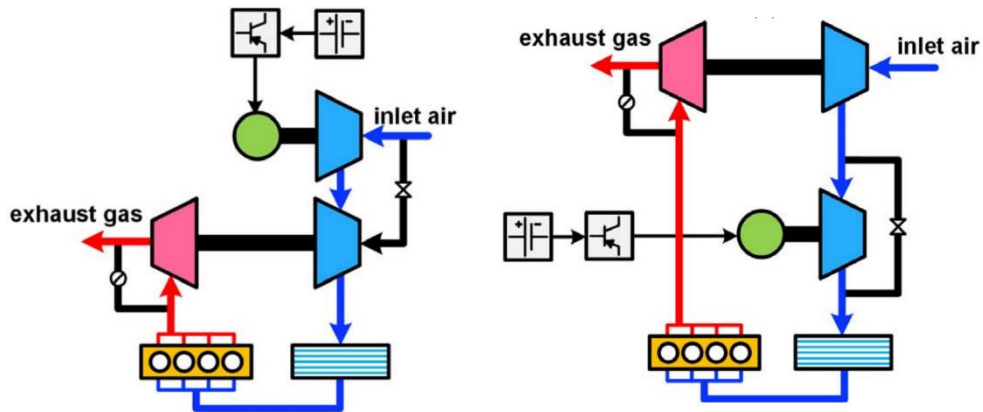


Kuva 5. EC-tyyppinen ahdin (Woongkul et al. 2017, s. 4)

Virtälähteeltä vaaditaan kykyä tuottaa suuri jännite sekä purkautua ja latautua toistuvasti koko laitteen käyttöajan ajan. Tavčar et al. (2011, s. 7) osoittivat tutkimuksessaan superkondensaattorien täyttävän tarvittavat kriteerit, mutta siirtymä niihin perinteisistä akkuteknologioista on vielä pitkä.

2.2.4 Sähköinen kompressori sarjaan kytkettynä

Tässä variaatiossa jo aiemmin esitelty sähköinen kompressori on kytketty sarjaan pakokaasuahtimen kanssa. Ratkaisusta käytetään lyhennettä TEDC. Toteutuksessa erillinen kompressori voi olla sijoitettuna joko ennen konventionaalista ahdinta kuten kuvassa kuusi vasemmalla tai sen jälkeen kuten kuvan kuusi oikealla. Kompressori saa virtansa ulkoisesta virtälähteestä. (Woonkul et al. 2017, s. 6)



Kuva 6. TEDC-tyyppiset ahtimet (Woongkul et al. 2017, s. 4)

Aiemmista ratkaisuista poiketen TEDC-ratkaisussa sähköisen kompressorin rinnalle tarvitaan hukkaportti, jotta se voidaan kytkeä tarvittaessa pois käytöstä. Hukkaportin kautta konventionaalinen ahdin kykenee vastuksettomaan ilmavirtaukseen esimerkiksi korkeammilla moottorin käyntinopeuksilla, kun sähköisen kompressorin paineentuotto jää konventionaalista ahdinta alhaisemmaksi. (Boretti 2019, s. 29)

3. SÄHKÖISTETYN PAKOKAASUAHTIMEN SUORITUSKYKY

Erityyppiset sähköiset pakokaasuahtimet ovat osoittaneet lupaavia tuloksia niin moottoreiden suorituskyvyn kuin polttoainetaloudellisuuden kasvattamisessa. Sähköinen ahdin ei välttämättä tuo suoraa polttoainesäästöä, vaan mahdollistaa sylinteritilavuuden pienentämisen säilyttäen moottorin suorituskyvyn ennallaan. Balis et al. (2003, s. 3, Ricardo Consulting Engineers mukaan) toteavat, että noin 30 prosenttia moottorin sylinteritilavuutta tiputettaessa voidaan päästä noin 10 prosentin polttoainesäästöihin polttoainevälinnasta riippumatta.

Tässä kappaleessa tarkastellaan erilaisten sähköisten pakokaasuahtimien tarjoamia hyötyjä ja niiden ongelmakohtia. Lopuksi perehdytään käytännön tutkimustuloksiin EAT:n, EC:n ja TEDC:n eduista. EST-tekniikan osalta merkittäviä tutkimustuloksia ei ole puolestaan vielä saatavilla (Alshammari et al. 2019, s. 26).

3.1 Hyödyt

Martinez-Botas et al. (2011, s. 9) ja Woongkul et al. (2017, s. 4) mukaan sähköistettyjen pakokaasuahtimien tarjoama merkittävin hyöty on turboviiveen minimointi pyörittämällä ahtimen kompressoria sähköisesti. Autojen moottoreiden sylinteritilavuuksien pienentäminen on johtanut vaikeuksiin pakokaasuahtimen mitoituksessa ja siten ei-toivottuun turboviiveen kasvamiseen. Turboviive tekee moottorin vääntöalueesta epälineaarisen ja kokemattomalle kuljettajalle ajokokemus voi näyttäytyä arvaamattomana. Turboviive johtaa moottorin toimimiseen optimaalisimman tehoalueen ulkopuolella ja voi siten lisätä myös polttoaineenkulutusta.

Jos hybridiahtamisen avulla moottorin suorituskyky säilyy ennallaan sylinteritilavuuden pienentyessä, saavutetaan ratkaisulla useita etuja. Pienempi moottori voi olla esimerkiksi kevyempi ja halvempi valmistaa ja lisäksi sylinterilukumäärän laskiessa pyörimiskitkat pienenevät. (Balis et al. 2003, s. 1) Martinez-Botas et al. toteavat (2011, s. 9, Cummins Turbo Technologies mukaan), että hybridiahtamisen etuna on lisäksi ahtopaineen säilyttäminen vaihtenvaihdon aikana pyörittämällä ahtimen kompressoria sähköisesti, mikä johtaa turboviiveen vähenemiseen ja moottorin pysymiseen paremmin vääntöalueellaan. Ongelmana on toisaalta ylimääräinen ahtopaineen aikaansaama kuorma, joka kohdistuu vaihtenvaihdossa vaihteiston komponentteihin.

Etenkin sähköisesti avustetun ahtimen eduiksi Martinez-Botas et al. (2011, s. 9, Cummins Turbo Technologies mukaan) listaavat pakokaasujen hukkaenergian talteenoton käyttämällä ahtimen sähkömoottoria generaattorina ja ahtimen turbiinin pyörimisen elektronisen rajoittamisen. Ilman generaattoritoimintoa sähkömoottorin käyttämän virtalähteen lataaminen kuormittaa auton latausjärjestelmää ja voi kasvaneen kuorman johdosta pienentää todellista ratkaisusta saatavaa hyötyä. Elektronisella ahtopaineen rajoittamisella voidaan puolestaan välttyä erillisen hukkaportin käytöltä ja vähennetään siten mahdollisten vioittuvien komponenttien määrää.

Sekä sähköisesti jaettu ahdin että sähköinen kompressori mahdollistavat kompressorin pyörittämisen täysin turbiinista irrallisena komponenttina käyttämällä ulkoista virtalähdettä ja sähkömoottoria. Irrallisuus antaa uusia mahdollisuuksia etenkin ahtimen mitoittamiseen, sillä tyypillisesti turbiinisiiven pienentäminen turboviiveen minimoimiseksi voi johtaa kompressorisiiven ominaisuudet ylittävään pyörimisnopeuteen ja siten sen sakkauttamiseen. Siipien ollessa vain elektronisesti kytkettyjä voidaan sakkautus välttää. Etuna on lisäksi se, kompressorin on mahdollista tuottaa ahtopainetta pienilläkin moottorin käyntinopeuksilla, vaikka turbiinin pyörimisnopeus olisikin vähäinen. Lisäksi kompressorin pyörimisnopeuden ja siten ahtopaineen säätö on tarkempaa (Alshammari et al. 2019, s. 19). Kompressorin ja turbiinin ollessa erillisiä, ei kompressorin pyörimiseen vaikuta myöskään turbiiniakselin tai turbiinin hitausmomentti (Woongkul et al. 2017, s. 5). Pienemmän hitausmomentin vuoksi kompressorin on mahdollista saavuttaa suurempia kulmakiihtyvyyksiä käyttämällä pienempää energiamäärää.

Woongkul et al. (2017, s. 5) mainitsevat myös, että erillinen kompressori mahdollistaa viileämmän ahtoilman tuoton, kuin kuumaan pakokaasuja pyörittävään turbiiniin liitettynä ja Alshammari et al. (2019, s. 18) täydentävät lisäksi, että turbiinin puute vähentää pakopainetta. Pakopaineen vähentäminen saa aikaan suuremman paine-eron pakosarjan ja sylintereiden palotilojen välille mahdollistaen tehokkaamman paine-eron tasaantumisen ja paremman poistovirtauksen sylintereistä. Lopputuloksena on paremmin virtaava ja tehokkaampi moottori.

Sarjaan kytketyn sähköisen kompressorin edut vastaavat pitkälti erillisen kompressorin toteutusta, sillä ratkaisussa kompressori on samalla tapaa erillinen osa rakennetta. Woongkul et al. (2017, s. 6) mainitsevat eduksi yksinkertaisen kytkennän tavallisen ahtimen rinnalle ja lisäävät myös, että ahtimen jälkeinen ratkaisu on tehokkaampi, sillä paineistettava ilmamäärä on silloin pienempi. Tavčar et al. (2011, s. 16) painottavat ratkaisun etuja etenkin siksi, että systeemissä on käytössä kaksi kompressoria, joilla voidaan

luoda hyvin tasainen tehontuotto; sähköinen kompressori toimii moottorin hitailla käyntinopeuksilla ja mekaaninen puolestaan korkeammilla, jolloin sähköisen kompressorin tuottama ilmamäärä jäisi tarvittavaa pienemmäksi.

3.2 Ongelmakohdat

Sähköistettyjä pakokaasuahtimia koskee variaatiosta riippumatta samankaltaiset ongelmat, jotka liittyvät ahtimen sähköisiin komponentteihin. Mahdollistaakseen ahtopaineen tuoton sekä sähkömoottorilta että virtalähteeltä vaaditaan runsaasti ominaisuuksia. Sähkömoottorin pyörimisnopeus voi tilanteesta riippuen olla satoja tuhansia kierroksia minuutissa (Tavčar et al. 2011, s. 7), joten moottorina täytyy käyttää edistyneistä suurnopeusmoottoria. Moottorin täytyy olla kompakti, tyypillisesti lämmönkestävä ja sen täytyy kyetä suuriin kiihtyvyyksiin ja pyörimisnopeuksiin. Suurnopeusmoottorin tyypistä riippuen erilaisia ongelmia ovat mm. niiden kalliit valmistuskustannukset, erilaiset pyörrevirroista johtuvat jännitehäviöt, korkeasta lämpötilasta johtuva demagnetisaatio ja laakeri-ongelmat. Autojen sähköjärjestelmä on myös tyypillisesti 12:sta voltilla toimiva, mikä rajoittaa suurnopeusmoottoreiden tehontuottoa. (Woonkul et al. s. 6-10)

Sähköenergian siirto, energian muodon muutokset ja energian varastointi virtalähteeseen aiheuttavat häviöitä, jotka täytyy lisäksi huomioida (Tavčar et al. 2011, s. 13). Ongelma on merkittävä etenkin sähköisesti jaetun ahtimen tapauksessa, sillä ratkaisussa kaikki turbiinin tuottama mekaaninen energia siirretään kompressorille sähköisesti (Tavčar et al. 2011, s. 14). Mikäli virtalähteen lataus sähköisen ahtimen generaattoritoiminnolla ei ole mahdollista, voi se johtaa siihen, että virtalähteen lataaminen auton laturia käyttämällä aiheuttaa lisäkuorman moottorille, joka kumoaa ahtimella aikaansaadun hyödyn.

Virtalähteen täytyy lisäksi kyetä purkamaan suuria varauksia nopeasti moottorin käyttöön. Esimerkiksi Borgwarnerin 5 kilowatin ja 48 voltin sähköinen kompressori kykenee vain 21 sekunnin yhtäjaksoiseen ahtopaineen tuottamiseen, sillä sen aiheuttama kuorma sähköjärjestelmälle on niin suuri (Mohon et al. 2018, s. 4). Lyhyen toiminta-aikansa vuoksi tällainen sähköinen kompressori ei soveltuisi vielä käytettäväksi muutoin kuin konventionaalisen ahtimen rinnalla.

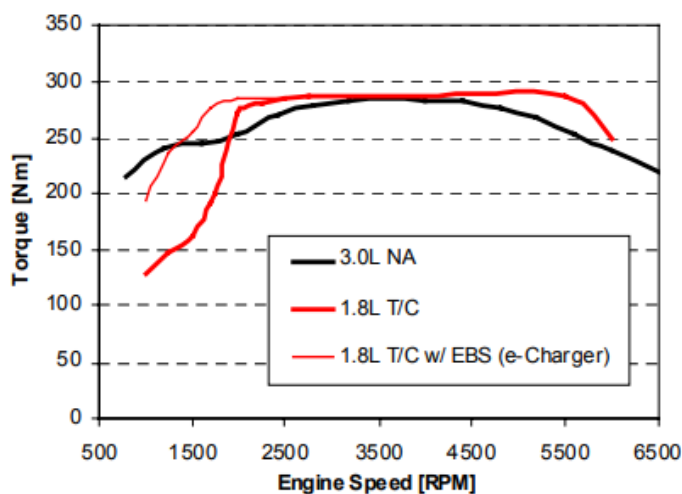
Merkittävimmäksi ongelmaksi sähköisesti avustetun ahtimen kohdalla Tavčar et al. (2011, s. 13) mainitsevat jo aiemmin mainitun komponenttien inertian kasvun. Yksinkertaistettuna jos ahdin lisää systeemin inertiaa enemmän kuin se tuottaa vääntöä, on rat-

kaisu hyödytön. Woongkul et al. (2017, s. 8) täydentävät myös, että sähkömoottorin ollessa kytkettynä ahtimen turbiiniakseliin, ja siten lähellä kuumia pakokaasuja, kohdistuu komponentteihin merkittävä lämpökuorma. Yleisesti tiedetään, että monen elektronisen komponentin suorituskyky heikkenee lämpötilan kasvaessa.

3.3 Mittausdata

Arvioitaessa sähköistettyjen ahtimien suorituskykyä tarvitaan suorituskykyparametreja, joiden tarkastelu onnistuu numeerisesti. Woonkul et al. (2017, s. 6) listaa hyviksi parametreiksi turboviiveen, polttoainetaloudellisuuden ja suorituskyvyn tasaisessa kuormituksessa. Lisäksi esimerkiksi moottorin väännön tarkastelu kierrosluvun funktiona voi antaa tietoa tarkasteltavan ratkaisun toimivuudesta. Tutkimustuloksia vertailtaessa on tärkeää kiinnittää huomiota myös tutkittavaan moottoriin ja sähköjärjestelmään, sillä esimerkiksi moottorin iskutilavuus, sylinterien määrä ja käytettävän sähköjärjestelmän jännite eivät säily vakioina eri tutkimusten välillä.

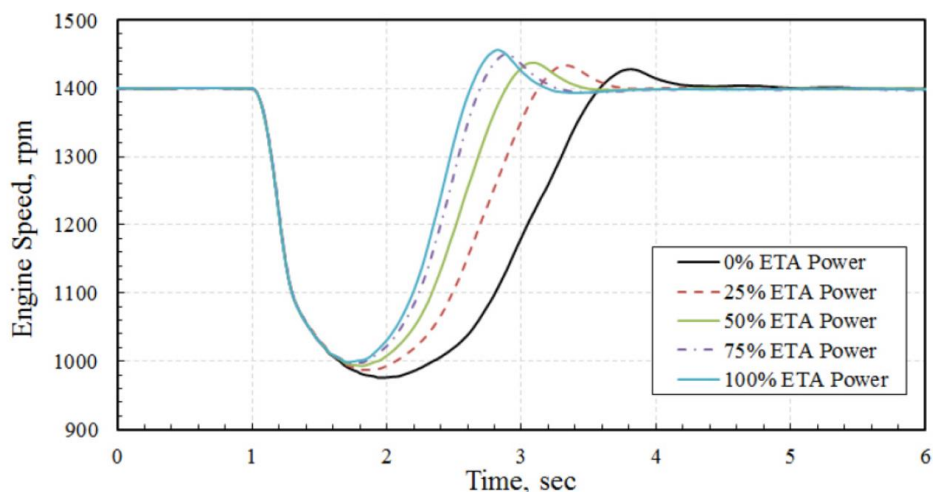
Balis et al. (2003, s. 2) havaitsivat tutkimuksessaan, että sarjaan kytketyllä sähköisellä kompressorilla ahdettu 1,8-litrainen moottori saatiin 1 500 rpm:n kierrosalueella käyttäytymään 3,0-litraista ei-ahdettua moottoria vastaavasti. Tutkimuksissa havaittiin lisäksi, että turboviive 1000rpm kierrosnopeudella tippui viidestä sekunnista alle sekuntiin sähköistä kompressoria käytettäessä. Myös Nishiwaki et al. (2013, s. 1) pääsivät tutkimuksissaan vastaaviin tuloksiin. 1,5 litraisen kaksoisahdetun bensiinimoottorin vaste 1 500 rpm:n tasaisella kuormituksella parani 43 prosenttia, kun toinen ahtimista korvattiin sähköisellä kompressorilla. Kummassakin tutkimuksessa saatu suorituskyvyn paraneminen on suuri ja varmasti havaittavissa moottorin luonteessa kiihdytystilanteessa.



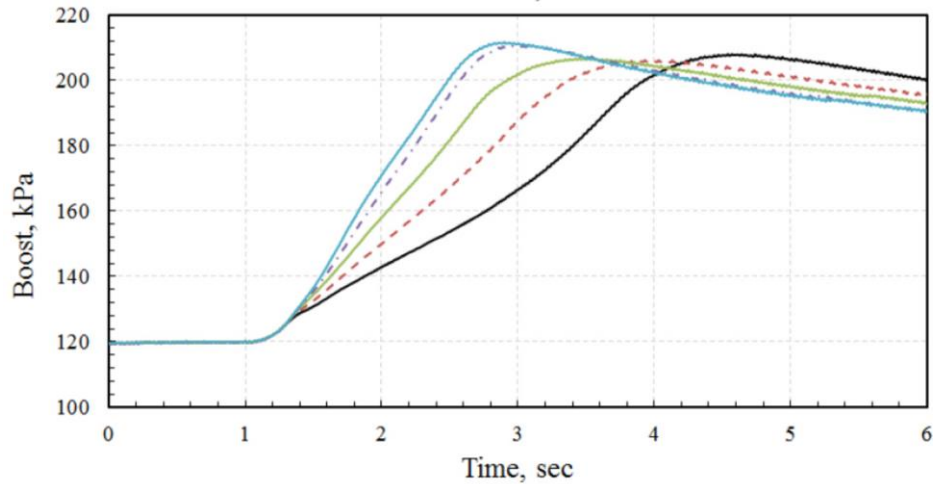
Kuva 7. TEDC-tekniikan hyöty verrattuna vapaasti hengittävään moottoriin (NA) ja perinteisesti ahdettuun moottoriin (T/C) (Balis et al. 2003, s. 2)

Myös Ibaraki et al. (2006, s. 2) päätyivät tutkimuksissaan vastaavanlaisiin tuloksiin: Mitsubishiin sähköisesti avustetulla ahtimella moottorin vääntö ja kaasunvaste paranivat huomattavasti verrokkina käytettyyn muuttuvasiipisellä pakokaasuahtimella varustettuun kahden litran dieselmoottoriin. Kun ahtimen kompressoriin kytkettiin kahden kilowatin tehoinen suurnopeusmoottori, 26 kPa:n suuruinen ahtopaine saavutettiin 41 prosenttia nopeammin kuin ilman sähkömoottoria. Moottorin käytöksessä se näkyi n. 18 prosentin väännönlisäyksenä 1000rpm kierrosluvulla. (Ibaraki et al. 2006, s. 4) Vastaavanlaista järjestelmää käyttäen Sivaraman et al. (2018, s. 15 698) onnistuivat tutkimuksissaan linearisoimaan tutkittavan moottorin tehoaluetta, parantamaan moottorin hyötysuhdetta mahdollistaen 10 – 12 prosentin polttoainesäästön ja kasvattamaan moottorin tehoa noin 15 prosenttia sylinteritilavuuden säilyessä samana. Huomioitavaa on kuitenkin se, että tutkimuksissa käytettiin 72 voltin jännitelähdettä tyypillisen autoissa käytetyn 12 voltin jännitelähteen sijaan. Korkeampi jännite mahdollistaa sähkömoottorin huomattavasti tehokkaamman toiminnan, joten todelliset suorituskykyparametrit jäisivät oletettavasti tutkittua pienemmiksi.

Edeltävän kaltaisia tuloksia on saatu lisäksi simulointia hyödyntäen. Xue ja Rutledge (2017, s. 11) simuloivat sähköisesti avustetun ahtimen vaikutusta moottorin käyttäytymiseen Matlab Simulink –ohjelmaa käyttäen ja havaitsivat, että 5 kilowatin sähkömoottorilla avustettu ahdin mahdollisti huomattavasti perinteistä ahdinta nopeamman ahtopaineen ja moottorin kierrosluvun nousun. Tuloksia on havainnollistettu alla olevissa kuvissa.



Kuva 8. Moottorin kierrosluku ajan funktiona erilaisilla ETA:n käyttöasteilla (Xue & Rutledge 2017, s. 11)



Kuva 8. Moottorin ahtopaine ajan funktiona erilaisilla ETA:n käyttöasteilla (Xue & Rutledge 2017, s. 11)

Irrallisen sähköisen kompressorin käytöstä ei ole puolestaan saatavilla yhtä kattavia tutkimustuloksia kuin TEDC- ja EAT-teknologioista. Mohon et al. (2018, s. 9) tutkivat kuitenkin muutamien erilaisen teknologioiden, EC mukaan lukien, vaikutusta Fordin 2,7 litraisen dieselmootorin käytökseen ja he huomasivat, että 5 kilowatin tehoinen ja 48 voltin järjestelmää käyttävä EC mahdollisti 18 prosenttia paremman kiihtyvyyden kaksoisahdettuun perusmoottoriin verrattuna. Lisäksi he havaitsivat polttoainetaloudellisuuden paranemista, mutta tutkimuksen luonteesta johtuen EC:n aikaansaamaa säästöä ei voida eritellä.

3.4 Taloudellinen kannattavuus

Sähköisten pakokaasuahdimien kannattavuus variaatiosta riippumatta määräytyy niiden ostohinnan ja ahtimen tuoman taloudellisen hyödyn suhteena. Koska sähköisen ahtimen lisäys ei vaikuta ajoneuvoverotukseen, perustuu säästö ainoastaan polttoainekulutuksen vähenemiseen. Paavilainen (2018, s. 19) tutki osana kandidaatintyötään sähköisen ahtimen tuomaa polttoainesäästöä vuonna 2018 ja totesi ratkaisun olevan takaisinmaksuajaltaan jopa 20 vuotta, mikäli polttoainesäästö on noin 12 prosenttia. Säästöt tavalliselle henkilöautoilijalle olivat vuonna 2018 niin pienet, että ratkaisu oli kannattamaton (Paavilainen 2018, s. 19).

Polttoaineen hintojen moninkertaistuessa 12 prosentin polttoainesäästö voi olla nykyisin kannattavampi. Säästö voidaan määrittää Paavilaisen (2018, s. 19) yhtälön mukaan:

$$S = \frac{x}{100} * \frac{z}{100} * L * H,$$

missä S on säästetty summa euroissa, x on polttoaineen prosentuaalinen säästö, z on polttoaineen kulutus l/100km, L on ajettu matka kilometreissä ja H on polttoaineen hinta litralta. Paavilaisen yhtälöä käyttäen polttoainesäästö 20 000 kilometrille ja 5.4 l/100km kuluttavalle autolle oli noin 190 euroa polttoaineen hinnan ollessa keskimäärin 1.468 euroa. (Paavilainen 2018, s. 19) Vuonna 2022 huhtikuussa keskimääräiseksi 95E10- bensalaadun ja dieselpolttoaineen yhdistetyksi hinnaksi saadaan puolestaan 2,215 euroa (Polttoaine.net). Se tarkoittaa edeltävillä ajokilometreillä ja polttoaineenkulutuksella noin 287 euron säästöä, mikä on 51 prosenttia aiempaa summaa suurempi.

Sähköisten turboahtimien jälleenmyyntihintoja ei ole saatavilla, mutta niiden voidaan olettaa olevan tuhansia euroja. Vuonna 2018 henkilöautoilla ajettiin keskimäärin 14 tuhatta kilometriä (Konttinen 2019) eli takaisinmaksuaika olisi edelleen kymmeniä vuosia usean tuhannen euron investoinneille. Teknologian kehittyessä ja sähköisten ahtimien laajamittaisen tuotannon käynnistyessä voi ratkaisusta tulla taloudellisesti kannattavampaa. Lisäksi on huomioitava, että etenkin suorituskykyisiä autoja ostavalle voi sähköisen ahtimen tuoma väännönlisäys olla polttoainetaloudellisuutta tärkeämpää.

4. KÄYTÄNNÖN TOTEUTUKSET

Sähköisten pakokaasuahntimien merkittävin kehitystyö on tapahtunut F1-autourheilun parissa. Useat tekniset ratkaisut ovat kehittyneet etenkin vuoden 2014 jälkeen, jolloin F1-sarjan moottoritulavuus rajoitettiin 1,6 litraan ja erilaiset useaa turboahdinta hyödyntävät toteutukset kiellettiin (Boretti 2019, s. 14). Autourheilussa toimivaksi todetut ratkaisut ovat suunnitteilla tavallisiin henkilöautoihin ja suuret ahdinvalmistajat Borgwarner ja Garret ovatkin esitelleet omat versionsa EAT- ja EC-tyyppisistä ahtimista. Audi oli puolestaan ensimmäinen valmistaja, joka toi markkinoille TEDC-teknologialla varustetun auton.

4.1 Erityyppiset sähköiset pakokaasuahntimet käytännössä

Garretin EAT-ahdinta voidaan pitää ensimmäisenä kaupalliseen tuotantoon päätyneenä sähköisenä pakokaasuahntimena. Ahdin on rakenteeltaan perinteinen sähköisesti avustettu koostuen turbiinista, kompressorista, sähkömoottorista, moottorin säätöyksiköstä ja 48 voltin virtalähteestä. Garretin suorittamassa tutkimuksessa tällaisella sähköisellä ahtimella moottorin vääntö kasvoi 11 prosenttia, teho 16 prosenttia ja moottorin palamista pahtuma saatiin optimoitua läpi kierrosalueen stoikiometriselle lambda 1 arvolle. (Garret) Lambda 1 tarkoittaa sitä, että polttoaine palaa ilman kanssa optimaalisimmalla seossuhteella tyypillisen hieman rikkaan, ja kulutusta lisäävän, seossuhteen sijaan. Auto saavutti tavoiteväännön lisäksi 3,5 sekuntia nopeammin 1500 rpm:n kierrosalueella ja kiihtyvyys 60 km/h nopeudesta 100 km/h nopeuteen parani 25 prosenttia (Jenckes 2020). Garretin saamat tulokset vastaavat jo aiemmin esiteltyjä tutkimustuloksia ja suorituskykyparametreja voidaan pitää siten uskottavina.

Garretin sähköistä pakokaasuahdinta hyödynnetään osana Mercedes AMG One – auton 1,6 litraista moottoria. Sähköinen järjestelmä toimii 48 voltin sijaan 800 voltin jännitteellä ja kykenee tuottamaan 107 hevosvoiman tehonlisäyksen eliminoidakseen ahtoviivettä. Teknologia on peräisin F1-autourheilusta ja siitä käytetään nimeä MGU-H. (Csere 2017)

Myös Borgwarner on esitellyt sähköisesti avustetun ahtimen. Borgwarnerin tutkimuksessa 48 voltin EAT-ahtimella korvattiin Porsche 718 S –auton muuttuvasiipinen ahdin ja saavutettiin noin 11 prosentin tehonlisäys, 36 prosentin väännönlisäys ja lisäksi tavoiteväännö toteutui 3.4 sekuntia aiemmin 1 500 rpm:n kierrosalueella. (Jenckes 2020) Suorituskyky on hyvin lähellä Garretin esittelemää, joten voidaan olettaa, että kumpikaan

kilpailija ei ole vääristellyt tuloksia myynnin edistämiseksi. 400 voltin järjestelmällä Borgwarner kilpailee Garretin vastaavan systeemin kanssa ja esittää järjestelmälle 200 prosenttia parempaa kaasunvastetta ja 50 prosenttia nopeampaa tavoiteväännön saavuttamista. Borgwarner lisää, että ahtimen suorituskyvyn kasvu mahdollistaa moottorin sylinteritulavuuden pienentämisen ja siten polttoainetaloudellisuuden parantamisen, kuten tässä työssä jo aiemmin todettiin. Borgwarnerin mukaan teknologia pääsee massatuotantoon vuonna 2023 erilaisten hybridiajoneuvojen voimanlähteenä. (Borgwarner)

Sähköisesti avustettujen eli EAT-ahtimien lisäksi sekä Garret että Borgwarner ovat esitelleet variaationsa sähköisestä kompressorista. Borgwarnerin järjestelmä käyttää 48 voltin virtalähdettä ja kykenee 12 kilowatin suuruiseen tehontuottoon (Borgwarner), kun taas Garretin variaatio saavuttaa samalla jännitteellä 7,5 kilowatin ulostulotehon (Garret). Garret listaa lisäksi sähköisen kompressorin suorituskykyarvoiksi 25 prosenttia suuremman väännön ja 20 prosenttia pienemmät typen oksidipäästöt.

Sähköinen kompressori esiintyi ensimmäisen kerran sarjatuotantoautossa vuonna 2016, kun Audin SQ7 TDI –auto julkaistiin. Järjestelmä koostui 48 voltin jännitelähteestä ja noin 7 kilowatin sähkömoottorista, joka oli kytketty erilliseen kompressorin kahden muun ahtimen kanssa sarjaan. (Glucker 2018) Vuonna 2020 esitellyissä Audin S6 ja S7 malleissa samaa teknologiaa hyödynnettiin uudelleen osana 2.9 litraisia kaksoisahdettuja moottoreita. Teknologian avulla moottorin kaasunvastetta saatiin parannettua ja polttoainekulutusta vähennettyä jopa 22 prosenttia aiempiin sukupolviin verrattuna (Millikin 2020). Audin SQ7:n julkaisun jälkeen muutkin autovalmistajat, kuten esimerkiksi Mercedes Benz tai Bentley ovat ottaneet vastaavanlaisia ratkaisuita käyttöön (Glucker 2018).

4.2 Tulevaisuudennäkymät

Sähköautot nähdään helposti tulevaisuuden liikennöintimuotona, mutta on olennaista huomioida se, että sähköautojen akkuteknologian kehitys on vielä hidasta ja suurin osa maailman sähköntuotannosta perustuu edelleen fossiilisiin polttoaineisiin. Vuonna 2019 sähköä tuotettiin 63,3 prosenttia uusiutumattomilla luonnonvaroilla (Ritchie & Roser 2020), eikä sähköä voida pitää siten puhtaana ja ympäristöä saastuttamattomana energianlähteenä. Hyvällä hyötysuhteella toimiva polttomoottori voi olla siten kokonaisuuden kannalta puhtaampi, mutta tarkkoja laskelmia tällaisesta on haastavaa esittää.

Sähköistettyjen pakokaasuahtimien tulevaisuudennäkymät ovat osittain sidoksissa polttomoottoriajoneuvojen tulevaisuuteen. Jos polttomoottoreiden päästöjä ei saada vähennettyä päästötavoitteiden mukaisiksi, voi seurauksena olla polttomoottoriautojen kannan

romahtaminen. Erilaisia ratkaisuita polttomoottorin säilyttämiseen voidaan löytää esimerkiksi uusista moottoriteknologioista tai biopolttoaineiden käytöstä. Perinteinen bensiinimoottori voidaan muuttaa helposti etanolikäyttöiseksi ja saavuttaa siten jopa 80 prosenttia pienemmät hiilidioksidipäästöt (Suomen lähienergialiitto ry. 2018), mikä voi tarjota myös sähköistetyille pakokaasuahtimille mahdollisen tulevaisuuden.

Tiukentuvat päästönormit ja tavoitteet kehittää entistä tehokkaampia sekä polttoainetaloudellisempia autoja ajavat lisäksi sähköistettyjen ahtimien kehitystä eteenpäin (Jenckes 2020). Kehitykset sähköisissä komponenteissa mahdollistavat entistä edullisemmat ja tehokkaammat suurnopeusmoottorit, mikä voi lisätä autovalmistajien kiinnostusta sähköiseen ahtamiseen. Valmistajia voi houkuttaa etenkin EC-tyyppinen ratkaisu, jossa erillinen kompressori voidaan lisätä jo olemassa olevan teknologian rinnalle kohtuullisilla investoinneilla ja huomattavilla tehon sekä polttoainetaloudellisuuden lisäyksillä.

Sähköistettyjen pakokaasuahtimien teknologinen kehitys on nykyisin kuitenkin alkuvaiheessa ja niiden todellista suorituskykyä on vielä haastava arvioida. Erilaisia ratkaisuja kokeillaan prototyyppien muodossa ja parhaimmat päätyvät kilpa-autoilukäyttöön. Kilpa-autoilussa toimivaksi todetut ratkaisut valitaan puolestaan kuluttajamarkkinoille erilaisten suorituskykyisten luksusautojen voimanlähteiksi. Esimerkkinä tällaisesta on aiemmin mainittu Mercedes-AMG ONE, jonka jälleenmyyntihinta on 2,72 miljoonaa dollaria (Jenckes 2020). Teknologisten suuntaviivojen muodostuessa alkaa teknologisen kehityksen nopean kasvun vaihe ja sekä Garret että Borgwarner ennustavatkin, että 1 – 4 litran sylinteritilavuuden moottoreissa sähköiset ahtimet yleistyvät vuoden 2023 jälkeen (Jenckes 2020). Ennustuksien kanssa linjassa ovat Audin ja muiden valmistajien yksittäismallit, jotka ovat jo sisältäneet sähköisiä kompressoreita osana autojen voimalähteitä.

Etenkin sähköisten sovellusten aiheuttamat lisäkulut vaikuttavat sähköisten ahtimien menestykseen, eikä kulurakenne ole vielä täysin selvillä. EAT-tyyppinen ahdin on oletettavasti konventionaalista ahdinta kalliimpi valmistaa, mutta toisaalta sen avulla saavutettu sylinteritilavuuden pienentäminen voi pienentää todellisia kokonaiskuluja. (Jenckes 2020) Ratkaisujen menestymiseen vaikuttaa myös niiden asennuksen integroitavuus nykyisille tuotantolinjoille, elektronisten komponenttien hintataso ja jopa lainsäädäntö polttomoottoreiden käytölle tulevaisuudessa.

Autojen voimanlähteiden muutos voi lisäksi kiihdyttää sähköisten pakokaasuahtimien kehitystä. Ei-ladattavien hybridi-autojen osuus koko autokannasta on kasvanut viimeisen

seitsemän vuoden aikana noin 30 prosenttia (Autoalan tiedotuskeskus 2022). Sen ansiosta yhä useammassa autossa on käytössä yli 12 voltin jännitelähde, mikä mahdollistaa elektronisen ahtimen riittävän tehokkaan toiminnan. Ahtimen regeneraatiotoiminnot voisivat puolestaan ladata erillistä jännitelähdettä mahdollistaen kahden teknologian rinnakkaisen kehityksen ja yhteensulautumisen. EC-tyyppistä ratkaisua olisi lisäksi mahdollista käyttää tulevaisuuden teknologiana pidetyn polttokennon virtauksen parantamiseen (Garret) ja siten sähköisille ahtimille voitaisiin nähdä tulevaisuus myös erillisenä teknologiana polttomoottorista irrallaan.

5. YHTEENVETO

Erilaiset päästönormit ja nykyinen trendi pienentää henkilöautojen polttoainekustannuksia ovat johtaneet autojen sylinteritilavuuksien pienentämiseen. Pakokaasuahtimella voidaan lisätä moottorille syötettävää ilmamäärää ja kompensoida siten pienentyneestä sylinteritilavuudesta aiheutuvia vääntö ja tehohäviöitä, mutta perinteisen ahtimen mitoitus laajalle toiminta-alueelle on sen ominaisuuksiensa vuoksi aina kompromissi. Pienellä pakopesällä ahtimen käyttöalue saadaan moottorin alakierrosalueelle, mutta toisaalta moottorin huipputeho jää alhaiseksi suuren pakopaineen rajoittaessa virtausta. Päinvastoin suurella pakopesällä mahdollistetaan suurempi huipputeho, mutta törmätään turboviiveenä tunnettuun ilmiöön.

Perinteisten ahtimien ongelmien vuoksi autovalmistajat pyrkivät etsimään uusia ratkaisuja kasvattaakseen entistä pienempien moottorien käyttöaluetta ja huipputehoa, ja yhtenä ratkaisuna tähän nähdään sähköistetyt pakokaasuahtimet. Jos ahtimen kompressorilla pyöritetään sähköisesti, saadaan ahdin toimimaan jo moottorin matalilla käyntikiaroilla optimaalisimmalla käyttöalueellaan ja turboviive voidaan välttää. Sähköistetyllä ahtimella voidaan siten yhdistää sekä pienen vääntöä tuottavan että suuren huipputehon mahdollistavan ahtimen parhaat puolet.

Tämän työn tavoitteena oli perehtyä sähköistettyihin pakokaasuahtimiin ja samalla siihen, onko sähköistetty pakokaasuahdin toimiva menetelmä auton moottorin tehon, käyttöalueen ja polttoainetaloudellisuuden parantamiseksi. Työssä perehdyttiin neljään erillaiseen sähköiseen ahtimeen: sähköisesti avustettuun pakokaasuahtimeen, sähköisesti jaettuun ahtimeen, sähköiseen kompressoriin ja sähköiseen kompressoriin sarjaan kytkettynä. Työssä tarkasteltiin ratkaisujen etuja ja ongelmakohtia, mittaustuloksia suorituskyvystä, käytännön toteutuksia ja tulevaisuudennäkymiä.

Työssä havaittiin, että erilaisten ratkaisujen keskeisimpinä etuina ovat turboviiveen vähentäminen, moottorin väännön lisäys ja välillisesti saavutettu polttoainetaloudellisuuden paraneminen. Mittausdata osoitti, että sähköistetyn ahtimen variaatiosta riippumatta pienempi moottori saadaan käyttäytymään iskuilavuudeltaan suurempaa vastaavasti: moottorin vaste kasvaa 20 – 40 prosenttia, turboviive pienenee useita sekunteja ja moottorin vääntö ja kiihtyvyys kasvavat 10 – 20 prosenttia. Osassa tutkimuksissa saavutettiin myös suoraa polttoainesäästöä sylinteritilavuuden tiputtamisesta aiheutuneen säästön lisäksi. Keskeisimmät ongelmat liittyvät puolestaan ahtimen sähköisiin komponentteihin,

sillä sekä virtalähteeltä että sähkömoottorilta vaaditaan runsaasti ominaisuuksia. Autoissa tyypillinen 12 voltin sähköjärjestelmä ei ole riittävän tehokas ahtimissa käytettävien sähkömoottoreiden virtalähteiksi ja lisäksi virtalähteeltä vaaditaan erittäin nopeaa varauksen purkua ja latautumista. Sähkömoottoreiden täytyy puolestaan kyetä suuriin, jopa 150 tuhatta kierrosta minuutissa ylittäviin pyörimisnopeuksiin, joten moottoreina on käytettävä edistyneitä suurnopeusmoottoreita. Elektronisiin komponentteihin kohdistuu lisäksi paljon lämpökuormaa ja epäedullisia ympäristöolosuhteita, mikä voi johtaa niiden vioittumiseen.

Jos tarkastellaan sähköistettyjä ahtimia vain niiden suorituskyvyn perusteella ja käytössä on riittävän tehokasta akku- ja moottoriteknologiaa, voidaan todeta, että ratkaisut ovat toimivia. Kokonaisuudessa on kuitenkin huomioitava, että tämänhetkisten laskelmien mukaan ratkaisujen takaisinmaksuaika olisi kymmeniä vuosia, mikä voi heikentää niiden laajamittaisempaa suosiota henkilöautoilussa. Toisaalta on olennaista myös punnita ratkaisujen muita arvoja tuottavia ominaisuuksia, kuten saavutettavaa moottorin väännön lisäystä. Lisääntynyt vääntö ja teho voivat parantaa ajokokemusta ja tuoda siten arvoa käyttäjälle, vaikka takaisinmaksuaika olisikin huomattavan suuri. Esimerkiksi Mercedes Benz sekä Audi ovatkin käyttäneet sähköistettyjä ahtimia osana juurikin uusien tehokkaampien autojen voimanlähteitä.

Ahdinvalmistajat Garret ja Borgwarner ovat esitelleet variaationsa sähköistetyistä ahtimista ja he ennustavat niiden kasvattavan suosiotaan henkilöautoissa vuoteen 2023 mennessä (Jenckes 2020). Ennustusten paikkaansa pitävyyteen vaikuttavat kuitenkin esimerkiksi polttomoottoriautojen tulevaisuudennäkymät hybridi- ja sähköautojen rinnalla; hybridiautot voivat toisaalta mahdollistaa sähköistettyjen ahtimien kehityksen tarjoamalla tehokkaampia jännitelähteitä, mutta toisaalta ne voivat myös johtaa siirtymään täyssähköautoihin ja polttomoottoriteknologian lopulliseen hiipumiseen. Lisäksi sähköistettyjen ahtimien lopullinen myyntihinta ja teknologioiden käytännön suorituskyky ja luotettavuus arkipäiväisessä henkilöautoilussa vaikuttavat niiden suosioon. Sähköisillä ahtimilla on potentiaalia moottorin tehon, käyttöalueen ja polttoainetaloudellisuuden parantamiseksi paperilla, mutta vasta tulevat vuodet osoittavat teknologian todellisen tulevaisuuden.

LÄHTEET

ABB. Celebrating 110 years of turbocharging. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.2.2022): <https://new.abb.com/turbocharging/110-years-of-turbocharging>

Alshammari, M., Alshammari, F. & Pesyridis, A. (2019). Electric boosting and energy recovery systems for engine downsizing. *Energies* (Basel), Vol. 12(24), pp. 4636–.

Ashdown, K. (2018). A Brief History Of Turbochargers In Cars. Carthrottle. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.3.2022): <https://www.carthrottle.com/post/a-brief-history-of-turbochargers-in-cars/>

Autoalan tiedotuskeskus. (2022). Ensirekisteröityjen henkilöautojen käyttövoimatilastot. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 2.5.2022): https://www.aut.fi/tilastot/ensirekisteroinnit/ensirekisteroinnit_kayttovoimittain/henkilöautojen_kayttovoimatilastot

Balis, C., Middlemass, C. & Shahed, S. (2003). DESIGN & DEVELOPMENT OF E-TURBO FOR SUV AND LIGHT TRUCK APPLICATIONS. Osti.Gov. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.2.2022): <https://www.osti.gov/servlets/purl/828952>.

Boretti, A. (2019). Advances in turbocharged racing engines. Warrendale, PA: SAE International.

Borgwarner. BorgWarner Earns First Global eTurbo™ Business for High-Voltage Hybrid Vehicle Application. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.3.2022): <https://www.borgwarner.com/newsroom/press-releases/2021/05/18/borgwarner-earns-first-global-eturbo-business-for-high-voltage-hybrid-vehicle-application>

Borgwarner. Electric Boosting Technologies. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 2.5.2022): <https://www.borgwarner.com/technologies/electric-boosting-technologies>

Brown, J. W. & Waldron, T. (2018). Drivecycle Benefits of Controlling Airflow with the SuperTurbo. SAE technical paper series.

Csere, C. (2017). Mercedes-AMG Project One. Car and driver. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 2.5.2022): <https://www.caranddriver.com/news/a15082615/mercedes-amg-project-one-photos-and-info-news/>

Cummins. Turbocharger History. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.2.2022): <http://www.cummins.ru/en/components/turbo-technologies/turbocharger-history>

Euroopan komissio. CO₂ emission performance standards for cars and vans. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.3.2022): https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_fi

Garret. Award-Winning E-Turbo Innovation. Garrettmotion. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.2.2022): <https://www.garrettmotion.com/electric-hybrid/garrett-e-turbo/>

Garret. 48V Electric Compressor for Mild Hybrid Vehicles. Garrettmotion. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.2.2022): <https://www.garrettmotion.com/electric-hybrid/garrett-e-turbo/>

Garret. Two-Stage Electric Compressor for Fuel Cell Electric Vehicles. Garrettmotion. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.2.2022): <https://www.garrettmotion.com/electric-hybrid/twostage-electric-compressor-for-fuel-cells/>

Glucker, J. (2018). Here's how Audi uses electric compressors to eliminate turbo lag. Motorauthority. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 2.5.2022): https://www.motorauthority.com/news/1116219_heres-how-audi-uses-electric-compressors-to-eliminate-turbo-lag

Heinrich, M. (2016). Genetic Optimization of Turbomachinery Components using the Volute of a Transonic Centrifugal Compressor as a Case Study. Thesis. Freiberg University of Mining and Technology.

Heywood, J. B. (2018). Internal combustion engine fundamentals. Second edition. New York: McGraw-Hill Education.

Ibaraki, S., Yamashita, Y., Sumida, K., Ogita, H. & Jinnai, Y. (2006). Development of the "hybrid turbo," an electrically assisted turbocharger. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol. 43 (3)

Import Tuner. (2011). Turbocharger fundamentals, Vol. (144), pp. 76–.

Jenckes, C. (2020). E-Turbo Revolution: Electric Turbos Get Real!. Motortrend. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.3.2022): <https://www.motortrend.com/how-to/e-turbo-electric-assist-turbocharger/>

Katrašnik, T., Trenc, F., Medica, V. & Marki, S. (2004). An Analysis of Turbocharged Diesel Engine Dynamic Response Improvement by Electric Assisting Systems. Journal of engineering for gas turbines and power, Vol. 127 (4), pp. 918–926.

Konttinen, J-P. (2019). Tieliikenteen ajokilometreissä edelleen hienoista kasvua. Tietotrendit. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 2.5.2022): <https://www.stat.fi/tietotrendit/artikkelit/2019/tieliikenteen-ajokilometreissa-edelleen-hienoista-kasvua/?listing=simple>

Lehtilä, J. (2017). Laakerityypit ja niiden rakenteelliset erot. Opinnäytetyö. Satakunnan ammattikorkeakoulu.

Martinez-Botas, R., Pesiridis, A. & MingYang, Y. (2011). Overview of boosting options for future downsized engines. Science China Technological Sciences, Vol. 54(2), pp. 318–331.

Millikin, M. (2020). Audi Electric-Powered Compressor gives 2020 Audi S6 and S7 models a boost; 48V MHEV architecture. Green Car Congress. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 2.5.2022): <https://www.greencarcongress.com/2020/03/20200326-audi.html>

Mohon, S., Van Maanen, K., Liu, X., Keller, P. & Griffen, M. (2018). Development of a 48 v P0 Demonstration Vehicle with eBooster® Air Charging. SAE technical paper series.

Nice, K. (2000). How Turbochargers Work. Howstuffworks. Verkkosivu. Päivitetty 9.2.2021. Saatavissa (viitattu 10.2.2022): <https://auto.howstuffworks.com/turbo.htm#pt3>

Nishiwaki, K., Iezawa, M. (2013). Development of high speed motor and inverter for electric supercharger. SAE technical paper series.

Pakarinen, V. (2018). Pakokaasuahtimet Rakenne ja toiminta. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu.

Panting, J., Pullen, K. & Martinez-Botas, R. (2001). Turbocharger motor-generator for improvement of transient performance in an internal combustion engine, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 215(3), pp. 369–383.

Polttoaine.net. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.5.2022): <https://www.polttoaine.net/>

Rantanen, J. (2014). Turboahdinten mitoitus polttomoottorikäytössä. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu.

Ritchie, H & Roser, M. (2020). Electricity Mix. Our World in Data. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.5.2022): <https://ourworldindata.org/electricity-mix>

Sivaraman, M., Aakash, A.S., Bharathiraja, G. & Jayakumar, V. (2018). Design and performance analysis on E-tronic turbocharger to eliminate turbo lag. International Journal of Pure and Applied Mathematics, Vol. 119, pp.15687–15700.

Suomen lähienergialiitto ry. (2018). Etanolipäivityksellä bensiiniauton päästöt pienevät. Lähienergia. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 2.5.2022): <https://lahienergia.org/etanolipaivityksella-bensiiniauton-paastot-pienevat/>

Tavčar, G. & Kutrašnik, T. (2011). Methods for improving transient response of diesel engines – influences of different electrically assisted turbocharging topologies. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D, Journal of automobile engineering, Vol. 225 (9), pp. 1167–1185.

Turbotekniikka. Turboahdin toiminta, Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 2.3.2022): <https://turbotekniikka.fi/turbot/turboahdin-toiminta/>

Woongkul, L., Silong, L., Yingjie, L. & Dheeraj, B. (2017). Overview of Electric Turbocharger and Supercharger for Downsized Internal Combustion Engines. IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 3(1), pp. 36 – 47.

Xue, X. & Rutledge, J. (2017). Potentials of Electrical Assist and Variable Geometry Turbocharging System for Heavy-Duty Diesel Engine Downsizing. SAE technical paper series.