

Opinnäytetyö AMK

Konetekniikka

2023

Daniel Woutilainen

SÄHKÖAVUSTETUN TURBOAHTIMEN VAIKUTUS TYÖKONEDIESEL- MOOTTORIN SUORITUSKYKYYN.



Sähköavustetun turboahtimen vaikutus työkone-dieselmoottorin suorituskykyyn.

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin miten sähköavustetulla turboahtimella varustettu polttomoottori käyttäytyy eri kuormannostotilanteissa sekä sen vaikutusta moottorin suorituskykyyn ja -polttoainetalouteen. Tutkimus tehtiin kokeellisena tutkimuksena vuonna 2022 Turun ammattikorkeakoulun moottori- ja voimalinjalaboratoriossa. Kirjallisuusosio käsittelee dieselpolttomoottorin turboahtamista ja turboahtamiseen liittyviä ongelmia, sekä sitä miten sähköavustettu ahdin pyrkii ratkaisemaan ne.

Tutkimuksessa prototyyppiahtimella ajettiin staattisia- ja dynaamisia koeajoja pyörövirtadynamometriin kytkettynä. Tutkimuksen yhteydessä turbon toiminnasta vastaavan elektronisen moottorinohjausyksikön parametreja paranneltiin ja tutkittiin. Tulosten vertailussa vertailtiin erityyppisten kuormitusajojen tuloksia. Tutkimuksessa ajettiin muuttuvakuormitteisia ajosyklejä ajaen prototyyppiahdinta sähköavustuksella sekä referenssitilassa ilman avustusta.

Sähköavustetulla ahtimella kuormannoston vasteaika parani referenssiin verrattuna. Sähköavustetun ahtimen avulla saavutetaan iskutilavuudeltaan suuremman koneen kuormannostovaste, jolloin voidaan valita pienempi moottorikoko. Pienemmän moottorin myötä kasvihuonepäästöt ja polttoaineenkulutus pienenevät mutta moottorin käyttöalue pysyy hyötysuhteen kannalta paremmilla kierrosalueella.

Asiasanat:Dieselmoottori, sähköturbo

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering

2023 | 24 pages, 16 appendices

Daniel Woutilainen

The effects on engine performance of an electrically assisted turbocharger in non-road diesel engines.

This bachelors's thesis investigated how a combustion engine equipped with an electrically assisted turbocharger would behave in transient load conditions. The research was carried out at Turku University of Applied Sciences Engine and Powertrain Laboratory in 2022. The empirical section discusses turbocharged diesel engines and problems associated with turbocharging as well as how electrically assisted turbochargers shall try to fix them. The experiment was produced by driving both static and dynamic tests with the test motor equipped with an prototype turbocharger. The motor setup was coupled to an eddy current dynamometer. Improvements were made to the engine's electrically controlled parametres to study their affect on engine and turbocharger behaviour. The study was conducted by operating the engine both non-assisted and electrically assisted with replicate operating conditions.

The electrically assisted turbocharger improved response time in transient loads. By downsizing to a smaller capacity engine coupled with an electrically assisted turbocharger both emissions and fuel consumption will be reduced while the engine operates at ideal rpm range in terms of efficiency.

Keywords: Diesel Engine, Electric Turbo

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	6
1 Johdanto	7
2 TYÖKONEMOOTTORIT	8
2.1 Pakokaasupäästöt	9
2.2 Työkonemoottorien haasteet	11
2.3 Työkonemoottorien käyttöprofiili	11
2.4 Elektroninen moottorinohjaus	13
3 DIESELPOLTTOMOOTTORIN TURBOAHTAMINEN	14
3.1 Turboviive	14
3.2 Sakkausraja	16
4 SÄHKÖAVUSTETTU PAKOKAASUTURBOAHDIN	16
4.1 Sähköturboahdin	16
4.2 Vertailevaa tutkimusta	18
5 YHTEENVETO	21
Lähteet	22

Kuvat

Kuva 1. Telapuskukone	8
Kuva 2. Non Road Transient Cycle	10
Kuva 3. LUT tutkimuksessa käytetty kaksivaiheinen ahdin	18
Kuva 4. LUT -tutkimuksessa A.Grönmann et.al käyttämän ahtimen järjestelykaavio	19
Kuva 5. Mercedes-AMG F1 W12 E Performance kauden 2021 auto	20
Kuva 6. Mercedes-AMG F1 W12 E Performance turbojärjestely	21

Taulukot

Taulukko 1. Stage 5 hiukkaspäästörajat	9
Taulukko 2. Erilaisten työkoneiden käyttöprofiilit Suomessa (VTT).	12

Kaaviot

Kaavio 1. Tyypillinen syötönrajoituskäyrä turboahdetulle dieselmoottorille kuormannostilanteessa	17
--	----

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

Sanasto	Lyhenteen selitys
Downsizing	Käyttökohteeseen soveltuvan moottorin iskutilavuuden pienentäminen.
ECU	(Electronic Engine Control Unit) Sähköinen moottorinohjausyksikkö.
EM	Elektronisen moottorinohjausyksikön ohjelmisto (Electronic Engine Management Software).
Entalpia	Energiasisältö.
EU	Euroopan Unioni.
NOx	Typenoksidit.
NRTC	Non-road transient cycle, EU-direktiiviin mukainen työkoneiden dynaaminen päästömittausajosykli.
ppm	Miljoonasosa, parts per million.
Sakkausraja	Ahtimen riittämättömän ilman massavirta suhteessa painesuhteeseen kompressorisiivellä, aiheuttaen turbulenssia.
SFC	Polttoaineen ominaiskulutus (g/kWh).

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin sähköavusteisen turboahtimen vaikutuksia kuormannostotilanteissa työkonedieselmoottorilla. Turboahtamisen esittelyosiossa perehdyttiin turboahtamisen perusteisiin, ahtimen valinnan vaikutuksiin sekä turboahtamisen yleisiin ongelmiin sekä siihen miten niitä on pyritty ratkomaan. Tutkimuksia, jotka käsittelevät sähköavusteista turboahdinta ei ole laajasti julkistettu tieteellisissä julkaisuissa sillä teknologia on uutta. Eteenkään kokeellisesti tehtyjä tutkimuksia on saatavilla rajallisesti ja julkaisut usein pohjautuvat simulointiin. Tämä opinnäytetyö vastaa siihen mitä etuja sähköavustetulla turboahtimella saavutetaan muuttuvan kuormituksen alla eli transienttitilanteissa.

Kokeellisessa osiossa ajettiin sähköavustetulla turboahdinprototyypillä vartustettua työkonedieselmoottoria Kupittaalla Turun ammattikorkeakoulun moottori- ja voimalinjalaboratoriolla yhdistettynä pyörrevirtadynamometriin.

Ajotuloksien perusteella saatuja moottoriteknilisiä arvoja kuten ahtimen vasteaikaa, päästöjä ja ominaiskulutusta verrattiin referenssi- ja avustetun ajojen kesken.

Sähköturboahtamisessa perinteiseen turboahtimeen yhdistetään sähkömoottori-generaattori. Moottori avustaa ahdinta kuormannostotilanteissa etenkin matalilla pyörintänopeuksilla ja sen avulla kerätään talteen huomattavasti hukkaenergiaa joka tavallisesti hukataan perinteisillä ahtamiskeinoilla.

2 TYÖKONEMOOTTORIT

Työkoneiksi määritellään EU:n direktiivin 97/68/EC mukaisesti mikä tahansa polttomoottorilta käyttövoimansa saava liikuteltava teollinen laite tai kulkuneuvo, joka ei ole tarkoitettu henkilöiden tai tavarankuljetukseen tiellä.

Työkonemoottoreille tyypillisiä ominaisuuksia ovat:

- nopea- tai keskinopeakäyntinen dieselmoottori
- turboahdettuja
- elektroninen moottorinohjaus

Työkoneet muodostavat hyvin laajan joukon koneita joista suurinta enemmistöä edustavat Suomessa maatalous- ja maansiirtokoneet.

(Nylund, 2016)



Kuva 1. Telapuskukone (Crawler Dozers, 2022)

2.1 Pakokaasupäästöt

Työkonemoottorien sallittuja hiukkaspäästöjä alettiin rajoittamaan vuonna 1997 EU-direktiivin 97/68/EY astuttua voimaan, jonka jälkeen niitä on asteittain kiristetty. Viimeisen päästörajaluokka Euroopassa on STAGE 5 astunut 2019 asteittain voimaan.

Taulukko 1. Stage 5 hiukkaspäästörajat (DieselNet Technology Guide)

Category	Ign.	Net Power	Date	CO	HC	NOx	PM	PN
		kW		g/kWh				1/kWh
NRE-v/c-1	CI	$P < 8$	2019	8.00	7.50 ^{a,c}		0.40 ^b	-
NRE-v/c-2	CI	$8 \leq P < 19$	2019	6.60	7.50 ^{a,c}		0.40	-
NRE-v/c-3	CI	$19 \leq P < 37$	2019	5.00	4.70 ^{a,c}		0.015	1×10^{12}
NRE-v/c-4	CI	$37 \leq P < 56$	2019	5.00	4.70 ^{a,c}		0.015	1×10^{12}
NRE-v/c-5	All	$56 \leq P < 130$	2020	5.00	0.19 ^c	0.40	0.015	1×10^{12}
NRE-v/c-6	All	$130 \leq P \leq 560$	2019	3.50	0.19 ^c	0.40	0.015	1×10^{12}
NRE-v/c-7	All	$P > 560$	2019	3.50	0.19 ^d	3.50	0.045	-

^a HC+NOx
^b 0.60 for hand-startable, air-cooled direct injection engines
^c A = 1.10 for [gas engines](#)
^d A = 6.00 for [gas engines](#)

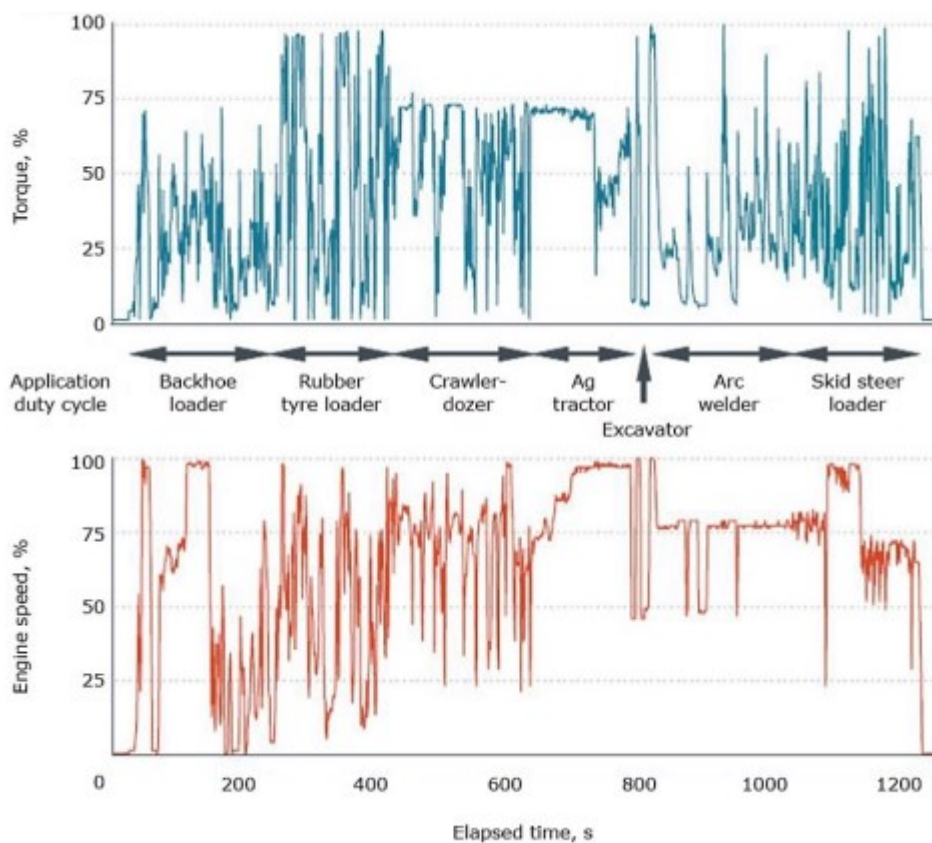
Alati tiukkenevat hiukkaspäästörajat ovat aikaan saaneet tarpeen polttomoottori-innovaatioille. Viimeisin kasvava trendi polttomoottorikehityksessä ovat hybriditeknologiat.

Päästörajat ovat johtaneet pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmien yleistymiseen työkoneissa. Näistä yleisimpiä ovat muun muassa katalyyttisen pelkistämisen urea -ruiskutusjärjestelmät jonka avulla pienennetään ihmiselle haitallisia typenoksidi -päästöjä. (Majewski, W. A., 2018)

Myös polttoaineenruiskutusparametreilla on suuri vaikutus päästöjen syntyyn. Elektronisen polttoaineruiskutusjärjestelmän ruiskutusennakkoa säätelemällä muutetaan palotapahtuman lämmön vapautumista mikä vaikuttaa palolämpötilasta riippuvaisen typinoksidipäästöjen syntyyn.

Turboahdamalla yhdessä välijäähdyttimen kanssa saadaan hyvin sekoittuva polttoaine-ilmaseos jolloin palaminen on tasalaatuista ja epätäydellisestä palamisesta johtuvaa hiilimonoksidia eli häkää syntyy vain vähän. Polttoaineen ruiskutuspainella on myös merkitystä seoksen muodostumisen kannalta vaikuttaen niin ikään tasaiseen palamiseen ja sitä kautta päästöjen muodostumiseen. Korkealla ruiskutuspainella hiilivetypartikkelipäästöt vähenevät.

(Majewski, W. A. & Jääskeläinen, 2021)



Kuva 2. Non Road Transient Cycle (Dallmann, T. & Menon, A., 2016)

NRTC-sykli ajetaan osana dynaamista päästötestausta EU:n STAGE 3 -päästönormin astuttua voimaan.

NRTC -syklillä mitataan erilaisten työkonoiden simuloitujen dynaamisten kuormituskäyttäytymisen vaikutusta moottorin tuottamiin päästöarvoihin. Sykli ajetaan yhteensä kahdesti; kylmä- ja kuumakäynnistyksellä.

Kylmäkäynnistysyölin painoarvoksi asetetaan 10% EU-päästönormeissa. Sykli suhteutetaan moottorin nimellistehoon ja syölin keskiarvoinen kuormittavuus on 37% moottorin täystehosta. Tämän tutkimuksen kokeellisessa osiossa ajettiin muiden ohessa NRTC-syölin.

2.2 Työkonemoottorien haasteet

Käyttöympäristönä matalat ajonopeudet tuovat jähdytykselle haasteita.

Moottorin- ja oheistoimilaitteiden jähdyttimet sekä turboahtimen välijähdyttimien vaatima jähdytyspinta-ala vievät paljon tilaa konehuoneesta kuin myös jälkikäsitteilyjärjestelmät ja urea-ruiskutusjärjestelmien tankit.

Järjestelmissä käytetty urealiuoksen jätymislämpötila on vain -11 Celciusta jolloin urea-tankki täytyy olla lämmitetty kylmemmissä käyttömaissa, konetilan kustannuksella.

(Majewski, W. A., 2018)

2.3 Työkonemoottorien käyttöprofiili

Tyypillistä työkonoiden moottorikuormitusprofiileissa on suurten tehojen tarve erityisesti transienttikuormituksessa eli kuormannostotilanteissa.

(Terdich, N., 2015)

Sähköavustetun pakokaasuahhtimen hyödyt tulevat esille nimenomaan transienttitilanteissa.

Taulukko 2. Erilaisten työkoneiden käyttöprofiilit Suomessa (VTT).

Työkonetyyppi	Pyörimisnopeusalue		Keskimääräinen kuormitus			Vuotuinen käyttöaika tuntia/a	Keski-ikä vuotta
	Laaja	Suppea	Matala	Vaihteleva	Korkea		
Traktorit						600	
- Maanmuokkaus ja kylväminen		x		x	x		
- Etukuormaajakäyttö	x		x	x			
Leikkuupuimurit		x		x	x	80	15
Metsäkoneet							
- Metsätraktori	x			x		2000	7
- Harvesteri		x	x	x		2000	5
Maansiirtokoneet							
- Kaivinkone		x		x		1500	15
- Pyöräkuormaaja	x			x		1400	15
- Dumpperi	x			x		1600	15
Murskaimet ja hakkurit		x	x	x	x		
Satamakoneet						6000	4
- Lukki/Kurottaja	x	x		x			
- Terminaalitraktori	x			x			
Haarukatrukit	x		x	x	x	2000	15
Kaivoskoneet	x	x	x	x	x		
Kiinteistötraktorit	x		x	x		1000	7

Taulukosta 2 nähdään että valtaosassa työkoneista kuormitus on keskimääräisesti vaihtelevaa, jolloin sähköavusteisesta turboahtimesta hyödyttäisiin.

2.4 Elektroninen moottorinohjaus

Elektronisella moottorinohjauksella ohjataan moottorin käyntiä sääteleviä toimilaitteita. Dieselmootoreissa moottorinohjain säätelee polttoaineruiskutuksen parametrejä kuten määrää ja ajoitusta, ahtamisen parametrejä kuten ahtopainetta ja hukkaportin asentoa sekä on vastuussa jälkikäsitteilylaitteistojen toiminnalle kriittisestä pakokaasulämmönsäätelystä. (Jääskeläinen, 2019)

Yleisimpiä ruiskutuksen säätöparametreja ovat ahtopainetta seuraavia polttoainesyötönrajoitteita. (Terdich, N., 2015)

Pakokaasun lämpötilaa voidaan keinotekoisesti nostaa alhaisilla kierrosnopeuksilla säätelemällä kaasuläppää (Jääskeläinen, 2022).

Elektronin moottorinohjain on vastuussa moottorin optimaalisesta toiminnasta varmistaen samanaikaisesti että päästöarvot pysyvät sallituissa rajoissa.

Moottorinohjain saa tietoa moottorilta erilaisten anturien ja toimilaitteiden avulla. Nykyaikaisessa elektronisessa moottorinohjainjärjestelmässä lähes jokaista parametria voidaan säädellä. Parametrejä voi yhteensä olla monia tuhansia.

Sähköavustetun ahtimen tapauksessa on intergoitava moottorinohjaukseen sen toimintaa säätelevät parametrit kuten millä kuormitusalueilla turboa avustetaan sähkövirralla ja kuinka paljon, sekä miten tämä vaikuttaa hukkaportin ja kaasuläpän säätöparametreihin.

3 DIESELPOLTTOMOOTTORIN TURBOAHTAMINEN

Ahtamisella tarkoitetaan moottorin imuilman paineistamista mikä kasvattaa ilman tiheyttä jolloin hapen määrä työkierron aikana kasvaa. Huomattavasti laajimmin käytetty ahtamismenetelmä on pakokaasuahdin jossa palamisreaktion pakokaasun hukkaenergialla pyöritetään turbiinia. Turboahdin koostuu kahdesta pääosasta jotka ovat turbiini- ja kompressorin. Kompressorissa imuilma puristetaan kasaan ja syötetään palotilaan. Ilman kokoon puristaminen kasvattaa sen lämpötilaa joka on epäedullista hyötysuhteelle. Ongelma saadaan ratkaistua jäähdyttämällä ahdettu imuilma välijäähdyttimellä.

3.1 Turboviive

Turboviive aiheutuu etenkin matalilla käyntinopeuksilla kun kuormituksen lisääntyessä tarvitaan lisää ahdettua ilmaa palotilaan mutta matalien pakokaasulämpötilojen takia paineenkeruu on hidasta ja turbiini pyrkii vasta voittamaan oman inertiansa. Pakokaasun entalpia on huono erityisesti matalilla kierroksilla. (Rakopoulos, 2009)

Turboviiveen voittamiseen on käytännössä kolme eri keinoa:

1. ruiskutuksen säätely
2. moottorin kaasunvaihdon optimointi ja nopeuttaminen, ahtimen valinta ja pako- ja imusarjojen muotoilu
3. voimansiirron vaihteiden lukumäärän kasvatus

(Rakopoulos, Giakoumis 2009)

Turboviive on niin ikään haitallinen ilmiö koneen käyttäjäystävällisyydelle. Turboviivettä pyritään kiertämään valitsemalla pienempi ahdin, mikä johtaa pumppaushäviöihin. Turboviive asettaa myös ehdottoman rajan kuinka paljon downsizing -ilmiötä voidaan käyttää. (Terdich, N., 2015)

Dieselmoottorin tehonpyynnin haasteena on dieselmoottorille ominaisen laihaista polttoaine- ja ilmaseossuhteesta johtuen tarpeellisen hapen määrän saaminen palotilaan (Jääskeläinen, H. & Khair, M., 2022).

3.2 Sakkausraja

Turboahdamista rajoittaa ilmiö nimeltä sakkaus jossa ahtimen kompressorissa tapahtuu paineen nopeaa heiluntaa mistä aiheutuva värinä voi muun muassa johtaa ahtimen hajoamiseen. Etenkin transientikuormitustilanteissa, moottorin nimellistehoalueella vaihtelevat kuormitukset aiheuttavat sakkausta.

(Terdich, N., 2015)

Näitä kuormitusalueita nimitetään sakkausrajaksi. Sakkausraja käsitteenä ei kuitenkaan ole täysin yksiselitteinen (Kerres, B. 2017)

Ruiskutus- ja ahtopaineparametrejä säätelämällä voidaan minimoida sakkaustilanteen riskit. Sakkausta voidaan välttää pääosin kompressorin ja turbiinin oikealla mitoituksella.

Väistämättä myös materiaali- ja turvarajoitteet rajoittavat ahtimen suurinta todellista ahtopainetta. Sähköturboahdinten avulla voidaan nopeasti jarruttaa ja säädellä kompressoria ja hukkaporttia jolloin mahdollisissa sakkausrajatilanteissa saadaan rauhoitettua turboahdin tarkasti ja nopeasti.

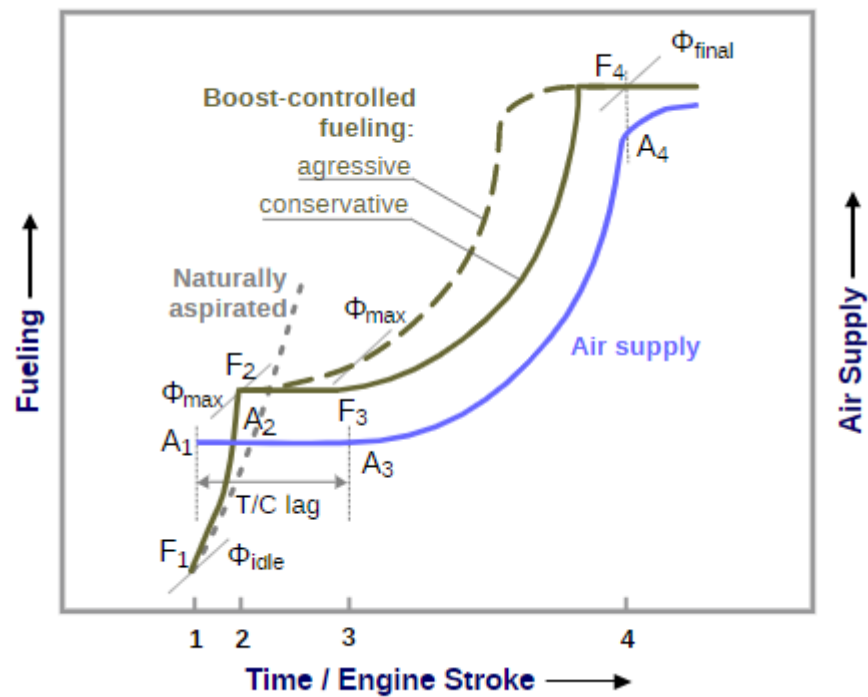
4 SÄHKÖAVUSTETTU PAKOKAASUTURBOAHDIN

4.1 Sähköturboahdin

Sähköturboahtamisessa perinteiseen turboahtimeen yhdistetään sähkömoottori-generaattori. Moottori avustaa turboa kuormannostotilanteissa etenkin matalilla pyörintänopeuksilla. Kompressoria voidaan myös jarruttaa ja siten kerätä talteen huomattavasti hukkaenergiaa joka tavallisesti hukataan perinteisillä ahtamiskeinoilla.

Matalilla kierrosnopeuksilla matalat pakokaasulämpötilat ja kaasuvaihdon tilavuusvirrat merkitsevät alhaisempaa kaasuentalpiaa joka rajoittaa ahtimen tehoa perinteisillä ahtimilla. Sähköavusteinen ahdin on niin ikään matalilla kierroksilla edullinen sillä sen maksimiteho ei ole pakokaasun entalpiasta riippuvainen (Rakopoulos, C.,D. & Giakoumis, E.,G., 2009). Perinteisen ahtimen kompressorin hyötysuhde on matalilla kuormitusalueilla tavallisesti huonompi. Turboviiveen voittamiseen sähköavustettu ahdin on tällä hetkellä tehokkain saatavilla oleva ratkaisu.

Sähköavustetulla ahtimella voidaan säädellä tarkasti ahtopainetta sekä ahtopainetavoitteen vaikutusaikaa. Käytännössä turboahdetun dieselmoottorin kuormannostoaikaa hidastavat useat järjestelmäviiveet, kompressorin sakkausraja sekä polttoaineensyöttörajat joita päästöarvojen takia rajoitetaan (Rakopoulos, C.,D. & Giakoumis, E.,G., 2009).



Kaavio 1. Tyypillinen syötönräjoituskäyrä turboahdetulle dieselmoottorille kuormannostotilanteessa (Jääskeläinen, 2016)

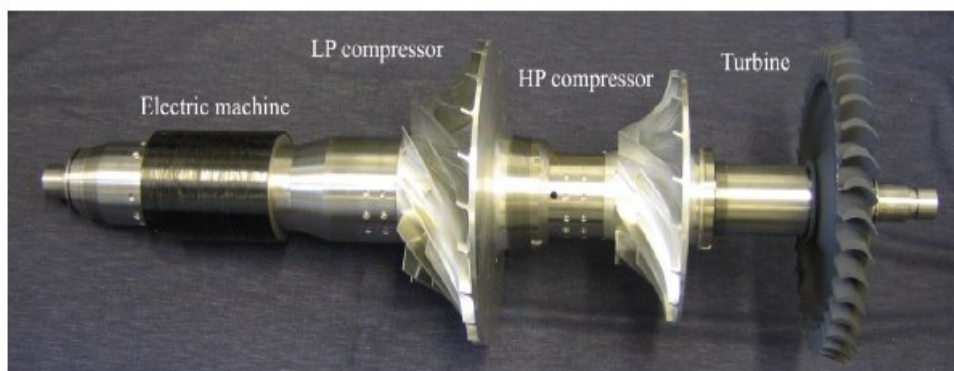
Kaaviosta 1 nähdään ruiskutuksen säädön vaikutuksia turboahdetulla moottorilla verraten vapaasti hengittävään. Ahtamalla saadaan käytettyä enemmän polttoainetta työkiertoa kohti.

4.2 Vertailevaa tutkimusta

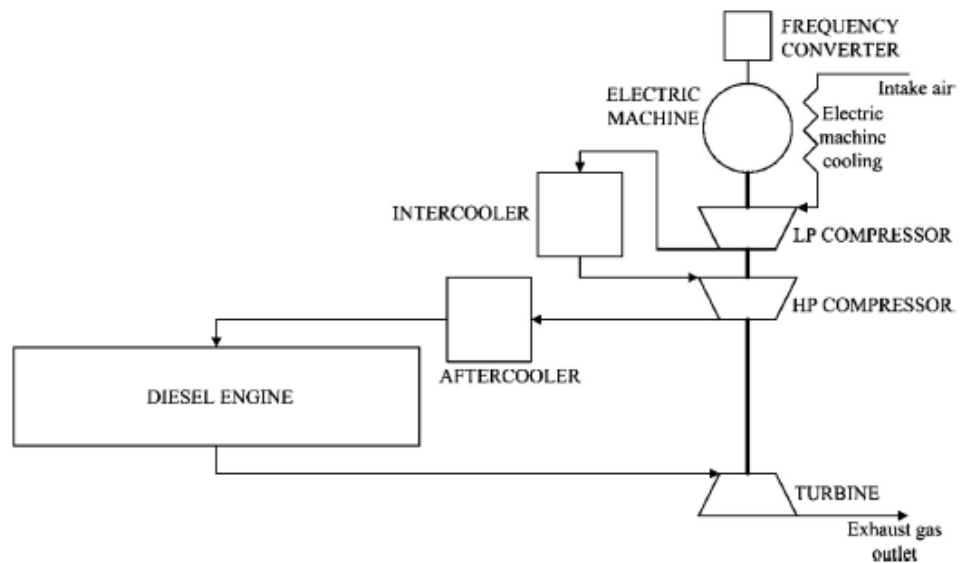
Sähköavusteisia pakokaasuturboahtimia on ollut käytössä monissa eri käyttösovelluksissa.

Tutkimusta aiheesta on kuitenkin rajatusti ja kokeellisia tuloksia julkaistu vähän.

Wärtsilä Finland Oy ja LUT-yliopiston tutkimuksessa tutkittiin eräänlaista sähköavustettua kaksivaiheista ahdinta meridieselmoottorissa jossa konfiguraationa on siipiturbiini-kompressorit yhdellä akselilla.



Kuva 3. LUT tutkimuksessa käytetty kaksivaiheinen ahdin (LUT)



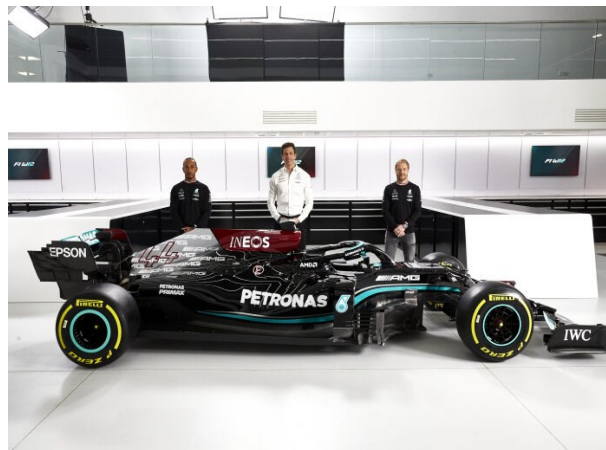
Kuva 4. LUT -tutkimuksessa A.Grönmann et.al käyttämän ahtimen järjestelykaavio

LUT -tutkimuksessa havaittiin moottorin SFC -pieneneminen korkeilla kuormituksilla kun turbiini oli optimaalisella käyttöalueella.

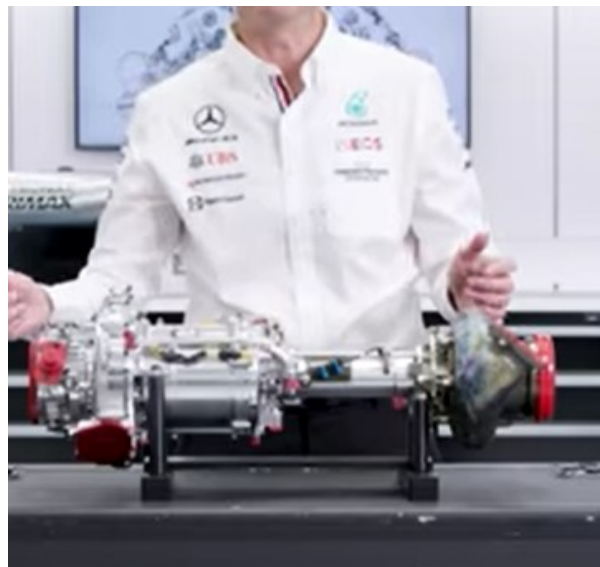
Kuitenkin meriliikennekäytössä moottorit toimivat valtaosin staattisilla kuormitusalueella jolloin sähköavutetun ahtimen hyödyt jäävät vähäisiksi.

Sähköavusteinen turboahdin on ollut käytössä myös kuvassa 5 esitellyssä Mercedes-Benz kauden 2021 F1-autossa. Kuvassa 6 on esitelty Mercedesin sähköturboahtimen järjestely. Kyseisellä ahdinjärjestelyllä saavutettiin arviolta 5% kokonaislämpöhyötysuhteen paraneminen moottorilla.

(Hywell, T., Mercedes-AMG, 2022)



Kuva 5. Mercedes-AMG F1 W12 E Performance kauden 2021 auto (lehdistöjulkaisu, 2021)



Kuva 6. Mercedes-AMG F1 W12 E Performance turbojärjestely (näytönkaappaus, tekninen esittelyvideo, 2022)

5 YHTEENVETO

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää sähköturboahtimen hyötyjä kuormannostotilanteessa perinteiseen ahtimeen verraten.

Ajetuissa koeajosykleissä huomattiin selkeä ero avustetun ahtimen vasteella vääntömomenttipyyntiarvoon referenssiahtimeen verrattuna.

NRTC -testisykli osiossa huomattiin että sähköturboahdin otti talteen huomattavan määrän energiaa monen eri työkoneiden käyttöprofiileilla. Koko syklin yli energiatase parani ja sähköenergiaa jäi ylijäämää mikä voidaan varastoida akkujärjestelmään.

Sähköavusteisesta ahtimesta suurin saatu hyöty oli nopeissa kuormannostoissa matalilla kierrosnopeuksilla.

Jatkotutkimuksen kohteina olisi tutkia miten sähkömoottorin kytkentä ja asettelu vaikuttaa sen hyötysuhteeseen sekä akkuteknologioiden huomioiminen sähköturbohybridi -ratkaisuissa.

Lähteet

Jääskeläinen, H., & Khair, M. K. (2022) Turbocharger Fundamentals. DieselNet Technology Guide, https://dieselnet.com/tech/air_turbocharger.php#energy

EU: Nonroad Engines (2021). DieselNet Technology Guide, <https://dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php#s5>

Jääskeläinen, H (2020). Diesel Exhaust Gas, DieselNet Technology Guide, https://dieselnet.com/tech/diesel_exh.php#intro

Rakopoulos, C.D & Giakoumis, E. G. (2009). Diesel Engine Transient Operation.

Terdich, N. (2015). IMPACT OF ELECTRICALLY ASSISTED TURBOCHARGING ON THE TRANSIENT RESPONSE OF AN OFF-HIGHWAY DIESEL ENGINE.

EU-direktiivi 97/68, 1997 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31997L0068>

Jääskeläinen, H., & Khair, M. K. (2022) Controls for Modern Engines. DieselNet Technology Guide, <https://dieselnet-com.ezproxy.turkuamk.fi/tech/control.php#ci-ctrl>

Grönman A., Sallinen, P., Honkatukia, J., Backman, J., Uusitalo, A. (2016).

Design and experiments of two-stage intercooled electrically assisted turbocharger. Lappeenranta-Lahden teknillinen yliopisto.

Nylund, N., Söderena, P. & Rahkola, P. (2016).

Työkoneiden CO₂ päästöt ja niihin vaikuttaminen. VTT Teknologian tutkimuskeskus, <https://www.ym.fi/download/noname/%7BEC3AFE90-B3FC-446B-90C3-4A8B253B4256%7D/125900>

Jääskeläinen, H., & Khair, M. K. (2022). Combustion in Diesel Engines. DieselNet Technology Guide, https://dieselnet-com.ezproxy.turkuamk.fi/tech/diesel_combustion.php#components

(2022) Crawler Dozers. <https://www.constructionequipment.com/crawler-dozers>

Mercedes-AMG (2021) "Introducing W12, the Mercedes-AMG Petronas F1 Team's 2021 challenger!". <https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/instance/ko.xhtml?oid=49140875&filename=Formula-One-Launch-of-the-Mercedes-AMG-F1-W12-E-Performance>

Power Unit 101 with PETRONAS: Turbocharger, EXPLAINED! (2022)

<https://www.youtube.com/watch?v=kx6JgiqmmkQ>

Majewski, W.A. & Jääskeläinen, H. (2023). Engine Emission Control. DieselNet Technology Guide, https://dieselnet-com/tech/engine_emission-control.php#enec

Jääskeläinen, H. (2020) Exhaust Gas Thermal Management. DieselNet Technology Guide, https://dieselnet-com.ezproxy.turkuamk.fi/tech/engine_thermal-management.php

Majewski, W.A (2018). Urea Dosing and Injection Systems. DieselNet Technology Guide, https://dieselnet-com./tech/cat_scr_diesel_urea_dosing.php)

Dallmann, T. & Menon, A. (2016) Technology pathways for diesel engines used in non-road vehicles and equipment, International Council on Clean Transportation (ICCT). https://theicct.org/sites/default/files/publications/Non-Road-Tech-Pathways_white-%20paper_vF_ICCT_20160915.pdf

Bertrand Kerres (2017)
On Stability and Surge in Turbocharger Compressors. <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1093727/FULLTEXT01.pdf>