

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Sähköisen turboahtimen suorituskyky ja taloudellinen
kannattavuus polttomoottoreissa

The performance and the economic viability of an
electronically assisted turbocharger

Työn tarkastaja: Aki Grönman

Työn ohjaaja: Aki Grönman

Lappeenranta 30.1.2018

Ville-Petteri Paavilainen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Ville-Petteri Paavilainen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Aki Grönman

Kandidaatintyö 2018

30 sivua, 5 kuvaa, 6 taulukkoa ja 1 liite

Hakusanat: Sähköavusteiset turboahtimet, sähköinen turboahdin, eTurbo, eBooster

Tässä kandidaatintyössä esitellään sähköavusteisten turboahdinten suorituskykyä ja taloudellista kannattavuutta polttomoottoreissa. Sähköavusteinen turboahdin on laite, jossa tavallisen kompressorin ja turbiinin yhteyteen on kytketty suurnopeussähkökone, jolla voidaan kiihdyttää kompressoria ja tuottaa sähköenergiaa turbiinista.

Sähköavusteisen suurin etu tavalliseen turboahtimeen verrattuna on sen kyky tuottaa sähköenergiaa niistä ylimääräisistä pakokaasuista, jotka tavallisessa turboahtimessa poistuisivat hukkaportin kautta. Tätä tuotettua sähköenergiaa voidaan käyttää kompressorin pyörittämiseen pienemmillä kuormilla ajettaessa ja jossakin tapauksessa sähköavusteisella turboahtimella voidaan poistaa tarve erilliselle sähköntuotantoon tarkoitettulle generaattorille.

Sähköavusteisilla turboahtimilla on saavutettu selkeitä positiivisia vaikutuksia polttomoottoreiden suorituskykyyn ja hyötysuhteeseen. Moottorin toiminta alhaisilla kuormilla ajettaessa on parantunut nostaen hyötysuhdetta ja pienentäen polttoaineenkulutusta. Pienentynyt polttoaineenkulutus vähentää tuotettujen NO_x ja CO₂ päästöjen määriä, ja pienentää polttoainekustannuksia.

Investointi sähköavusteiseen turboahtimeen tulee kannattavaksi, kun polttoainekustannusten pienemisestä johtuva säästö tulee investointikustannuksia suuremmaksi. Tämän hetkisten tutkimusten perusteella alkuperäinen polttoaineenkulutus tulisi olla suuri, jotta saavutettava euromääräinen säästö olisi tarpeeksi suuri.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Turboahntimen toiminta JA Rakenne	6
3 Sähköiset turboahntimet ajoneuvoissa ja sähkögeneraattoreissa	9
3.1 Henkilöautot	9
3.2 Laivaliikenne	11
3.3 Moottoriurheilu	11
4 Kehitteillä ja markkinoilla olevia sähköisiä turboahntimia	13
5 Saavutettavissa olevia arvoja nykyaikaisille sähköisille turboahntimille	14
6 Sähköisten turboahntinten taloudellinen kannattavuus	18
6.1 Henkilöautot	18
6.2 Diesel generaattorit.....	21
6.3 Laivat.....	22
7 Yhteenveto	24
Lähdeluettelo	25
Liite 1 Dieselgeneraattoreiden arvioituja polttoaineen kulutuksia	28

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

H	Polttoaineen hinta [€/l]
L	Ajettu matka [km]
S	Säästetty summa [€]
T	Käyttötunnit [h]
x	Polttoaineen säästö [%]
y	Polttoaineen kulutus [l/h]
z	Polttoaineen kulutus [l/100km]

Lyhenteet

VG	Variable geometry (muuttuvageometrinen)
MHI	Mitshubishi Heavy Industries
Gal	Gallona
rpm	Kierrosta minuutissa

1 JOHDANTO

Päästöihin sidotut maksut aiheuttavat suuren kuluerän teollisuudelle, lento- ja laivaliikenteelle. Päästöjen vähentämiseen on tavoiteltu kustannustehokasta ratkaisua, joka olisi helppo integroida jo olemassa oleviin polttomoottoreihin. Parantamalla nykyisten polttomoottoreiden hyötysuhdetta saataisiin parempi hyöty käytetylle polttoainemäärälle.

Sähköisten turboahdinten hyötysuhdetta parantava vaikutus tarjoaa mahdollisuuksia polttomoottoreiden hyötysuhteiden parantamiseen ilman koko moottorin päivittämistä. Tämä tarjoaa laivaliikenteelle yhden ratkaisun päästömaksujen pienentämiseen. Sähköinen turboahdin parantaa polttomoottorin toimintaa, joka taas mahdollistaa iskutilavuuden pienentämisen ja näin ollen sen käyttäminen vähentää polttoaineen kulutusta.

Tämän Kandidaatintyön tavoitteena on esitellä sähköisten turboahdinten rakennetta ja toimintaperiaatetta pääpiirteittäin, sekä esitellä nyt jo markkinoilla olevien sähköisten turboahdimien saavuttamia arvoja ja niiden vaikutusta polttomoottorien hyötysuhteeseen. Lopuksi saaduilla arvoilla on tarkoitus selvittää sähköisten turboahdinten taloudellinen kannattavuus erinäisissä tilanteissa.

2 TURBOAHTIMEN TOIMINTA JA RAKENNE

Normaali turboahdin on perusrakenteeltaan melko suoraviivainen. Turboahdin koostuu kahdesta pääkomponentista, turbiinista ja kompressorista. Turbiinin ja kompressorin yhdistää niiden välinen akseli, joka mahdollistaa voimansiirron turbiinista kompressoriin. Polttomoottoreissa turbiini sijoitetaan moottorin pakopuolelle ja kompressori sijoitetaan imupuolelle.

Turbiinin tehtävä on tuottaa energiaa kompressorin varten, tämä energia aikaansaadaan polttomoottorista poistuvien pakokaasujen avulla. Turbiinin lävitse kulkiessaan kuumien pakokaasujen lämpötila ja paine laskevat niiden luovuttaessa energiaa. Tämä pakokaasujen tekemä työ aiheuttaa turbiinin pyörimisen. Kompressorin tehtävä taas puolestaan on paineistaa moottoriin sisään menevää ilmaa. Ilman kulkiessa kompressorin lävitse kompressori tekee työtä puristaakseen ilman pienempään tilaan. Tähän kompressori saa energian turbiinilta niitä yhdistävän akselin välityksellä.

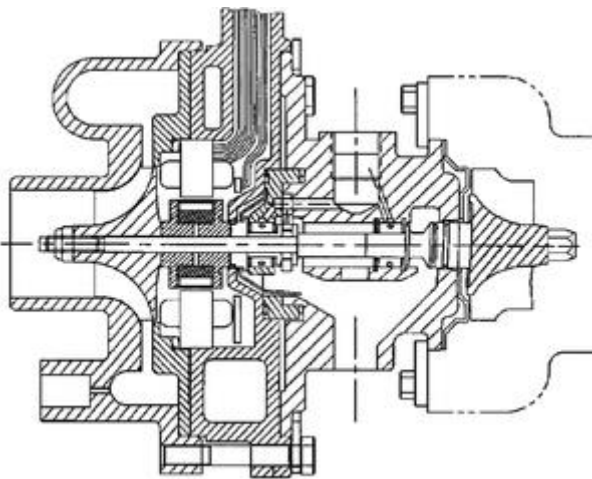
Turboahdimissa ongelmia syntyy matalalla kuormalla ajettaessa, kun pakokaasujen virtaus ei yllä turbiinin tarvitsemalle tasolle. Tällöin turbiini ei pysty luovuttamaan tarpeeksi energiaa kompressorin pyörittämiseksi ja tällöin kompressori ei pysty paineistamaan imuilmaa tarpeeksi suureen paineeseen. Tähän ongelmaan ratkaisuna on tuoda energiaa kompressorille jotain muuta kautta.

Sähköavusteisessa turboahdimessa tämä ongelma on ratkaistu mahdollistamalla sähköenergian käyttö kompressorin pyörittämiseksi. Tämä tarvittava sähköenergia voidaan tuoda kokonaan polttomoottorin ulkopuolelta tai sitten pakokaasujen luovuttavaa ylimääräistä energiaa voidaan varastoida sähköenergiaksi ja käyttää tarvittaessa hyödyksi kompressorin pyörittämiseksi.

Yksinkertaisin sähköinen turboahdin on radiaalikompressori, joka yhdistetään sähkömoottoriin. Tämän ratkaisun tarkoitus ei ole korvata pakokaasuahdinta. Sähköinen kompressori kytketään sarjaan tavallisen kompressorin kanssa ilman niitä yhdistävää akselia, eli kummankaan kompressorin toiminta ei ole riippuvainen toisesta. Tämänkaltaista sähköistä kompressoria on tarkoitus käyttää vain polttomoottorin käynnistysvaiheessa, kun pakokaasujen virtaus ei ole riittävä pyörittämään tavallista ahdinta, sähköinen ahdin siis lopettaa toimimisen, kun moottori saavuttaa halutut

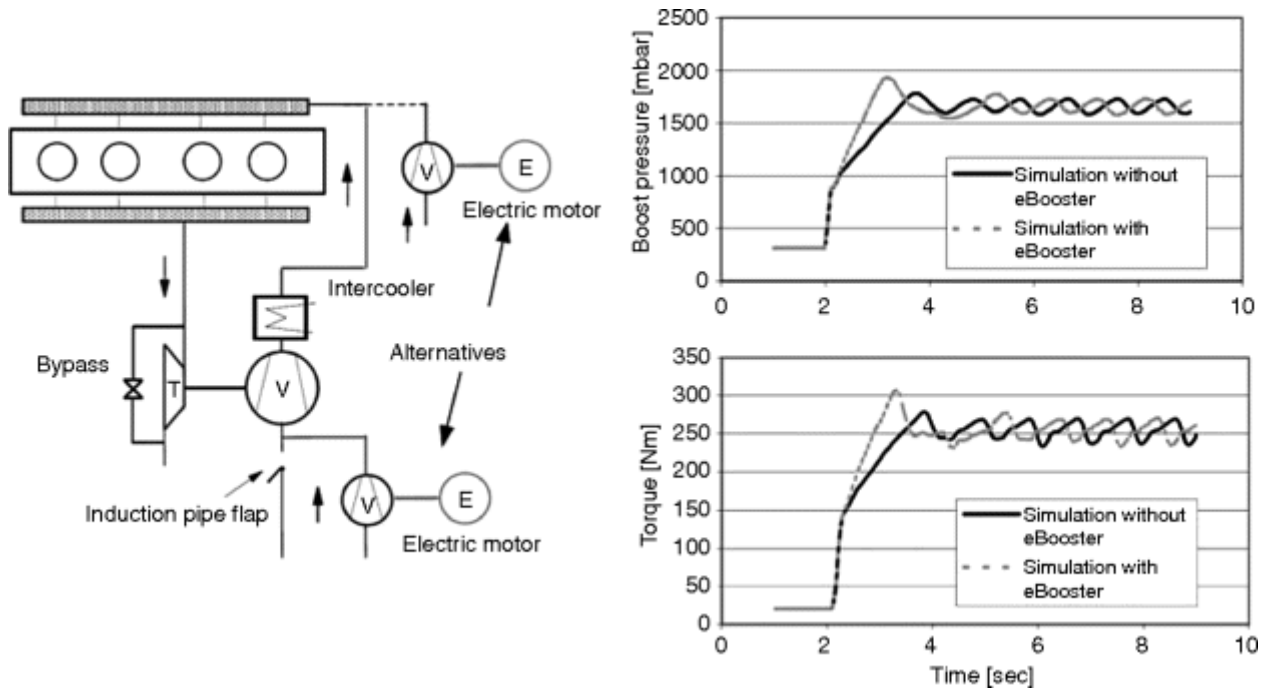
käyntiarvot. Markkinoilla tällaista sähköahdinta kutsutaan esimerkiksi mallinimellä eBooster. Kuvassa 2 on esitelty eBoosterin vaikutus polttomoottorin käynnistysvaiheeseen. (Mollenhauer Klaus & Tschöke helm.2010.54)

Rakenteeltaan ja toiminnaltaan monimutkaisempaa sähköistä turboahdinta kutsutaan kirjallisuudessa sähköavusteiseksi- tai hybriditurboahtimeksi. Tässä ratkaisussa polttomoottoriin ei ole lisätty ylimääräistä ahdinta normaalin pakokaasuahdinten lisäksi vaan kompressorin on liitetty suurnopeussähkömoottoriin, joka mahdollistaa kompressorin pyörittämisen sähköenergian avulla. Tämän sähkömoottorin avulla on myös mahdollista muuntaa pakokaasujen kautta poistuvaa hukkaenergiaa sähköksi, joka normaalissa turbiinissa kulkisi turbiinin ohitse ahtopaineen kasvaessa liian suureksi. Näin ollen hukkaportin kautta poistuvien ylimääräisen pakokaasuvirtauksen energia ei mene hukkaan vaan se saadaan käytettyä hyödyksi, muuttamalla se sähköenergiaksi, jota voidaan varastoida akkuihin ja käyttää tarvittaessa. Hybridi-turboahtimeella voidaan nopeuttaa polttomoottorin käynnistymistä ja ylläpitää tasaista käyntiä pienellä kuormalla ajettaessa käyttäen hyödyksi tuota akkuihin varastoitua sähköenergiaa.



Kuva 2.1. sähköisesti avustettu turboahdin, Lähde: Handbook of Diesel Engines,2010,54

Kuvassa 1 on esitetty sähköavusteisen turboahdinten rakennekuva, jossa on näkyvissä kompressorin, turbiinin ja niitä yhdistävällä akselilla oleva suurnopeussähkömoottori.



Kuva 2.2 eBooster ja sen vaikutus käynnistysvaiheessa, Lähde: Handbook of Diesel Engines,2010,54

Kuvassa 2 on nähtävissä eBoosterin aikaansaama muutos polttomoottorin vääntömomentin ja ahtopaineen kasvuun sen käynnistysvaiheessa. Kuvajissa eBoosterille simuloituja arvoja on verrattuna tavalliseen polttomoottoriin, jossa ei ole sähköistä turboahdinta.

3 SÄHKÖISET TURBOAHTIMET AJONEUVOISSA JA SÄHKÖGENERAATTOREISSA

Turboahdettuja polttomoottoreita käytetään energiantuotannossa ja liikenteessä todella laajalla skaalalla ja suuressa määrin. Periaatteessa jokainen näistä turboahdetuista polttomoottoreista olisi mahdollinen käyttökohde sähköavusteiselle turboahtimelle. Moottoreissa tarkoituksena on kuitenkin tuottaa mahdollisimman paljon energiaa mahdollisimman pienellä polttoaineenkulutuksella.

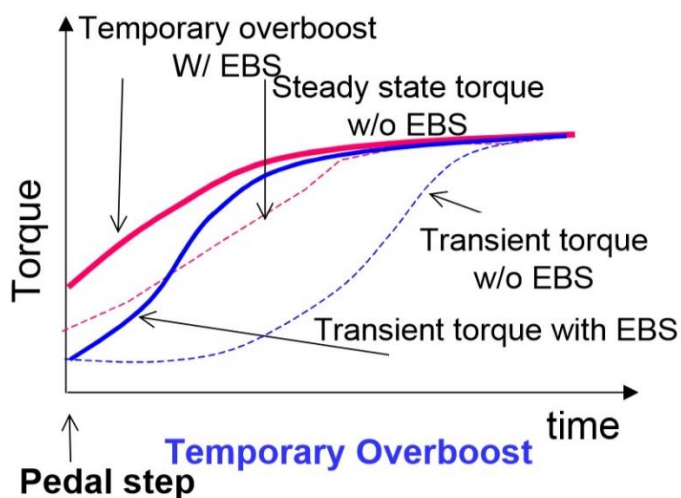
3.1 Henkilöautot

Tällä hetkellä Euroopassa on tieliikennekäytössä noin 37 miljoonaa dieselkäyttöistä henkilöautoa ja diesel autojen osuus kaikkien autojen myynnistä onkin noussut noin 50%. (Transport and Environment) Turboahtamalla dieselmoottori voidaan saavuttaa sille 30-50 % parannus polttoaineen kulutuksessa, tämän takia suurin osa näistä dieselkäyttöisistä ajoneuvoista onkin varustettu turboahtimella. (S Arnol, C Balis, P Parthelet) Turboahtimen ansiosta nousseen moottorin suorituskyvyn takia voidaan käyttää pienemmällä iskutilavuudella olevia moottoreita ilman moottorin suorituskyvyn laskemista. Tämä mahdollistaa polttoaineenkulutuksen pienenemisen ja näin ollen päästöjen vähentymisen, mutta kuitenkin yksityisautoilussa sähköisellä turboahtimella saavutettava hyöty tuotettujen päästöjen vähenemisessä jää pieneksi, jos huomioidaan vain yksittäinen henkilöauto. Maailman mittaluokassa, jossa henkilöautojen määrä on monia kymmeniä miljoonia, yhteensä saavutettavissa oleva päästöjen väheneminen on jo huomattava. Suomessa rekisteröityjä henkilöautoja oli 3,3 miljoonaa kappaletta vuonna 2016. (Tilastokeskus)

Henkilöautoissa pakokaasuahtimilla on tyypillisenä ominaisuutena pieni viive niiden toiminnassa, eli ”turbo lag”, joka tarkoittaa kulunutta aikaa alkaen siitä, kun kaasupoljinta painetaan ja päättyen siihen, kun ahdin on saavuttanut toimintapisteen. Tämän viiveen aiheuttaa hidas pakokaasujen virtauksen kasvu suhteessa turbiinin tarvitsemaan virtaukseen. Liian pienellä massavirralla turbiini ei pysty pyörittämään kompressoria tarpeeksi suurella pyörimisnopeudella, jotta se pystyisi paineistamaan moottoriin sisään menevän ilman moottorin tarvitsemalle tasolle. Pakokaasujen massavirran saavutettua

tarvittavan tason on kompressorin pyörimisnopeus riittävän suuri paineistamaan imuilman moottorin tarvitsemalle tasolle.

Sähköavusteisessa turboahtimessa kompressoria pyörittää pakokaasupuolen turbiinin lisäksi sähkömoottori. Sähkömoottorilla voidaan kiihdyttää kompressorin pyörimisnopeus tarvittavalle tasolle, nopeammin kuin pelkästään pakokaasujen virtauksenkasvu turbiinin lävitse sen mahdollistaisi. Sen ansiosta sylinteriin kulkeutuu nopeammin enemmän ilmaa, moottori käy tasaisemmin ja turbon viive pienenee huomattavasti. Tämä nostaa moottorista saatavaa tehoa, pienentää polttoaineen kulutusta ja vähentää vaihteiden vaihtamisen tarvetta. Näin ollen henkilöauto olisi mahdollinen käyttökohde sähköavusteiselle turboahtimelle. (Ahl, Grimdal.2016)



Kuva 3.1. Turbolag Sähköavusteisella- ja pakokaasuahkimella. Lähde: Craig Balis, 2003, 2

Moottoreiden ominaistehon kasvaessa, nousee myös sähköavusteisella turboahtimella talteen saatava sähköenergia. Tätä sähköenergiaa voidaan hyväksikäyttää parhaiten tilanteeseen sopivalla tavalla.

3.2 Laivaliikenne

Laivaliikenteessä päästöt muodostavat suuren kuluerän polttoainekustannuksien lisäksi. Jatkuvasti kiristyvät päästörajoitukset pakottavat laivayhtiöt miettimään vaihtoehtoisia tapoja näiden päästöjen pienentämiseksi. Mitattavia päästöjä ovat SO_x, eli rikkipäästöt, NO_x eli typpipäästöt, ja CO₂ eli hiilidioksidi päästöt. Rikkipäästöjen määrä korreloi suoraan poltetun polttoaineen määrään ja sen rikkipitoisuuden määrään, yksinkertaisin keino olisi tietysti käyttää rikitöntä tai vähärikkistä polttoainetta, mutta tässä taas tulee eteen kustannukset, matalarikkisempi polttoaine on kalliimpaa, kuin korkearikkisempi polttoaine. (C Wang, J Corbett)

Laivaliikenteessä rahtilaivat kulkevat yleensä pitkiä matkoja ja tällöin moottori käy pääasiassa tasaisella nopeudella, ilman jatkuvaa moottorin tehon nostoa ja laskua. Tällöin sähköenergiaa kannattaa käyttää myös muuhunkin kuin vain kompressorin pyörittämiseen. Esimerkiksi ylimääräistä sähköenergiaa pystytään syöttämään laivan sähköverkkoon niin paljon, että diesel käyttöisen sähkögeneraattorin ajamisen tarve vähenee ja mahdollisesti poistuu lähes kokonaan, ainakin matka-ajossa. Ylimääräisen sähkögeneraattorin käyttäminen laivan sähköntuotantoon lisää, polttoaineen kulutusta ja näin ollen myös kasvihuonekaasupäästöjä. (nyk) (MHI)

3.3 Moottoriurheilu

Moottoriurheilu olisi oivallinen käyttökohde ja hyvä paikka tehdä tutkimusta sähköavusteisilla turboahdimilla. Tallien vuosittaiset budjetit ovat todella suuria ja puitteet tieteelliselle tutkimukselle todella hyvät. Motivaatio sähköisten turboahdinten kehittämiseen löytyy niiden positiivisesta vaikutuksesta moottoreiden suorituskykyyn, kun tarkoituksena on saada luotua tehokkaampia moottoreita ja nopeampia autoja.

Moottoriurheilussa kehitettyjä teknologioita siirtyy myös osittain tieliikenteeseen ja henkilöautoihin. Esimerkiksi formula 1 talleista usealla on suora yhteys normaalien henkilöautojen valmistajaan. Osittain tiettyjä teknologioita siirtyykin muutamien vuosien viiveillä formuloista tieliikenteeseen. Tietty kaikki näistä eivät ole taloudellisesti

kannattavia ja jäävät siitä syystä toteuttamatta. (Santander.2015) Sähköavusteisen turboahdinten tulevaisuutta on juuri tästä syystä vaikea ennustaa.

4 KEHITTEILLÄ JA MARKKINOILLA OLEVIA SÄHKÖISIÄ TURBOAHTIMIA

Sähköavusteinen turboahdin on tällä hetkellä vielä suhteellisen uusi konsepti, josta johtuen kyseiset laitteet ovat pitkälti vielä vasta kehitysvaiheessa, joitakin poikkeuksia lukuunottamatta. Tutkimusta tosin on tehty jo pidemmän aikaa sähköavusteisista turboahtimista ja niiden potentiaalista polttomoottoreiden hyötysuhteen ja näin ollen polttoainetehokkuuden parantamisessa.

BorgWarner valmistama sähköavusteinen turboahdin kulkee mallinimellä eTurbo. Laite on suunniteltu käytettäväksi kaupallisessa käytössä olevissa rekoissa ja kuorma-autoissa. Laite on varustettu sähkökoneella, joka toimii moottorina ja generaattorina, jolloin sähköntuottaminen ylimääräisestä pakokaasuvirtauksesta on mahdollista, laitetta on mahdollista käyttää myös tavallisen turboahtimena, kun sähköiset toiminnot kytketään pois päältä. Valmistaja lupaa eTurbon pienentävän turbon viivettä, parantavan moottorista saatavaa vääntöä ja näin ollen mahdollistavan moottoreiden pienentämisen ja polttoaineenkulutuksen laskun. (BorgWarner)

Mitsubishi heavy industries marine machinery & equipment co kehittää parhaimmillaan laivaliikenteeseen soveltuvaa sähköavusteista turboahdinta. Yhtiö lupaa tämän turboahtimen parantavan moottorin suorituskykyä matalilla kuormilla ajettaessa sekä näin ollen pienentävän polttoaineen kulutusta. Hyvänä ominaisuutena tässä ahtimessa on se että, tämä ahdin voitaisiin jälkiasentaa, jo olemassa oleviin moottoreihin. Tämä helpottaa laivayhtiötä sähköisten turboahdinten käyttöönotossa, kustannukset jäävät pienemmiksi, kuin silloin jos tarvitsisi vaihtaa koko moottori. Mitsubishin valmistama hybriditurboahdin on ollut asennettuna tutkimusmielessä laivaan Shin Koho jo vuodesta 2011 asti. Kyseinen laiva on myös ensimmäinen, johon vastaavaa teknologiaa on asennettu (nyk). Mallinimi kyseiselle hybridi turboahtimelle on MET83MAG. Yhtiö on myös laivaliikenteeseen tarkoitettujen sähköavusteisten turboahdinten lisäksi tehnyt tutkimusta henkilöautojen sähköavusteisista turboahtimista. (MHI)

5 SAAVUTETTAVISSA OLEVIA ARVOJA NYKYAIKAISILLE SÄHKÖISILLE TURBOAHTIMILLE

Kaksivaiheiselle sähköavusteiselle turboahtimelle on pystytty laskennallisesti simuloimalla määrittää 2.5 prosenttiyksikön nousu 1200 kw tehoisen impulssisytytteisen dieselmoottorin hyötysuhteeseen. Tutkimuksessa tällä sähköavusteiselle turboahtimella saavutettuja arvoja verrattiin tavanomaisella yksivaiheisella turboahtimella saavutettuihin arvoihin. Tutkimuksessa turboahdinta ei voitu käyttää sen optimiarvoilla, pakokaasujen liiallisen lämpenemisen seurauksena. Suoritettujen mittausten pohjalta pystyttiin kuitenkin arvioimaan tuotettavissa olevan energian määrää. Tutkimuksessa mainittiin myös että, mikäli turboahdin ja sähkökone mitoitettaisiin tarkemmin kyseistä polttomoottoria varten, voitaisiin saavuttaa korkeampi tuotettu sähköteho ja näin ollen suurempi parannus polttomoottorin hyötysuhteeseen. (Grönman & Sallinen, 2015)

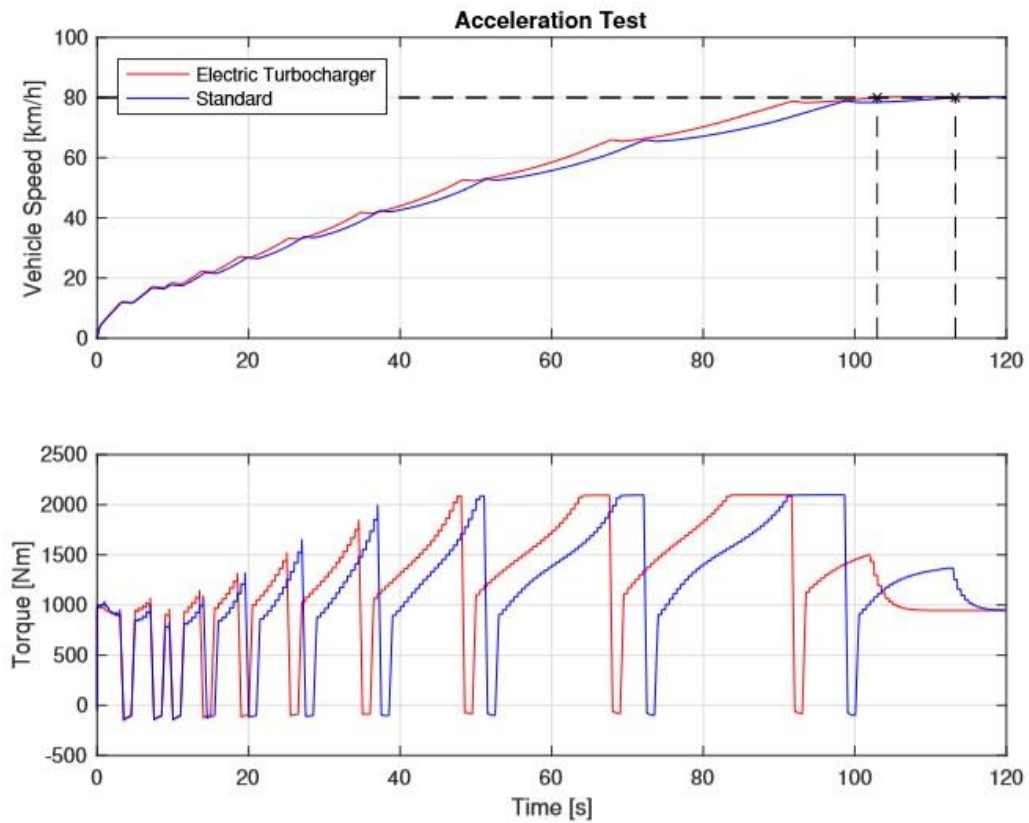
Eräässä toisessa tutkimuksessa verrattiin ajoneuvoon kytkettyä sähköistä turboahdinta tavalliseen ahtimeen. Tutkimus toteutettiin ajamalla Ruotsissa ajamalla moottoritiellä Södertäljestä Norrköpingiin ajoneuvolla, jonka massa oli 40000kg. Tutkimuksessa saavutettiin sähköisellä turboahtimella 0.9 prosentin lasku polttoainekulutuksessa. (Ekberg & Eriksson, 2017)

Taulukko 5.1 Polttoaineen kulutus eri ahtimilla

Turboahtimen tyyppi	Saavutettu polttoainekulutus [l/100km]
Perinteinen	37.82
Sähköinen	37.48

Lisäksi tutkittiin sähköisen turboahtimen vaikutusta ajoneuvon polttomoottorin vääntömomentin nousuun ja ajoneuvon kiihtyvyyteen. Ajoneuvon kiihtyvyydessä huomattiin selkeää nousua, haluttu loppunopeus saavutettiin kuvaajan mukaan noin 10 sekuntia aikaisemmin, kuin tavallisella turboahtimella. Vääntömomentissa pienemmillä vaihteilla kiihdytyksen alussa havaitaan pienehkö ero tavallisen- ja sähköisen turboahtimen välillä, mutta isommilla vaihteilla ero on jo melko selkeä, vääntömomentti kasvaa nopeammin sähköisellä turboahtimella kuin normaalilla. Tutkimuksessa myös

havaittiin vaihteidenvaihtojen tarpeen pienentyneen, kun käytössä oli sähköavusteinen turboahdin. (Ekberg & Eriksson. 2017)



Kuva 5.1 Sähköavusteisen turboahdtimeen ero tavalliseen turboahtimeen. Lähde: (Ekberg & Eriksson. 2017)

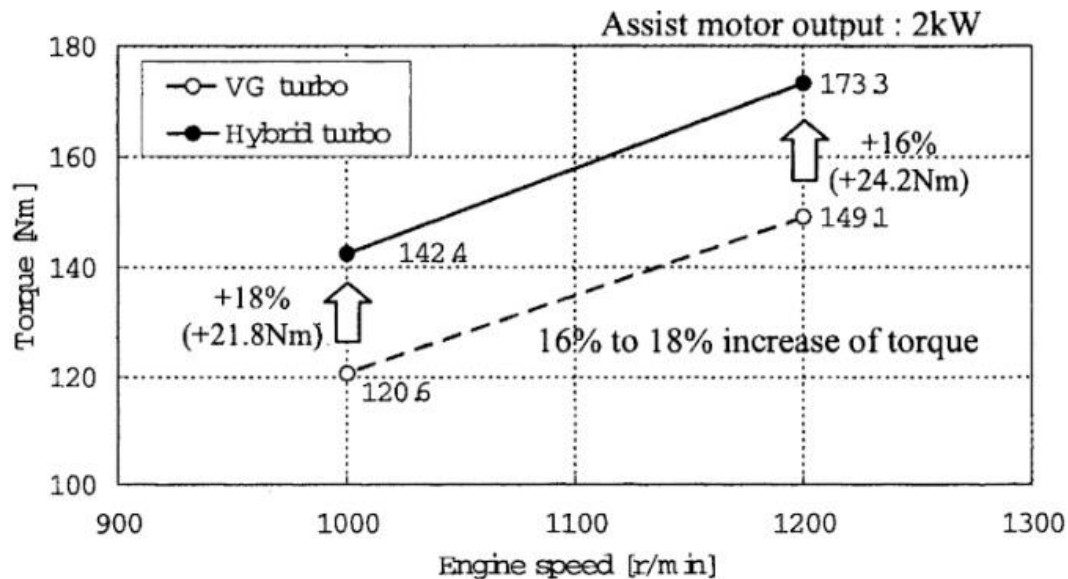
MHI:n toteuttamassa tutkimuksessa simuloitiin sähköisen turboahdtimeen vaikutusta iskutilavuudeltaan 2.0 litraisesta turboahdetusta ja välijäähdytetystä dieselmotorin toimintaan. Tämän simuloitujen mittauksien perusteella saatujen tulosten pohjalta valittiin teholtaan sopiva sähkömoottori varsinaiseen tutkimukseen. (Yamashita, Obaraki.2006)

Taulukko 5.2 Sähkömoottorin vaikutus sähköavusteisen turboahtimen toimintaan.

Mitattu suure	1 kW	2 kW
Vääntömomentin muutos	+ 50 %	+ 100%
Polttoaineen kulutus	-8%	-12%
Turbon viive	-50%	-70%

Jatkotutkimus toteutettiin laboratoriossa dieselmoottorilla, jonka iskutilavuus oli 1.7 litraa, teho 75 kW kierrosluvulla 4600 r/min ja vääntömomentti 240 Nm kierrosluvulla 2400r/min. Sähkömoottorin teho pidettiin vakiona (2kW), kun sen pyörimisnopeus oli yli 120000r/min. Diesel moottorissa oli alkuperäisesti muuttuvageometrinen ahdin ja sillä saatuja arvoja verrattiin sähköisellä turboahtimella saatuihin arvoihin. (Yamashita, Obaraki.2006)

Sähköisellä turboahtimella mitattiin huomattavia muutoksia dieselmoottorin toiminta-arvoihin verrattaessa muuttuvageometrisellä ahtimella saavutettuihin arvoihin. Näistä mainittavimpia on vaikutus vääntömomenttiin ja ahtopaineeseen. Kuvassa 5.2 on nähtävissä ero VG eli muuttuvageometrisen ja hybridi eli sähköavusteisen turboahtimen välillä. (Yamashita, Obaraki.2006)



Kuva 5.2 Vääntömomentin muutos eri ahtimilla (Yamashita, Obaraki.2006)

Mitsubishi Heavy Industriesin kehittämä sähköavusteinen turboahdin on ollut käytössä rahtilaivassa Shin Koho, pituus 292m, syväys 24.5m ja bruttovetoisuus 93.031 gt

Mitsubishi Heavy Industriesin kehittämässä laivaliikenteeseen tarkoitettulla hybriditurboahdimella on saatu koekäytössä tuotettua niin paljon sähköenergiaa, sen tuottamalla sähköenergialla on voitu käyttää kaikkia laivassa tarvittavia laitteita normaalin ajon aikana, ilman tarvetta sähköntuotannolle perinteisen dieselgeneraattorin avulla. Tällä sähköavusteisella turboahdimella pystyttiin tuottamaan 754 kW sähköenergiaa 9500 rpm pyörimisnopeudella, kyseinen turboahdin oli kytkettynä laivan päämoottoriin, joka oli teholtaan 20.1 MW. Sähköenergiaa saatiin muodostettua siis 3.75 % dieselmoottorin ominaistehosta. Turbiinilta saatavaa tehoa tarvitsi nostaa 5 % edellä mainitun sähköenergian tuottamiseksi. (Motorship. 2011)

6 SÄHKÖISTEN TURBOAHDINTEN TALOUDELLINEN KANNATTAVUUS

Sähköisen turboahdinten kannattavuus perustuu pääosin sen käytöllä saavutettuihin polttoainekustannusten ja niihin sitoutuvien päästökustannusten pienenemiseen. Jotta investoinnista tulisi kannattava täytyisi sähköavusteisella turboahdimella saatava säästö kasvaa investoinnin arvoa suuremmaksi järkevällä takaisinmaksuajalla. Tässä kappaleessa tarkoituksena on arvioida tutkimuksista saatujen tulosten avulla sähköavusteisten turboahdinten kannattavuutta erinäisissä skenaarioissa.

6.1 Henkilöautot

Henkilöautoilla käyttökustannukset koostuvat polttoainekustannuksista ja ajoneuvo verosta. Tässä työssä huomioidaan vain edellä mainitut kustannukset, eli kaikki huolto, asennus yms. muuttuvat kustannukset, jotka eivät liity itse ajoneuvolla ajamiseen taikka sähköiseen turboahtimeen jätetään huomiomatta.

Bensiinikäyttöisissä ajoneuvoissa ajoneuvovero koostuu perusverosta, joka perustuu auton valmistajan ilmoittamiin hiilidioksidipäästöihin tai auton kokonaismassaan, jos tietoa auton hiilidioksidipäästöistä ei ole saatavilla. Katsastuksessa mitatuilla päästöarvoilla ei ole vaikutusta ajoneuvoveron suuruuteen. Dieselikäyttöisissä henkilöautoissa ajoneuvovero koostuu perusverosta ja käyttövoimaverosta. Perusvero määräytyy samoin, kuin bensiinikäyttöisissä autoissa. Käyttövoimaveron taas perustuu ajoneuvon kokonaismassaan. (Trafi.2018)

Sähköisen turboahdinten jälkiasentamisella ei voida vaikuttaa auton ajoneuvoveron suuruuteen, joten voidaan ajatella ainoan taloudellisen hyödyn tulevan polttoaineenkulutuksen pienenemisestä. Polttoaineenkulutuksen muutoksesta aiheutuva säästö on helppo laskea, kun tiedetään sähköisen turboahdinten aiheuttama muutos ajoneuvon hyötysuhteeseen.

Tutkimuksessa (Yamashita, Obaraki.2006) saavutettiin 2 litraiselle dieselmoottorille 8-12 prosentin polttoainesäästö käyttämällä sähköistä turboahdinta. Säästön määrä euroina on laskettu yhtälöllä 1.

$$S = \frac{x}{100} * \frac{z}{100} * L * H \quad (1)$$

jossa, S=Säästetty summa [€]

x=Polttoaineen säästö [%]

z= Polttoaineen kulutus [l/100km]

L=Ajettu matka [km]

H= Polttoaineen hinta [€/l]

Polttoaineen säästökseksi on valittu 12 % (Yamashita, Obaraki.2006), Autoksi on valittu Bmw 320d ED Business exclusive, jossa on siis iskutilavuudeltaan kaksilitrainen dieselmoottori. Tälle polttoaineenkulutukseksi on ilmoitettu 5,4 l/100km (Bmw.2018). Polttoaineenhinnaksi on valittu Suomessa sijaitsevien polttoaineen myyntipisteiden myyntihintojen keskiarvosta, joka on lukuhetkellä ollut 1.468 €/l (Polttoaine.net). Näillä arvoilla ja yhtälön 1 saadut tulokset ovat taulukoituna alla.

Taulukko 6.1 Henkilöautolla saavutettu säästö polttoaineenkulutuksen muutoksella

Ajettu [km]	Säästö [€]
0	0
100	0,95
500	4,76
1000	9,51
5000	47,56
10000	95,13
20000	190,25
50000	475,63
100000	951,26
250000	2378,16
500000	4756,32
750000	7134,48
1000000	9512,64

Taulukon 6.1 tulosten perusteella nähdään, että pienellä, henkilöautojen suuruusluokan polttoaineenkulutuksella, ei saavuteta merkittäviä säästöjä. Sähköisen turboahtimen hankinta- ja asennuskustannukset nousisivat todennäköisesti tuhansiin euroihin. Henkilöautolla ajettiin vuonna 2016 keskimäärin 15400 kilometriä (Liikennevirasto), joten saman trendin jatkuessa ajokilometreissä niin investoinnin takaisinmaksu ajaksi tulisi helposti päälle 20 vuotta.

Tutkimuksessa (Ekberg & Eriksson. 2017) saavutettu 0.9 % lasku rekka-auton polttoaineenkulutuksessa, tavalliseen turboahtimeen verrattuna on muutoksena häviävän pientä. kyseisellä autolla keskikulutus ollut noin 38 l/100km ja dieselin hinta on pidetty samana, kuin taulukossa 6.1.

Taulukko 6.2 Rekka-autolla saavutettu säästö polttoaineenkulutuksen muutoksella

Ajettu [km]	Säästö [€]
0	0
100	0,50
500	2,51
1000	5,02
5000	25,10
10000	50,21
20000	100,41
50000	251,03
100000	502,06
250000	1255,14
500000	2510,28
750000	3765,42
1000000	5020,56

Taulukossa 6.2 on nähtävillä saavutettuja euromääräisiä säästöjä Ekbergin & Eriksonin tutkimuksen tulosten mukaan laskettuna. Säästö on noin puolet pienempi, kuin Yamashitan ja Obarakin tapauksessa. Taloudellinen hyöty jää aika pieneksi järkevien ajokilometriensä sisällä, vaikka tosin rekka-autoilla ajetaan vuosittain keskimäärin enemmän, kuin henkilöautoilla.

Yamashin ja Obarakin tutkimuksessa saavutetulla polttoaineen kulutuksen säästöllä ja Ekberg & Eriksonin tutkimuksen rekka-auton polttoaineenkulutuksella saavutettaisiin jo merkittäviä taloudellisia säästöjä. Autoissa ja rekoissa taloudellisen kannattavuuden haasteeksi muodostuu suhteellisen pieni polttoaineenkulutus, joka tarvitsisi suhteellisen suuren parannuksen polttoaineen kulutuksessa, jotta säästetty summa nousisi tarpeeksi korkeaksi

6.2 Diesel generaattorit

Tutkimuksessa (Grönman, Sallinen. 2015) oli simuloimalla 1200 kW diesel moottorille hyötysuhteen nousuksi 2.5 %. Nyt jos ajatellaan hyötysuhteen muutoksen korreloivan suoraan polttoaineenkulutuksen muutoksen kanssa, saadaan laskettua tämän muutoksen mahdollistama säästö polttoaineenkulutuksessa. Liitteessä 1 on arvioituna diesel generaattoreiden polttoaineen kulutuksia ja kokoluokassa 1250 kW täysikikuormalla ajaessa polttoaineen kulutus on 88.8 gallonaa tunnissa ja tämä muutettuna litroiksi tekee kulutukseksi 336.1 litraa tunnissa, kun 1 gallona on 3.785 litraa (Suomen Standardisoimisliitto, Suureet ja yksiköt. SI-mittayksikköjärjestelmä, 28)

$$S = \frac{x}{100} * y * T * H \quad (2)$$

jossa, S=Säästetty summa [€]

x=Polttoaineen säästö %

y= Polttoaineen kulutus [l/h]

T=Käyttötunnit [h]

H= Polttoaineen hinta [€/l]

Yhtälöllä 2 saadaan laskettua säästö polttoainekustannuksissa käyttöaikaa kohden. Nyt dieselin hinnaksi on oletettu sama, kuin edelläkin, eli 1.468 €/l, kulutukseksi valittu 337 l/h ja polttoaineensäästöksi yllä mainittu 2.5 %.

Taulukko 6.3 Dieselgeneraattorilla saavutettu säästö polttoaineenkulutuksen muutoksella

Käyttötunnit [h]	Säästö [€]
0	0,00
1	12,33
5	61,67
10	123,35
50	616,74
100	1233,49
250	3083,72
500	6167,44
1000	12334,87
3000	37004,61
5000	61674,35
10000	123348,70

Taulukossa 6.3 on taulukoituna 1200 kW dieselgeneraattorille mahdollisia polttoaineenkulutuksen pienenemisestä johtuvia säästöjä. Nyt on mahdollista saavuttaa jo merkittäviäkin säästöjä käyttötuntien kasvaessa. Riippuen dieselgeneraattorin käyttötarkoituksesta, investointi sähköavusteiseen turboahtimeen vaikuttaa taloudellisesti kannattavalta.

6.3 Laivat

MHI:n tutkimuksessa oli saavutettu heidän valmistamalla sähköavusteisella turboahtimella tuotettua 754 kW sähköteho. Tällä sähköteholla oli pystytty poistamaan kokonaan tarve erilliselle diesel generaattorille laivan tarvitseman sähköntuotannossa. Liitteen 1 mukaan 750 kW diesel generaattorin suurpiirteinen kulutus on noin 53.4 gal/h, joka litroiksi muutettuna tekee noin 202.1 l/h.

$$S = y * T * H \quad (3)$$

jossa, x=Polttoaineen säästö %

y= Polttoaineen kulutus [l/h]

T=Käyttötunnit [h]

H= Polttoaineen hinta [€/l]

Yhtälöllä 3 on laskettu kyseisellä sähköavusteisella turboahtimella saavutettu säästö, verrattuna tilanteeseen, jossa olisi pitänyt tarvittava sähkö tuottaa diesel generaattorilla. Tulokset ovat taulukoituna taulukossa 6.4. Saavutettava säästö nousee suhteellisen nopeasti jo merkittäviin summiin ja näin ollen ainakin säästetyn summan perusteella sähköavusteinen turboahdin tulee olemaan taloudellisesti kannattava ratkaisu.

Taulukko 6.4 Dieselgeneraattorin polttoainekustannuksista syntyvä säästö

Käyttötunnit [h]	Säästö [€]
0	0
1	296,68
5	1483,414
10	2966,828
50	14834,14
100	29668,28
250	74170,70
500	148341,40
1000	296682,80
3000	890048,40
5000	1483414,00
10000	2966828,00

7 YHTEENVETO

Työssä käsiteltiin sähköavusteisten turboahdinten rakennetta, suorituskykyä ja lopuksi arvioitiin niiden taloudellista kannattavuutta. Vaikkakin sähköiset turboahtimet ovat varsin uutta tekniikkaa ja ovat vielä vähäisellä käytöllä, oli niillä silti toteutettu simulointeja ja empiirisiä tutkimuksia. Työssä saatiin selkeästi esiteltyä rakenteelliset ja toiminnalliset erot normaalien turboahdinten ja sähköavusteisten turboahdinten välillä.

Työssä esiteltiin mahdollisimman monia tutkimuksia, jotta saataisiin tarpeeksi laaja kuva sähköavusteisten turboahdinten suorituskyvystä useissa eri käyttökohteissa ja kokoluokissa. Näissä tutkimuksissa käsiteltiin henkilöautoja, rekkoja, laivoja ja diesel generaattoreita. Merkittävimmäksi tutkimukseksi osoittaisiin Mitsubishi Heavy Industriesin toteuttaman tutkimuksen, jossa sähköavusteista turboahdinta käytettiin rahtilaivassa.

Taloudellisesta kannattavuudesta tehtiin suuntaa antavia laskelmia ja selvityksiä, päätyen tuloksiin, joista on hyvä tehdä johtopäätöksiä sähköiseen turboahtimeen investoimisesta ja sen kannattavuudesta. Työssä esiteltyjen tutkimusten tulosten mukaan toteutettujen kannattavuuslaskujen perusteella voidaan tulla johtopäätökseen, että sähköisen turboahdinten taloudellinen kannattavuus vaatii isontehoisen polttomoottorin, jonka polttoainekulutus on huomattavan suuri. Tavallisten henkilöautojen polttoainekulutusluokassa investoiminen sähköavusteiseen turboahtimeen ei ole taloudellisesti kannattavaa. Kannattavuuden arviointia vaikeuttaa huomattavasti investoinnin suuruuden tuntemattomuus, sähköavusteisia turboahtimia ei ole niin suurissa määrin markkinoilla, että niille olisi valmiita hinnastoja saatavilla.

LÄHDELUETTELO

Mollenhauer Klaus & Tschöke helmut. 2010. Handbook of diesel engines. 53-55s. ISBN 978-3-540-890 82-9

Craig Balis, Chris Middlemass, S. M. Shahed, Garret engine boosting systems. 2003. Design & development of e-turbo for suv and light truck applications. Diesel engine Emissions Reduction Conference

<https://www.mhi-mme.com/products/metturbocharger/#MET-MB> luettu 6.3.2018

Aki Grönman, Petri Sallinen, Juho Honkatukia, Jari Backman, Antti Uusitalo. 2015. Design and experiments of two-stage intercooled electrically assisted turbocharger

Improving Fuel Economy and Acceleration by Electric Turbocharger Control for Heavy Duty Long Haule. 2017. Kristoffer Ekberg & Lars Eriksson

Benefits of using an electrically assisted turbocharger to increase marine engine efficiency. 2016 Simon Ahl, Alexander Gimdal.

Suomen virallinen tilasto (SVT) : Moottoriajoneuvokanta [verkkojulkaisu] ISSN=1798-856X. 2016. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 2.12.2018]. Saatavissa : https://www.stat.fi/til/mkan/2016/mkan_2016_2017-03-23_tie_001_fi.html

Verohallinto : Energiaverotus [verkkojulkaisu] 2016. [viitattu 14.4.2018] Saatavissa : <https://www.vero.fi/syventavat-vero-ohjeet/ohje-hakusivu/56206/energiaverotu/>

Y Yamashita, S Ibaraki, H Ogita. Development of Electrically Assisted Turbocharger for Diesel Engine. 2006

Trafi Liikenteen turvallisuusvirasto : Ajoneuvovero: Veron rakenne ja määrä [verkkojulkaisu] 2018. [viitattu 10.10.2018] Saatavissa: https://www.trafi.fi/tieliikenne/verotus/ajoneuvovero/veron_rakenne_ja_maara

[BMW : Hinnasto 3-sarjan sedan \[verkkajulkaisu\] 2018. \[viitattu 10.10.2018\] Saatavissa : https://www.bmw.fi/content/dam/bmw/marketFI/bmw_fi/ladattavat/hinnastot/BMW_Hinnasto_F30.pdf.asset.1535742877958.pdf](https://www.bmw.fi/content/dam/bmw/marketFI/bmw_fi/ladattavat/hinnastot/BMW_Hinnasto_F30.pdf.asset.1535742877958.pdf)

[Polttoaine : Polttoaineen eilinen keskihinta \[verkkosivusto\] \[viitattu 10.10.2018\] Saatavissa : https://www.polttoaine.net/](https://www.polttoaine.net/)

[Liikennevirasto : Henkilöliikennetutkimus 2016. Suomalaisten liikkuminen \[verkkajulkaisu\] 2018. \[viitattu 10.10.2018\] Saatavissa : https://www.liikennevirasto.fi/documents/20473/429672/HLT16_Valtakunnallinen_Esitys_telykalvot.pptx/a8d74d98-b9f7-4f0a-ae7e-7db65c700bef](https://www.liikennevirasto.fi/documents/20473/429672/HLT16_Valtakunnallinen_Esitys_telykalvot.pptx/a8d74d98-b9f7-4f0a-ae7e-7db65c700bef)

[BorgWarner : Explore our Technologies. eTurbo™ for Commercial Vehicles \[verkkajulkaisu\] \[viitattu 10.10.2018\] Saatavissa : https://cdn.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/product-sheet-eturbo-cv.pdf?sfvrsn=f665b33c_8](https://cdn.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/product-sheet-eturbo-cv.pdf?sfvrsn=f665b33c_8)

[BorgWarner : Explore our technologies : eTurbo™ \[verkkajulkaisu\] \[viitattu 8.10.2018\] Saatavissa : https://cdn.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/eturbo-product-sheet.pdf?sfvrsn=93bccf3c_13](https://cdn.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/eturbo-product-sheet.pdf?sfvrsn=93bccf3c_13)

<https://www.borgwarner.com/technologies/electric-boosting-technologies>

[Mitsubishi Heavy Industries Marine Machinery & Equipment \(MHI\): Turbocharger lineup: MET Turbochargers \[verkkajulkaisu\] \[viitattu 6.3.2018\] Saatavissa : https://www.mhi-mme.com/products/metturbocharger/](https://www.mhi-mme.com/products/metturbocharger/)

[Nippo Yusen Kaisma \(NYK\): Bulk Carrier Shin Koho Completed with the Installation of the World's First Hybrid turbocharger – A further Step in Reducing CO” Emissions \[verkkajulkaisu\] 2011. \[viitattu 12.10.2018\] Saatavissa : https://www.nyk.com/english/release/1414/NE_110603.html](https://www.nyk.com/english/release/1414/NE_110603.html)

C Wang, J Corbett: The costs and benefits of reducing SO₂ emissions from ships in the US West Coastal waters. 2007

S Arnold, C Balis, P Barthelet, Garret electric Boosting Systems (EBS) Program. 2005

Diesel Service and Supply: Approximate Fuel Consumption Chart [verkkajulkaisu] [viitattu 15.10.2018] Saatavissa:

https://www.dieselserviceandsupply.com/temp/Fuel_Consumption_Chart.pdf

Mitsubishi Heavy Industries (MHI): MHI Develops Hybrid Turbocharger to generate Electricity Utilizing Exhaust gas from Marine Engines [verkkajulkaisu] 2010. [viitattu 3.4.2018] Saatavissa: <https://www.mhi.com/news/story/1008261372.html>

Transport & Environment: Diesel: the true (dirty) story [verkkajulkaisu] 2017. [viitattu 12.10.2018] Saatavissa:

https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/2017_09_Diesel_report_final.pdf

Santander: How Formula One technology improves your road car [verkkajulkaisu] 2015. [viitattu 30.11.2018] Saatavissa: https://www.eurosport.com/formula-1/how-formula-one-technology-improves-your-road-car_sto4975756/story.shtml

Suomen Standardisoimisliitto. 2002. SI Opas. Suuret ja yksiköt. SI-mittayksikköjärjestelmä (s.28)

The Motorship: World first hybrid turbocharged bulk carrier. [verkkajulkaisu] 2011. [viitattu 30.11.2018] Saatavissa: <https://www.motorship.com/news101/ships-and-shipyards/worlds-first-hybrid-turbocharged-bulk-carrier>

LIITE 1 DIESELGENERAATTOREIDEN ARVIOITUJA POLTTOAINEEN KULUTUKSIA

Lähde: Diesel Service and Supply

Generaattorin koko (kW)	1/4 kuormitus (gal/h)	1/2 Kuormitus (gal/h)	3/4 Kuormistus (gal/h)	Täyskuorma (gal/h)
20	0,6	0,9	1,3	1,6
30	1,3	1,8	2,4	2,9
40	1,6	2,3	3,2	4
60	1,8	2,9	3,8	4,8
75	2,4	3,4	4,6	6,1
100	2,6	4,1	5,8	7,4
125	3,1	5	7,1	9,1
135	3,3	5,4	7,6	9,8
150	3,6	5,9	8,4	10,9
175	4,1	6,8	9,7	12,7
200	4,7	7,7	11	14,4
230	5,3	8,8	12,5	16,6
250	5,7	9,5	13,6	18
300	6,8	11,3	16,1	21,5
350	7,9	13,1	18,7	25,1
400	8,9	14,9	21,3	28,6
500	11	18,5	26,4	35,7
600	13,2	22	31,5	42,8
750	16,3	27,4	39,3	53,4
1000	21,6	36,4	52,1	71,1
1250	26,9	45,3	65	88,8
1500	32,2	54,3	77,8	106,5
1750	37,5	63,2	90,7	124,2
2000	42,8	72,2	103,5	141,9
2250	48,1	81,1	116,4	159,6