

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Energia- ja polttomoottoritekniikka

2019

Juho Makkonen

TYÖKONEEN SÄHKÖ- DIESELHYBRIDIMOOTTORIN SIMULAATIOMALLIN RAKENTAMINEN


TURKU AMK
TURKU UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES

Juho Makkonen

TYÖKONEEN SÄHKÖ- DIESELHYBRIDIMOOTTORIN SIMULAATIOMALLIN RAKENTAMINEN

Opinnäytetyön tavoitteena oli rakentaa työkoneen sähkö-dieselhybridimoottorin simulaatiomalli, jonka avulla voi tutkia sähköisen toimilaitteen vaikutuksia moottorin polttoaineenkulutukseen.

Työssä selvitettiin polttomoottoreille sopivien toimilaitteiden toimintaperiaatetta. Osa tutkittavista laitteista käyttää hyödyksi jarrutusenergiaa ja osa muuntaa turboahdatun moottorin tuottaman ylimääräisen energian sähköksi. Toimilaitteet sisältävät moottorigeneraattori -yksikön, inverterin ja akun sekä yhteydet näiden ja moottorin välillä. Työssä käytiin läpi muun muassa Danfoss Editronin ja BorgWarnerin markkinoilla olevia tuotteita.

Simulaatiomalli rakennettiin GT-Suite-ohjelman avulla. Malli sisältää moottorin eli 4 sylinteriä, kampiasarjan, jäähdyttimen, kompressorin, turbiinin, imu -ja pakosarjan sekä yhteydet komponenttien välillä. Toimilaitte on moottorin mallin alikokoonpano. Työssä tarkasteltiin saatuja tuloksia sekä verrattiin niitä valmistajien ilmoittamiin tuloksiin. Kalibrointia ja tuloksia varten ajettiin useita simulaatioajoja, toimilaitteella ja ilman.

Sähköinen toimilaitte voi valmistajien mukaan laskea polttoaineenkulutusta keskimäärin 5 - 10 % riippuen laitteen tuottamasta lisäväännöstä ja moottorin kierrosnopeudesta sekä kuormitusasteesta. Simulaatiomallin tulokset jäivät kuitenkin energiatarkeustelun jälkeen käytännössä nolnaan.

Opinnäytetyön tuloksena luotiin moottorin simulaatiomalli, jota voidaan käyttää sellaisenaan tai jatkokehittää sopimaan paremmin transient -ajoon.

ASIASANAT:

Polttoaineen ominaiskulutus, hybridiajoneuvo, simulointi

BACHELOR'S / MASTER'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical engineering

2019 | 38 pages

Juho Makkonen

THE SIMULATION MODEL OF AN ELECTRIC-DIESEL HYBRID ENGINE

The goal of this thesis was to develop a simulation model for the heavy-duty diesel-hybrid engine and use that model to test what kind of an effect an electric device has on fuel consumption.

This thesis addresses properties and function of electric devices. Some of them convert kinetic energy to electricity and the rest use excess energy created by a turbocharger. Electric devices contain a motor-generator unit, a battery, an inverter and connections between the components and the engine. Devices manufactured by Danfoss Editron and BorgWarner were researched in this work. The model was calibrated by running several tests in simulation.

The simulation model was build in a program GT-Suite. The model contains all the required components, such as 4 cylinders, cranktrain, compressor, turbine, intercooler, intake and exhaust manifold and connections between them. The electric device is a subassembly of the model. Results were compared to a data published by manufacturers.

According to manufacturers the electric device can potentially reduce fuel consumption by 5 - 10 %, depending on how much torque is produced by the device as well as speed and load of an engine. Results produced by the simulation model however were close to zero, after the energy balance was taken into an account.

The result of this thesis is the engine simulation model which can be used as it is or build further into more transient capable model.

KEYWORDS:

Fuel specific consumption, hybrid vehicle, simulation

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	6
1 JOHDANTO	7
2 GT-SUITE -OHJELMA JA SIMULOINTI	8
2.1 GT-Suite	8
2.2 Simuloinnin hyödyt	8
3 TOIMILAITTEEN OSAT JA TOIMINTAPERIAATE	10
3.1 Toimilaitteen hyödyt	10
3.2 Osat	11
3.3 Energian talteenotto ja hyödyntäminen	11
3.4 Kineettistä energiaa hyödyntävät tuotteet	13
3.5 Turboahtimen energiaa hyödyntävät tuotteet	14
4 SIMULAATIOMALLIN RAKENTAMINEN	19
4.1 Malli ilman toimilaitetta	19
4.2 Toimilaitteen lisäys malliin	22
5 TULOSTEN TARKASTELU	23
5.1 Ilman toimilaitetta	23
5.2 Toimilaitteen vaikutus tuloksiin	28
6 YHTEENVETO	37
LÄHTEET	38

KUVAT

Kuva 1. Toimilaitteen toimintakaavio.	12
Kuva 2. Kuva 2. Danfoss Editron PMI300-T310 (Danfoss Editron 2019.)	13
Kuva 3. Hybriditurbomoottorin toimintakaavio.	15
Kuva 4. Valeon sähköinen turboahdin (Valeo.)	16
Kuva 5. Simulaatiomalli ilman toimilaitetta.	21
Kuva 6. Toimilaite.	22

KUVIOT

Kuvio 1. Moottorin akseliteho.	23
Kuvio 2. Moottorin ominaiskulutus.	24
Kuvio 3. Moottorin ilmavirta.	24
Kuvio 4. Pakokaasun lämpötila.	25
Kuvio 5. Akseliteho osakuormituksessa.	26
Kuvio 6. Ominaiskulutus osakuormituksessa.	26
Kuvio 7. Ilmavirta osakuormituksessa.	27
Kuvio 8. Pakokaasun lämpötila osakuormituksessa.	27
Kuvio 9. Polttoainevirta osakuormituksessa.	28
Kuvio 10. Toimilaitteen vaikutus ominaiskulutukseen.	29
Kuvio 11. Toimilaitteen vaikutus polttoainevirtaan.	30
Kuvio 12. Toimilaitteen vaikutus kulutukseen osakuormituksessa.	30
Kuvio 13. Toimilaitteen vaikutus polttoainevirtaan osakuormituksessa.	31
Kuvio 14. Akun energioiden muutos kierrosnopeudella 1950 rpm.	32
Kuvio 15. Akun varaustason muutos kierrosnopeudella 1950 rpm.	32
Kuvio 16. Ominaiskulutuksen muutos.	33

TAULUKOT

Taulukko 1. Moottorin osat simulaatiomallissa.	19
Taulukko 2. Käytetyt parametrit.	19
Taulukko 3. Energiat kierrosnopeudella 1950 rpm.	35
Taulukko 4. Energiat kierrosnopeudella 1500 rpm.	35
Taulukko 5. Energiat kierrosnopeudella 1100 rpm.	35

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

Ah	ampeeeritunti
°C	Celciusaste
g	gramma
h	tunti
kg	kilogramma
kJ	kilojoule
kW	kilowatti
kWh	kilowattitunti
MGU	moottori-generaattori -yksikkö
Nm	Newtonmetri
NRSC	Non-road steady cycle (staattinen ajosykli)
rpm	pyörimisnopeus (1/min)
s	sekunti
V	voltti

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena oli rakentaa 4,9 litraisen, nelisylinterisen ja turboahdetun työkonemoottorin simulaatiomalli. Perusmalli kalibroidaan vastamaan kokeellisesta mitauksista saatua dataa. Toimivaan dieselmoottorimalliin lisätään sähköisiä toimilaitteita, kuten sähköinen ahdin tai kineettistä energiaa hyödyntävä toimilaitte, jonka avulla moottorille syötettiin joko lisää vääntöä tai tehoa. Simulaatiomallia ajetaan moottoreista saaduilla arvoilla ilman toimilaitetta ja sen kanssa. Tuloksia verrataan toisiinsa ja selvitetään toimilaitteiden vaikutus esimerkiksi polttoaineenkulutukseen. Työssä selvitetään hybridiratkaisujen toimintaperiaate, hyödyt ja haitat sekä esitellään markkinoilla olevia tuotteita, kuten hybriditurbot ja kineettistä energiaa hyödyntävät toimilaitteet.

Hybridiajoneuvot jaetaan kevythybrideihin, täyshybrideihin ja pistokehybrideihin. Kevythybrideillä on alhaisin jännite ja matalin tehontuotto. Täyshybridien jännite on korkeampi ja tehontuotto on suurempi. Simulaatiomallissa toimilaitte rakennetaan samantyylliseksi kuin markkinoilla olevat tuotteet ja selvitetään voidaanko moottoria ajaa vain parhaimman ominaiskulutuksen alueella ja siirtää kulutusta kasvattavat kuormapiikit toimilaitteen hoidettavaksi. Samalla tutkitaan toimilaitteen vaikutuksia moottorin taloudellisuuteen. Työ rajataan käsittelemään hybridiratkaisuja ja täysin sähköiset ratkaisut jätetään pois. Opinnäytetyö oli Turun Ammattikorkeakoulun moottorilaboratorion toimeksianto.

Opinnäytetyössä perehdytään ensin GT-Suite ohjelmaan ja simuloinnin tuomiin hyötyihin. Lisäksi työssä käsitellään eri valmistajien toimilaitteiden ominaisuuksia ja toimintaa. Työssä selvitetään simulaatiomallin rakenne alkaen perusmoottorista jatkaen turboahdinten kautta itse toimilaitteeseen. Lopuksi analysoidaan simulaatioajojen tuloksia.

2 GT-SUITE -OHJELMA JA SIMULOINTI

2.1 GT-Suite

GT-Suite on Gamma Technologies -nimisen yrityksen kehittämä ohjelmisto, joka soveltuu erilaisten moottorien simulointimallien rakentamiseen ja ominaisuuksien, kuten tehon ja ominaiskulutuksen simulointiin. Moottorit voivat olla joko perinteisiä diesel- tai bensiinimoottoreita, turboahdettuja tai ahtamattomia tai hybridimoottoreita. Ohjelmalla voidaan simuloida henkilöautojen, työkoneiden ja laivojen moottoreita sekä rakentaa kokonaisia ajoneuvomalleja. Myös sähköisten ajoneuvojen simulointi on mahdollista. (Gamma Technologies 2019.)

GT-ISE on pääasiallisesti simulointimallien rakentamiseen ja ajamiseen tarkoitettu ohjelma. Siitä löytyy runsaasti eri komponentteja ja asetuksia, joita hyödyntämällä pystyy rakentamaan lähes minkä tahansa moottorin tai ajoneuvon. (Gamma Technologies 2019.)

GT-POST on simuloinnista saatujen tulosten tarkasteluun tarkoitettu ohjelma. Sen avulla käyttäjä näkee simuloidusta moottorista runsaasti dataa esimerkiksi akselitehon, vääntömomentin, ominaiskulutuksen ja massavirrat. Lämpötiloja, paineita ja massavirtoja voi tarkastella koko moottorin tai yksittäisten komponenttien osalta. (Gamma Technologies 2019.)

2.2 Simuloinnin hyödyt

Simuloinnista on hyötyä esimerkiksi tuotekehityksen aikana, kun kehityksessä olevaa moottoria tai toimilaitetta voidaan simuloida. Suuntaa antavia tuloksia saadaan tuotettua ilman valmista fyysistä tuotetta ja eri vaihtoehtoja voidaan alustavasti testata ennen lopullista päätöstä ja valmistusta. Esimerkiksi moottorin asettaminen jalustalle ja dynamometrin asennus voi kestää useitakin päiviä ja siinä ajassa voi ehtiä rakentamaan toimivan simulaatiomallin ja ajaa simulaatioajoja. Simulointi nopeutuu jos olemassa on jo simulaatiomalli, joka pienillä muutoksilla riittäisi tuottamaan hyödyllisiä tuloksia. Simuloitavan moottorin ominaisuuksia voi vaihtaa ohjelmassa helposti. Simulaatio-ajo on hitaampi kuin oikealla moottorilla suoritettu testiajo, jos simulaatiomalli on yksityiskohtainen. Tulokset tosin ovat silloin kattavia. Mallia voi kuitenkin optimoida nopeammaksi esimerkiksi

yksinkertaistamalla sitä keskiarvomalliksi. Se ei kuitenkaan tuota aivan yhtä kattavia tuloksia kuin yksityiskohtainen simulointi. Tulokset ovat kuitenkin moneen tarpeeseen riittäviä. Jos malli on tarpeeksi pitkälle optimoitu, voi se tuottaa tuloksia jopa nopeammin kuin varsinainen testiajo. Toki testien kokonaisaikaan vaikuttaa edellä mainittu testausympäristön kokoonpano. Simuloinnissa on yleensä hieman poikkeamia oikeaan moottorin nähden. Jopa sama moottori tuottaa testiajoissa hieman toisistaan eroavia tuloksia, erilaisista moottoreista puhumattakaan.

3 TOIMILAITTEEN OSAT JA TOIMINTAPERIAATE

3.1 Toimilaitteen hyödyt

Tilanne, jossa kuormapiikki nostaisi moottorin tehontarvetta, nostaa samalla polttoaineenkulutusta. Siitä seuraa ylimääräisiä kustannuksia. Polttoaineen kulutuksen äkillinen nousu voidaan välttää, jos kuormapiikin aiheuttama lisätehontarve ohjataan toimilaitteen hoidettavaksi. Polttomoottori tuottaa saman verran tehoa kuin ennen kuormapiikkiä eikä tarvitse suurempaa määrää polttoainetta. Tällöin ajo on taloudellisempaa, koska nykyinen kehitys suosii pienempiä moottoreita ja taloudellisempaa polttoaineenkulutusta. Moottoria voidaan myös ajaa pääasiassa kierrosalueella, jossa kulutus on alhaisin. Näin kulutusta pyritään hallinnoimaan. Työkoneita käytettäessä eteen tulee tilanteita, joissa ajoneuvo kulkee hitaasti ja sen täytyy siitä huolimatta tuottaa runsaasti vääntöä, esimerkiksi siirrettäessä raskaita kuormia. Pelkällä polttomoottorilla polttoainetta kuluisi runsaasti, koska moottorin olisi oltava tilavuudeltaan suuri. Toimilaitteen tuottamalla lisäväännöllä, tilavuutta ja kulutusta voidaan laskea. (X-Engineer 2019.)

Turbomoottorien etu vapaasti hengittäviin on se, että tarvittava teho saadaan tuotettua tilavuudeltaan pienemmällä moottorilla, koska ahtaaminen nostaa paineen moottorissa korkeammalle ja moottori tuottaa lisää energiaa ilman tilavuuden kasvattamista. Ahtaaminen ei kuitenkaan laske polttoaineenkulutusta. Sähköiset ahtimet pyrkivät polttoaineenkulutuksen laskemiseen hyödyntämällä pakokaasun ylimääräistä energiaa. Kehitystyö pysyy selvemmin moottorin ympärillä, jos toimilaitte hyödyntää turboahtaamisen tuottamaa energiaa. Kineettistä energiaa hyödynnettäessä, ajoneuvoa on kehitettävä paljon laajemmin, esimerkiksi kiihdytykseen ja jarrutukseen liittyviä osia. (DieselNet 2017.)

Monet hybridiratkaisut jaetaan korkeajännitteisiin ja matalajännitteisiin eli 48 voltin hybridiin. Korkeaa jännitettä hyödyntävät kykenevät ottamaan talteen enemmän energiaa, mutta 48 voltin ratkaisut ovat selvästi edullisempia. Niissä laitteisto voidaan sijoittaa 5 eri paikkaan ajoneuvossa ja sijainnista riippuen kyseessä on joko P0-, P1, 2, 3 tai 4-sarjalainen. 0- ja 1-sarjan laitteet on kiinnitetty suoraan moottoriin, P0 jakohihnan ja P1 kampiakselin kautta. Uudempi P2-sarjalainen on sijoitettu polttomoottorin ja voimansiirron väliin. P3-sarjan laite on yhteydessä moottoriin vaihteiston kautta ja P4-sarja on liitetty ajoneuvon taka-akselille. Laite mahdollistaa ajoneuvon ajamisen sähkömoottorilla pitäen

samalla polttomoottorin sammutettuna. Näin voitiin ensin ajaa joko lyhyitä matkoja tai matalilla nopeuksilla riippuen konfiguraatiosta ja ajoneuvon käyttötarkoituksesta. Uudemmissa ratkaisuissa matkat ovat pidentyneet ja nopeudet kasvaneet. (X-Engineer 2019.)

3.2 Osat

Hybridiratkaisu muodostuu polttomoottorin lisäksi toimilaitteen moottori-generaattoriyksiköstä, konvertterista ja akusta. Aiemmin akku oli 12 voltin akku, mutta nykyään sen kapasiteetti ei riitä. Hybridiajoneuvoissa yleistyy nyt 48 voltin akku, joka on kapasiteetiltaan suurempi. Myös 24 voltin akkuja on käytössä. Akku on kytketty kiinni moottori-generaattoriyksikköön. Suuremman akun oheen voidaan edelleen liittää pienempi 12 voltin akku. Litium-ioni -akut kuumenevat helposti, joten niiden tehoa pitää laskea ylikuumenemisen välttämiseksi. Boschin 48 voltin akun kapasiteetti on 8 Ah. Se kykenee lataamaan 14 kW 10 sekunnin aikana ja purkaamaan 11 kW. Varaustason on oltava kuitenkin vähintään 50 %. (Bosch 2019.)

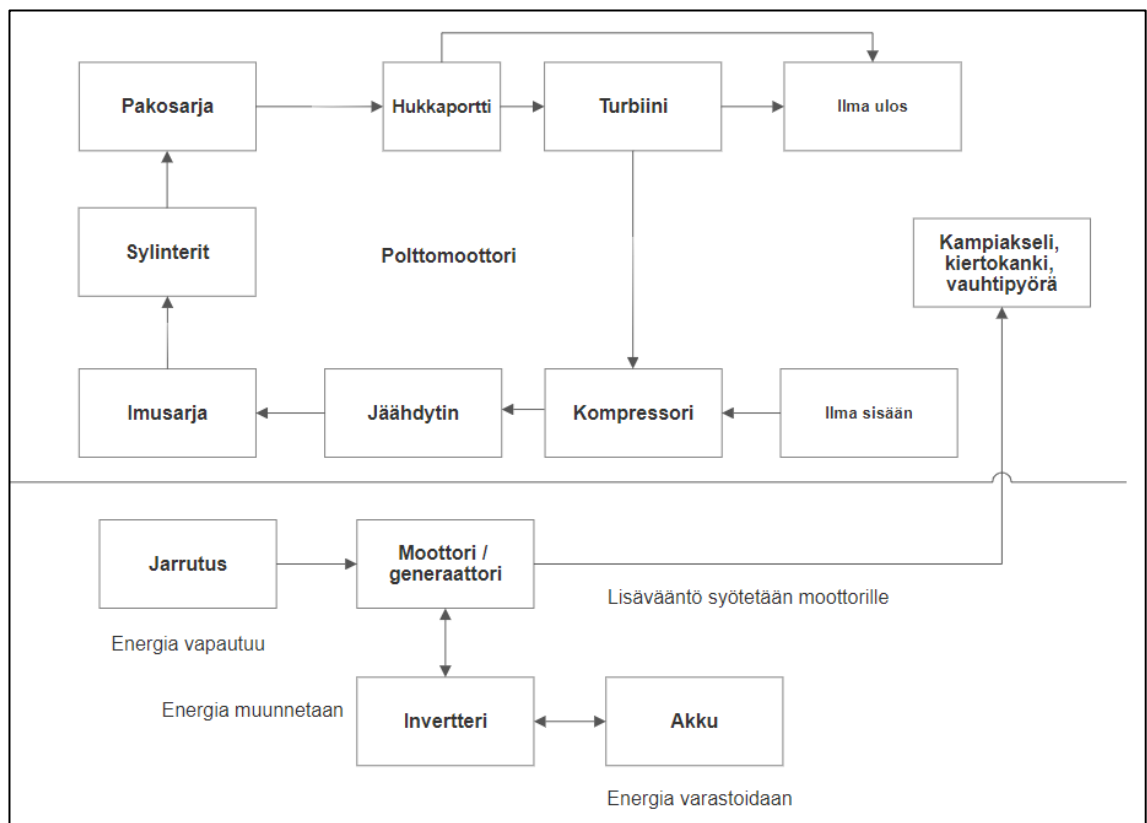
3.3 Energian talteenotto ja hyödyntäminen

Jatkuva liike tuottaa liike-energiaa eli kineettistä energiaa. Kun ajoneuvo jarruttaa ja liike hidastuu, kineettinen energia vapautuu esimerkiksi lämpönä ja menee yleensä hukkaan. Osan siitä voi kuitenkin ottaa talteen. Talteenotettu energia muunnetaan sähköksi ja siirretään generaattorin sekä konvertterin avulla ensin akkuun. Jos ajoneuvo ei tarvitse sillä hetkellä lisävääntöä, jätetään energia akkuun sähkövaraukseksi myöhempää käyttöä varten. Kun ajoneuvo tarvitsee lisävääntöä, sähköenergia siirretään toimilaitteen moottorin avulla väännöksi polttomoottorin vauhtipyörälle tai kampiakselille. Toimilaite voidaan määrittää tuottamaan jatkuvaa vääntöä ja siten laskemaan kulutusta, koska polttomoottoria kuormitetaan vähemmän. Kuormapiikkien aikaan laite voi tuottaa hetkellisesti enemmän vääntöä. Toimilaite voidaan asettaa minimoimaan vain kuormapiikkien aiheuttamat muutokset polttoaineenkulutuksessa, mutta silloin se ei vähennä normaalin kuormituksen aiheuttamaa kulutusta. (X-Engineer 2019.)

Jos työkonetta käytettäessä energiaa ei muodostu riittävästi työkoneneen liikkeestä, niin mikä tahansa liikkuva osa, kuten kaivinkoneen kauha, tuottaa sitä. Silloin voidaan käyt-

tää hyödyksi vapautuvaa potentiaalienergiaa, kun esimerkiksi kaivinkoneen kauha laskeaan alas. Kuten ajoneuvon kiihdyttäminen, myös liikkuvien osien nosto kuluttaa energiaa.

Energian muunto toiseksi energiaksi aiheuttaa häviöitä. Sähköksi muunnettaessa siitä häviää vähintään 10 - 20 % talteenoton aikana ja uudelleen sama määrä siirrettäessä sähköä akusta voimansiirron käyttöön. Akun valinnalla voidaan jonkin verran vaikuttaa häviöihin. Litium-ioniakut ja nikkelimetalliakut ovat tällä hetkellä suosittuja. Niissä häviöt ovat yllämainittua suuruusluokkaa. Litium-ioniakkujen etuja ovat luotettavuus, nopeampi lataus, korkeampi jännite ja energiatiheys sekä pienempi koko. Huonoja puolia ovat pienempi kapasiteetti ja ionien reaktioherkyydestä johtuva korkeampi lämmöntuotto. Nikkelimetalliakkujen etuja ovat laajempi yhteensopivuus, ne ovat turvallisempia ja edullisempia. Niiden varaustaso voi laskea nolnaan ilman ongelmia. Ne tosin myös menettävät enemmän varaustaan joka kuukausi, niiden jännitetaso on matalampi, ne ovat hitaampia ladata eivätkä ole luotettavia laitteissa, joiden kuormitus on matalaa. (X-Engineer 2019.)



Kuva 1. Toimilaitteen toimintakaavio.

3.4 Kineettistä energiaa hyödyntävät tuotteet

Danfoss Editron (entinen Visedo Oy) valmistaa toimilaitteita, joiden tarkoitus on tehdä dieselmoottorista hybridi. Ne ovat osa EM-PMI-sarjaa ja niiden hyötysuhde on noin 96 %. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että kineettisestä energiasta saadaan 96 % talteen, vaan prosessin muut laitteesta aiheutuvat häviöt ovat 4 %. Tuoteperhe koostuu kolmesta sarjasta toimilaitteita eli 300, 375 ja 540. Kuvassa 2 oleva PMI300-T310 edustaa 300-sarjaa ja PMI375-T800 edustaa 375-sarjaa. Laitteiden tarkoitus on pienentää polttoaineenkulutusta vähentämällä moottorin kuormitusta syöttämällä sille lisää vääntöä tarvittaessa. Laitteet voivat tuottaa heti lähes täyden väännön ja toimia myös käynnistysapuna moottorille. T310:n alin pyörimisnopeus on 1100 rpm ja ylin 6000 rpm. Kylmäaineen lämpötilan ollessa 65 °C:tta, laite tuottaa 279 - 353 Nm:ä vääntöä. 40 asteisen kylmäaineen kanssa se tuottaa enintään 399 Nm:ä vääntöä. Akselitehoa T310 tuottaa vähintään 41 kW:a ja enintään 112 kW:a. Tuoteperheen mallien ainoat erot ovat niiden tehon- ja väännötuotossa sekä laitteiden koossa ja painossa. Ne on tarkoitettu työkoneiden, pienempien laivojen ja raskaampien kuljetuskalustojen moottoreihin. Esimerkiksi Sisun Polar Hybrid -rekka ja Logsetin metsätyökoneet ovat hyödyntäneet Danfossin valmistamia toimilaitteita. (Danfoss Editron 2019a.)



Kuva 2. Kuva 2. Danfoss Editron PMI300-T310 (Danfoss Editron 2019.)

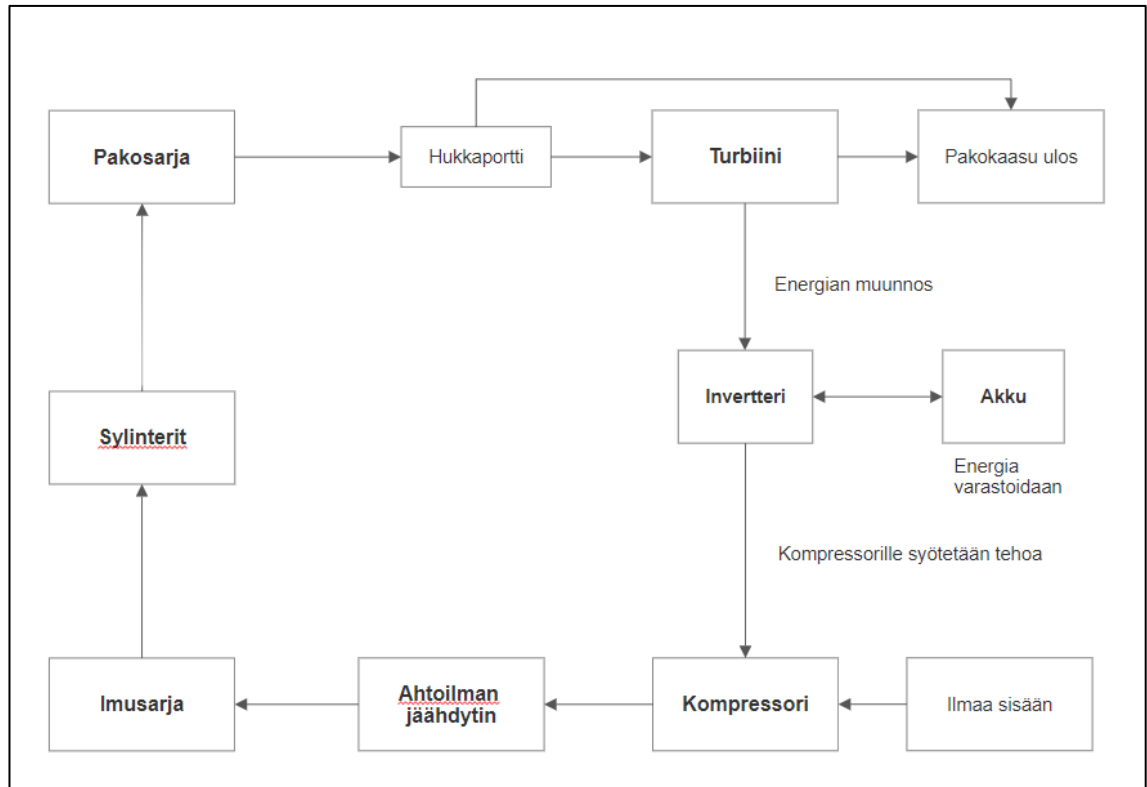
Danfoss valmistaa EC-C1200-450 -konvertteria hybridiratkaisuihinsa. Se on tarkoitettu raskaaseen käyttöön suunniteltuihin ratkaisuihin. Sillä voidaan muuttaa akun jännite vastaamaan korkeampaa tasavirtalinkin jännitettä ja myös ladata akkua korkeammasta jännitteestä huolimatta. Sen avulla voidaan säädellä toimilaitteen moottorin tuottamaa vääntöä ja nopeutta sekä muuntaa vaihtovirta tasavirraksi. (Danfoss Editron 2019b.)

Myös BorgWarner valmistaa kineettistä energiaa hyödyntäviä toimilaitteita, joiden toimintaperiaate on samantyyppinen Danfossin. Esimerkiksi malli HVH250-090 tuottaa jatkuvaa vääntöä enintään 280 Nm:ä ja hetkittäin noin 350 Nm:ä. Alimmillaan laite tuottaa 50 nm:ä vääntöä. Tuotetun väännön määrään vaikuttaa moottorin pyörimisnopeus ja laitteen jännitteen taso, joka voi olla joko 350 V, 500 V, 600 V tai 700 V.

Dana Electronics Oy valmistaa myös sähköisiä toimilaitteita kevyeen (TM4 Sumo LD), keskiraskaaseen (TM4 Sumo MD) ja raskaaseen käyttöön (TM4 Sumo HD). Toimintaperiaate niissä on samanlainen kuin esimerkiksi Danfossin tuotteissa. Käyttötarkoituksen kuormittavuus määrittää toimilaitteen tehontuoton tason. Esimerkiksi keskiraskaaseen käyttöön tarkoitettu laite voi mallista riippuen tuottaa jatkuvaa vääntöä 605 - 1275 Nm ja hetkellisesti jopa 3100 Nm. Danfossiin ja BorgWarneriin verrattuna tehon- ja väännön-tuotto on selvästi korkeampi. (Dana Electronics 2019.)

3.5 Turboahtimen energiaa hyödyntävät tuotteet

Moottorin turboahtaminen tuottaa helposti ylimääräistä energiaa, joka voidaan joko päästää ulos turbiinin ohivirtauskanavan eli hukkaportin kautta ja menettää tai sitä voidaan hyödyntää hybridiratkaisuisissa. Moottorin tuottama ylimääräinen energia voidaan ottaa talteen muuntamalla se ensin sähköksi ja varastoimalla akkuun. Kun kompressorin energiantarve ylittää turbiinin energiantuoton, siirretään akkuun varastoitua energiaa kompressorin käyttöön. Kyseisellä energialla säädetään turboahtimen sisäisen impellerin pyörimisnopeutta ja sen läpi virtaavan ilman määrää. Moottorissa voi yhä olla hukkaportti, jos energiaa joudutaan päästämään ulos.



Kuva 3. Hybriditurbomoottorin toimintakaavio.

Ilmanpaineen nosto moottorissa vaatii myös tehoa ja mekaanisessa turboahtimessa se teho otetaan moottorista. 12 voltin akku ei siis todennäköisesti riitä, vaan se olisi korvattava 48 voltin akulla, muuten sähköinen turboahdin ei saavuta täyttä potentiaaliaan. Sähköisen turboahtimen etu on myös minimaalinen viive ja korkea pyörimisnopeus. Tavalliset ahtimet pyörivät korkeintaan 60 000 rpm ja sähköiset jopa 120 000 rpm. Mekaanisen turboahtimen heikkous on myös korkeampi lämmöntuotto.

Valmistajista Valeo, Honeywell ja BorgWarner ovat kehittäneet sähköisiä turboahtimia. Valeo on tehnyt yhteistyötä Audin kanssa ja Honeywell Ferrarin kanssa. Valeon mukaan jopa 15 - 20 % lasku polttoainenkulutuksessa olisi mahdollista saavuttaa sähköisen turboahtimen ja sopivan energian talteenottojärjestelmän avulla. Valeo on asentanut sen 2,4 - 4 litraisiin moottoreihin eli sitä ei ole vielä asennettu suurempiin työkonemoottoreihin. Järjestelmän voi rakentaa kolmelle eri jännitteelle, joko 12, 24 tai 48 V. (Valeo 2019.)



Kuva 4. Valeon sähköinen turboahdin (Valeo.)

BorgWarner valmistaa sähköisiä turboahtimia, jotka myös sisältävät integroidun moottori-generaattoriyksikön, 48 voltin akun ja ohjaimen. Pienemmän laitteen jatkuva teho on 11 kW ja enimmäisteho 17 kW. Tehokkaamman tuottama jatkuva teho 13 kW ja enimmäisteho on 23 kW. Sen on tarkoitus vähentää päästöjä ja laskea polttoaineenkulutusta. Sähköisen toiminnon voi myös kytkeä pois päältä. (BorgWarner 2019a.)

BorgWarnerin eBoost on kaksoisturbo, jossa sähköinen toimilaite ja perinteinen turboahdin toimivat sarjassa. Painetta järjestelmässä voidaan nostaa helpommin ja tehokäyrää laajentaa. Järjestelmä voidaan myös räätälöidä paremmin haluttua tarkoitusta varten. Kompressoria säädellään erillisen sähkömoottorin avulla, jonka ylin painesuhde on 2,2 ja enimmäisnopeus on 100 000 rpm. Perinteisessä turboahdettussa moottorissa vääntömometti laskee matalilla kierroksilla ja riittävän väännön saavuttamisessa moottorin käynnistyksen jälkeen on muutaman sekunnin viive. Lisälaite tuottaa korkeamman vääntömomentin myös matalilla kierroksilla ja poistaa turboahdettamasta viiveestä jopa 2,5 sekuntia. Laite voi kasvattaa vääntömomenttia enintään 50 %. Se myös

vähentää polttoaineenkulutusta ja päästöjä sekä parantaa moottorin vastetta transient-ajossa. Laitteen avulla myös pienemmät moottorit ja matalammat kierrosluvut tuottavat riittävästi vääntöä ja samalla polttoaineenkulutus voi laskea. Laite tuottaa jatkuvan 10 kW:n tehon ja hetkellisesti enintään 23 kW:n tehon. (BorgWarner 2019b.)

Testiympäristössä moottorin taloudellisuus oikeassa tilanteessa voi jäädä epäselväksi. Polttoaineenkulutukseen vaikuttavat eri tekijät, kuten ajo-olosuhteet, akun varaustaso ja virrankulutus. Kaupunkiajo, jossa jarrutetaan ja kiihdytetään kuluttaa enemmän polttoainetta kuin tasainen maantieajo. Lähes täydellä akulla polttoaineenkulutus voi laskea enemmän kuin akulla, jonka varaustaso on alle puolet. Volkswagen simuloi 48 voltin hybridiratkaisua ajamalla FTP-75 testisyklin neljällä eri akun varaustasoilla. Polttoaineenkulutus laski noin 12 %, kun akun varaustaso oli simulaation alkaessa 75 % ja vain 6 %, kun akun varaustaso oli 45 %. (Volkswagen 2013.)

Audin järjestelmä valitsee tilanteesta riippuen joko lepotilan tai polttomoottorin hetkellisesti sammuttavan tilan. Esimerkiksi jos ajoneuvolla ajetaan vapaalla voidaan polttomoottori sammuttaa jopa 40 sekunniksi. Kaasua painettaessa polttomoottori käynnistyy. Se mahdollistaa polttoaineenkulutuksen laskun.

Akun virrankulutus on suurin alkuvaiheessa, jopa useita kWh:a. Alun jälkeen akun virrankulutus laskee selvästi ja tasantuu. Korkeampi sisäinen resistanssi laskee akun hyötysuhdetta ja lämpötasapainoa. Akkua ei kannata ladata aivan täyteen, näin akku kestää käytössä pidempään.

Akun varaustaso kannattaa pitää noin 40 - 80 % välillä, koska sen täyteen lataaminen tai tyhjäksi päästäminen laskee akun elinikää. Akun varaustason pudotessa alle asetetun rajan, generaattori alkaa lataamaan akkua ja lopettaa se kun akun varaustaso saavuttaa asetetun ylärajan. Siinä vaiheessa energia päätetään karkaamaan eikä sitä muunneta sähköksi. Jos akun varaustaso on matala, ajoneuvo käyttää vain polttomoottoria. (X-Engineer 2019.)

Toimilaitteen käyttöä voidaan optimoida ajajan ominaisuuksien perusteella, jolloin energiankulutus laskee ja polttoaineenkulutusta voidaan hallinnoida. Hallinnoimalla toimilaitetta voidaan saavuttaa 5 prosenttiyksikköä korkeampi akun varaustaso aggressiivisen ajon lopussa, kuin ilman sitä. Rauhallinen ajo säilyttää akun varaustason korkeammalla ilman säätelyäkin. Polttoaineenkulutus voi laskea säätelyn myötä 3 % - 8 % ja sillä voi leikata kohonnutta kulutusta, esimerkiksi akkua ladatessa. Näin korkein kulutustaso voisi laskea lähemmäs normaalia kulutusta ja toimilaitteella saavutettaisiin enemmän hyötystä.

Nämä toimet huomioon ottaen toimilaitteen käyttö on kannattavaa, etenkin kaupunkiajossa. (Seulgi Lee, Jinguy Choi, 2015.)

4 SIMULAATIOMALLIN RAKENTAMINEN

4.1 Malli ilman toimilaitetta

Taulukko 1. Moottorin osat simulaatiomallissa.

Moottorin osa	Määrä
Sylinterit	4
Kampiakseli	1
Polttoaineen syöttö	4
Polttoaineensyötön ohjain	1
Venttiilit	16
Jäähdytin	1
Kompressori	1
Turbiini	1
Hukkaportti	1
SensorConn	7
ActuatorConn	7

Taulukko 2. Käytetyt parametrit.

Parametri	Esimerkkiarvo
Kierrosnopeus	1500 rpm
Ruiskutusaika	-3,9
Ruiskutusaine	1270 bar
Ruiskutusmäärä	147,8 mg
Tehollinen keskipaine	21,4 bar
Ympäristön paine	1 bar
Ympäristön lämpötila	23,6 °C

Moottori on nelisynterinen dieseliä polttoaineena käyttävä työkonemoottori, joka on turboahdettu ja siinä on hukkaportti sekä ahtoilman jäähdytin. Sylinterin halkaisija on 108 mm ja iskunpituus 133 mm. Tilavuudeltaan moottori on 4,9 litraa. Polttoaineensyöttö on Common rail -tyyppinen. Simulaatiomalli koostuu kahdesta osasta. Perusmoottori, johon kuuluu 4 sylinteriä, kampiakseli, polttoaineensyöttö, venttiilit, imu- ja pakosarjan osat.

Imuilman otto liitettiin kompressorin ja ahtoilman jäähdyttimen kautta imusarjaan. Imusarjan 4 päätä kiinnitettiin sylintereihin ja niiden kautta pakosarjan päihin. Putket yhdistyvät pakosarjassa yhdeksi putkeksi, joka liittyy turbiiniin kautta pakoputkeen.

Ympäristön paineiksi asetettiin ensin 1 barin sijasta kokeellisista mittauksista saadut suhteelliset paineet, jotka olivat kierrosluvusta riippuen 2,3 ja 3 barin välillä. Myös ruiskutusaine ja syötetyn polttoaineen määrä asetettiin vastaamaan mitattuja arvoja. Niiden avulla laskettiin ruiskutusajanjakso. Perusmoottoria simuloitiin ja selvitettiin akseliteho, ominaiskulutus, ilmavirta, polttoainevirta ja pakosarjan lämpötila. Kun simulaation ja kokeellisten tulosten ero mittauspisteissä on korkeintaan noin 3 %, malli on hyvin kalibroitu.

Kampiakselin kitkamalliin tehtiin pieniä muutoksia. Hieman matalampi kitka nostaa simulaatiossa moottorin akselitehoa. Virtauskertoimet asetettiin suoraan imu- ja pakosarjan venttiilien asetuksiin. Liian symmetrinen imusarja voi aiheuttaa resonanssia, josta seuraa poikkeamia ilmavirran tuloksissa matalammilla kierrosluvuilla.

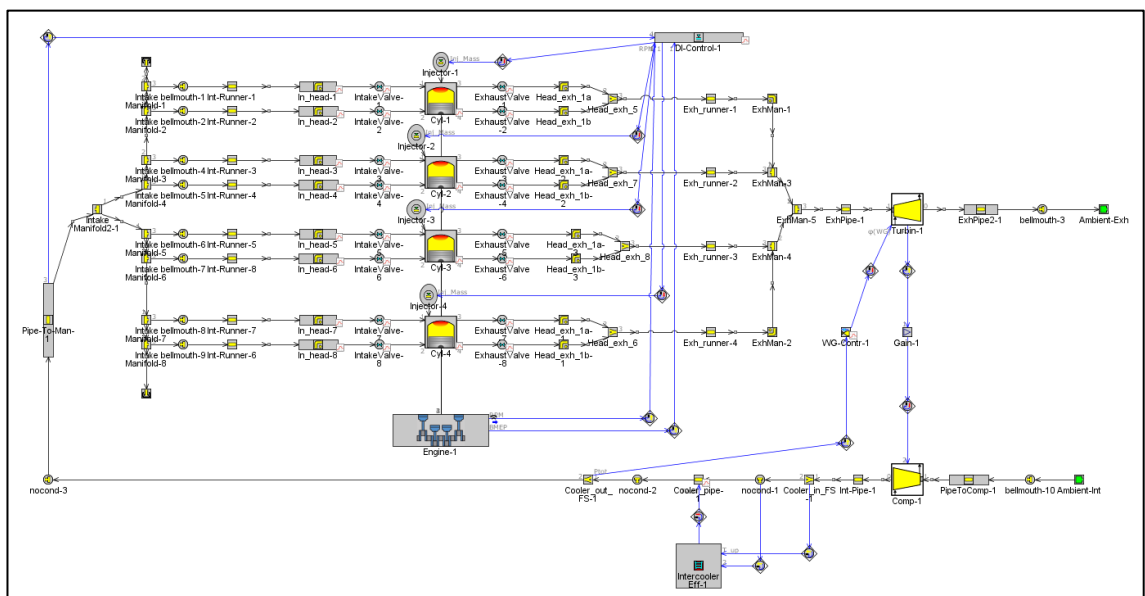
Ahtoilman jäähdytystä voi simuloida asettamalla ensin kokeellisesti mitatun jäähdyttimen jälkeisen lämpötilan suoraan imusarjan lämpötilaksi ja verrata lämpötiloja mitattuihin tuloksiin. Seuraavaksi mallia monimutkaistettiin rakentamalla jäähdytin, joka koostuu kahdesta y:n muotoisesta haarasta ja niiden välisestä putkesta, johon liitettiin jäähdyttimen tehokkuutta simuloiva IntercoolerEff-komponentti. Jäähdyttävän aineen lämpötilaksi asetettiin 21 °C. Ympäristön lämpötila palautettiin mitattuun lämpötilaan eli 22 °C:seen. Jäähdytys laskee kompressorin jälkeistä lämpötilaa parhaimmillaan noin 100 °C:lla. Simulaatiossa moottorin putkien ja osien seinämälämpötiloja voi asettaa joko suoraan tai antaa ohjelman laskea ne. Niille asetettiin sitä varten realistiset materiaaliominaisuudet, esimerkiksi pinnan karheuden osalta sekä suuntaa antava aloituslämpötila, josta ohjelma aloitti laskennan.

Kun moottoria muokattiin osakuormalle sopivaksi, siihen lisätään polttoaineensyöttöä säätelevä komponentti, esimerkiksi ControllerDInject. Sen avulla syötettävän polttoaineen määrää säädettiin ja moottorin osakuormitusta voitiin simuloida. Rajamomenttiajossa moottorin kuormitus on noin 100 %.

Seuraavaksi lisättiin turbiini ja kompressorin. Tiedot kokeellisessa moottorissa käytetyistä turbiinista ja kompressorista olivat puutteelliset, joten niiden ominaisuuksia kuvaavia karttoja ei voinut tehdä. Ohjelma mahdollistaa kuitenkin yksinkertaistettujen komponenttien käytön yksityiskohtaisten karttapohjaisten sijasta. Tällöin muokattavia asetuksia on vähemmän, mutta käytännössä sama reaktio saadaan aikaan. Ympäristön paineeksi

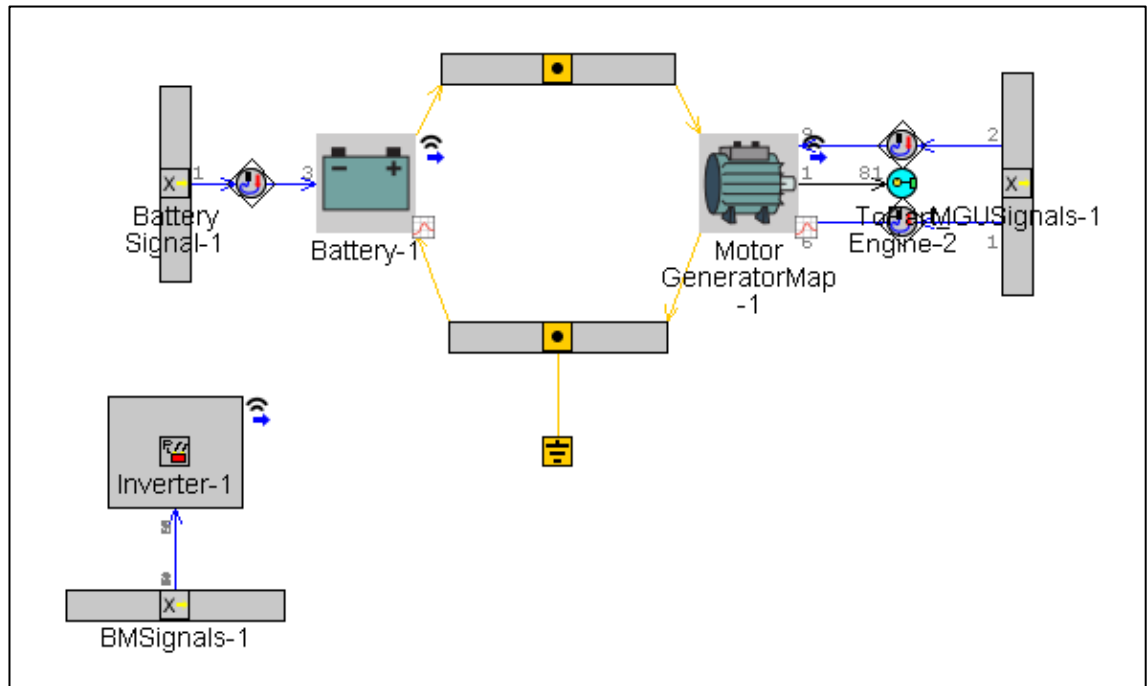
asetettiin 1 bar. Näin voidaan simuloida kompressorin toimintaa ja seurata sen tuottamia paineita moottorissa. Simulaatiomallin paineet kalibroitiin lähelle mitatun moottorin tuloksia. Turbiinissa pakosarjan paine laski hyvin lähelle ympäristön painetta eli 1 baria. Turbiinin suuaukon halkaisija on tärkeä, kun kalibroidaan moottorin paineita vastaamaan kokeellista dataa. Liian pieni suuaukko aiheuttaa paineiden kasvun liian suureksi ja liian suuri jättää ne liian pieneksi.

Hukkaportti on venttiili, joka avautuu, kun ahtopaine on suurempi kuin hukkaportin jousen voima. Se päästää osan pakokaasusta turbiinin ohi suoraan pakoputkeen ja sen ansiosta ahtaamisen tuottama ylimääräinen energia ei jää moottoriin. Liian suuri paine moottorissa vaurioittaisi sen osia ja vikaantumisriski kasvaisi. Ilman hukkaporttia paineet nousevat helposti liian suuriksi, kuten 4 - 5 bariin. Ohjelmasta löytyy hukkaportille oma WG-Controller-komponentti, joka liitettiin SensorConn ja ActuatorConn-komponenteilla suoraan turbiiniin ja kompressorin jälkeiseen putkeen. Hukkaportin avautumispaine asetetaan 2,9 bariin, jolloin se simuloi venttiilin avautumista. Simulaatiossa turboahdinta kalibroidaan pääasiassa hukkaportin avautumispaineen ja turbiinin suuaukon halkaisijan avulla. Myös hyötysuhteilla voitiin vaikuttaa jonkin verran painetasoihin. Realistiset hyötysuhteet kompressorille ja turbiinille ovat 65 % ja 75 % välissä. Mallissa hyötysuhteeksi asetettiin 70%.



Kuva 5. Simulaatiomalli ilman toimilaitetta.

4.2 Toimilaitteen lisäys malliin



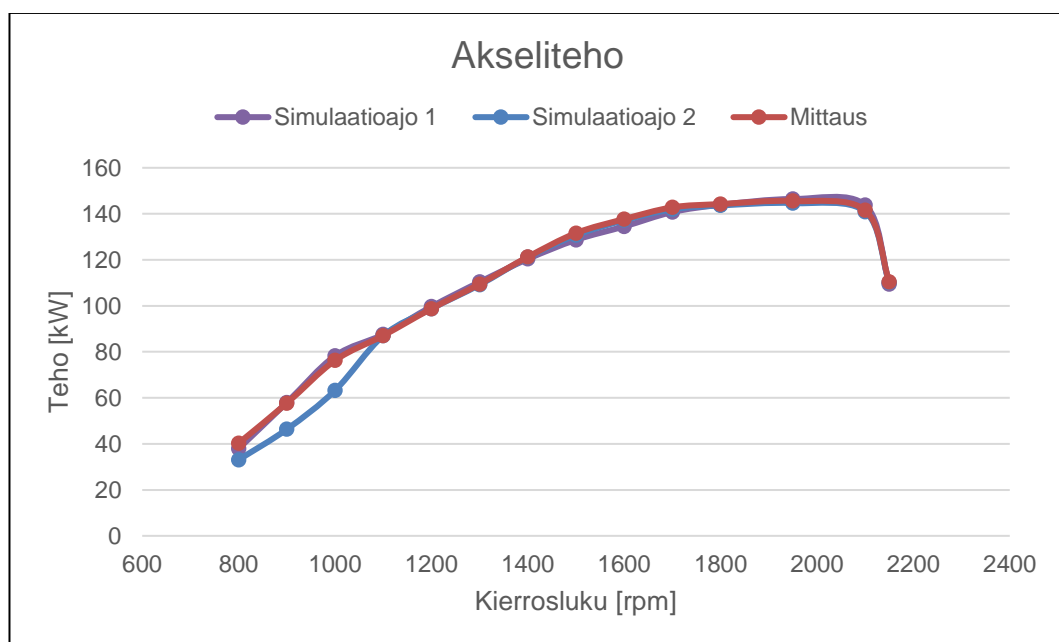
Kuva 6. Toimilaite.

Malliin lisätty toimilaite simuloi lisävääntöä ja se on liitetty kampiakselia simuloivaan komponenttiin. Se sisältää pienen moottori-generaattoriyksikön, akun, invertterin, yhteydet näiden välillä sekä laitteita säätelevät signaalit. Moottori on MotorGeneratorMap-komponentti, joka sisältää hyötysuhdekartan eri kierrosluvuille. Sillä voi simuloida esimerkiksi Danfossin tai BorgWarnerin vastaavien toimilaitteiden hyötysuhteita, jotka ovat 95 - 96 %. Akulle asetetaan realistinen varaustaso, esim. 65 % sekä jännitteet ja sisäiset resistanssit sekä kapasiteetti, esimerkiksi 8 Ah. Konvertertia simuloi BatteryPowerLim-komponentti, jolla säädellään akkua. Signaaleilla voidaan myös säädellä komponenttien toimintaa luomalla linkkejä attribuuteista toiseen.

5 TULOSTEN TARKASTELU

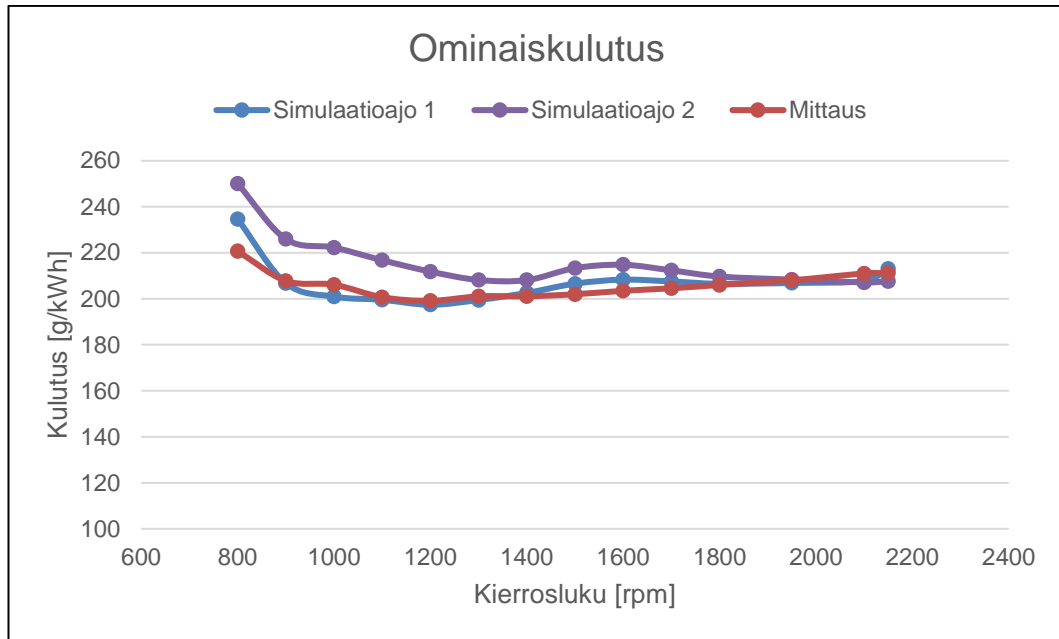
5.1 Ilman toimilaitetta

Simulaatiosta saatuja tuloksia verrattiin testiajoista saatuihin tuloksiin. Moottoria testattiin selvittämällä ensin sen maksimi-vääntömomentti ja -teho koko kierrosalueella. Ohjelmaan syötettiin tarvittavat tiedot, kuten pyörimisnopeudet, polttoainemäärät ja polttoainesyötön paineet. Simulaatio ajoi moottoria jokaisella valitulla kierrosnopeudella ja tuotti tiedot esimerkiksi akselitehosta, ominaiskulutuksesta ja lämpötiloista.



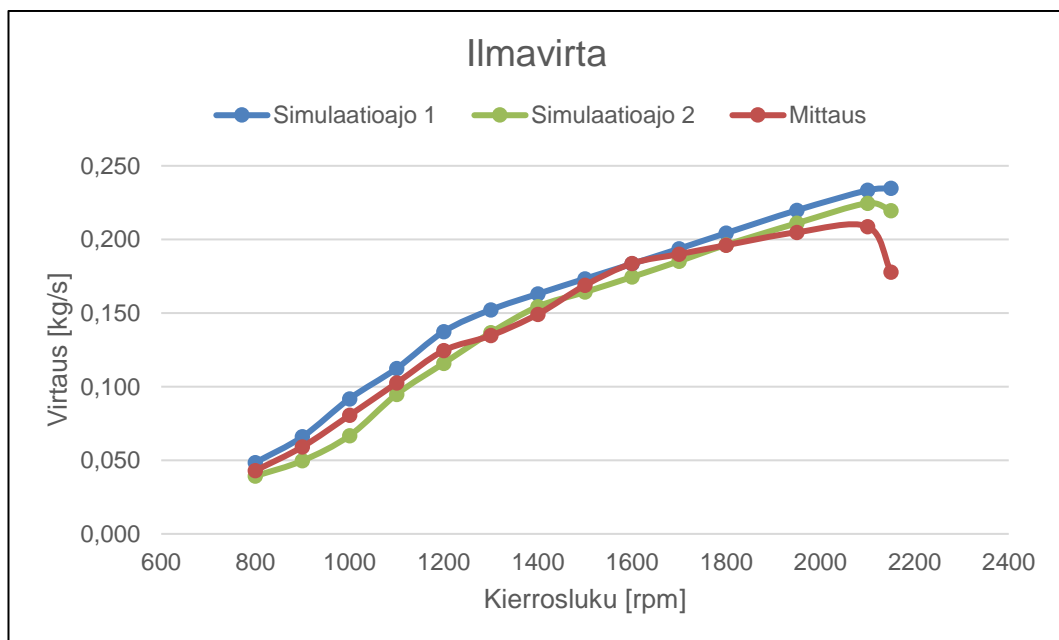
Kuvio 1. Moottorin akseliteho.

Ylläolevassa kuviossa on kahden simulaatioajon tulokset moottorin akselitehosta. Kolmas käyrä kuvaa kokeellista dataa. Akselitehon simulaatio ennustaa hyvin tarkasti. Tehon lisäksi on tärkeää simuloida moottorin ominaiskulutusta, ilmavirtausta ja pakokaasun lämpötiloja. Akseliteho on korkeimmillaan noin 145 kW ja laskee alhaisilla kierroksilla noin 40 kW:iin.



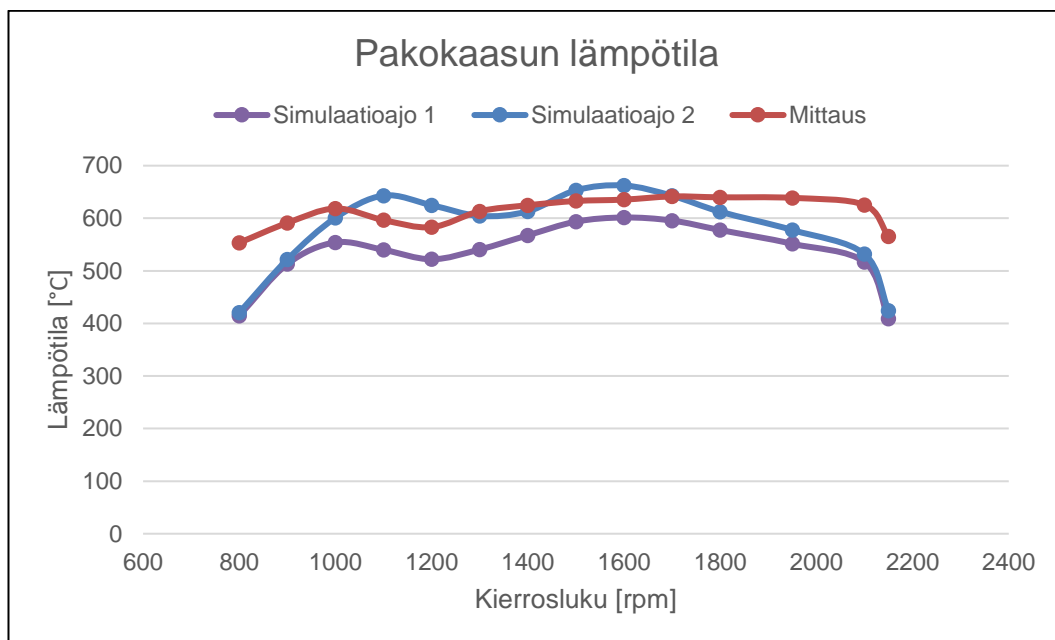
Kuvio 2. Moottorin ominaiskulutus.

Simulaatio ennustaa moottorin ominaiskulutuksen melko tarkasti korkeammilla kierrosluvuilla, mutta matalilla kierroksilla simulaation tarkkuus heikkenee. Moottorin ominaiskulutus on koko ajon 200 - 220 g/kWh välillä.



Kuvio 3. Moottorin ilmavirta.

Simulaatio ennustaa moottorin ilmvirtauksen melko lähelle useissa mittauspisteissä, mutta korkeimmilla kierroksilla simulaation tarkkuus heikkeni.

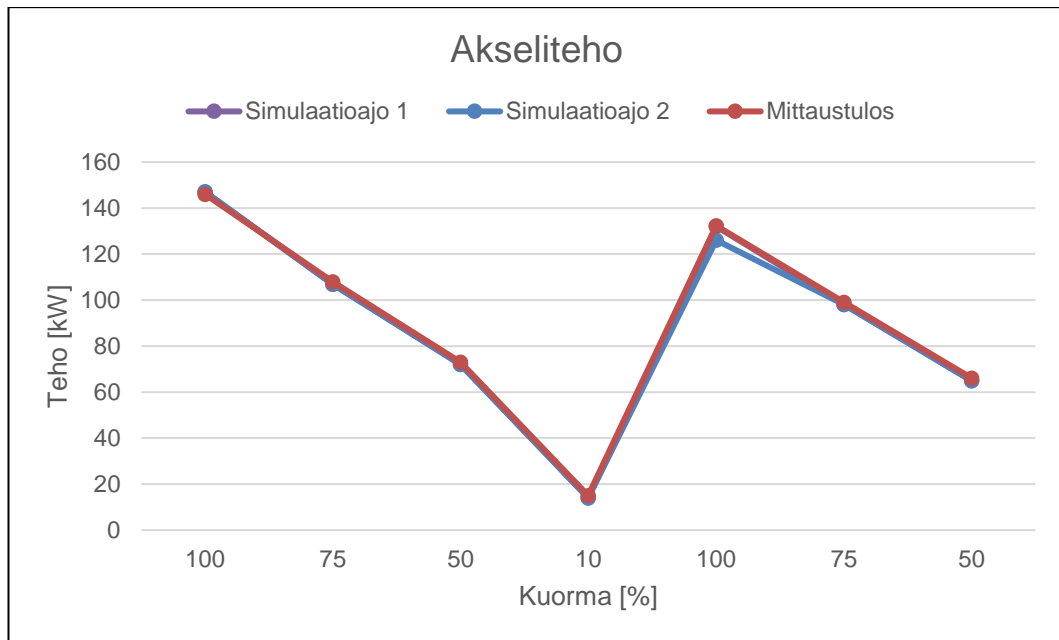


Kuvio 4. Pakokaasun lämpötilä.

Pakokaasun lämpötilojen suhteen simulaation tuloksissa oli jonkin verran heittelyä. Simulaatioajo 1 erosi mitatuista tuloksista etenkin korkeampien kierrosnopeuksien kohdalla. Matalampien kierrosnopeuksien kohdalla molemmissa ajoissa oli nähtävää eroa mittauksiin nähden.

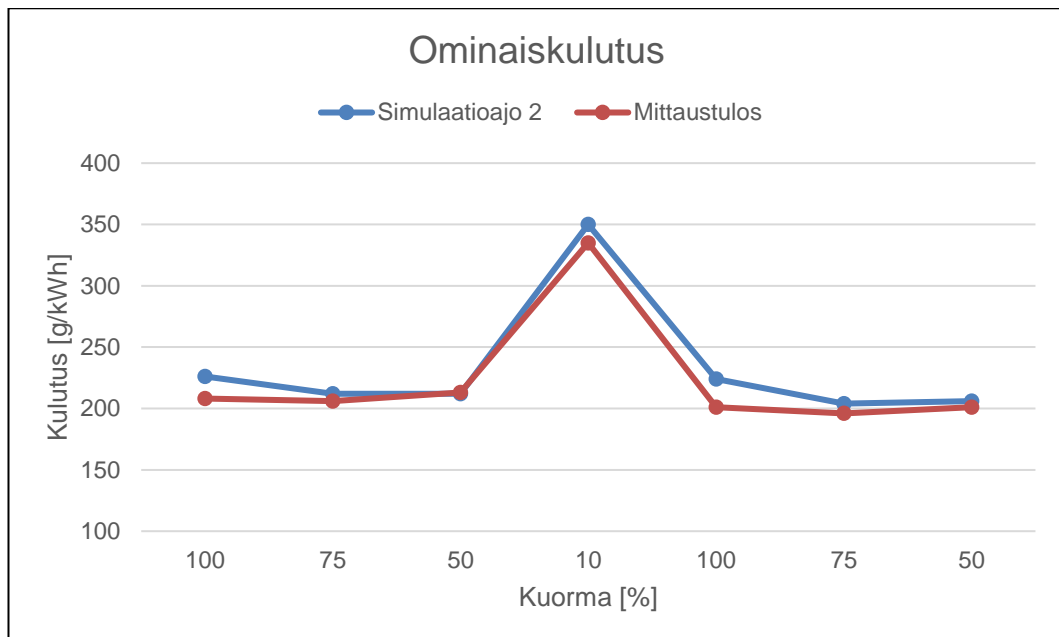
Moottorilla ajettiin myös toinen rajamomenttiajo sen koko kierrosalueella 2195 - 800 rpm. Edes samalla moottorilla mitatut tulokset eivät ole identtisiä eri ajojen välillä.

Moottorin osakuormittamiseen on olemassa testiajoja, kuten NRSC eli Non-road steady cycle, joka on non-road -moottoreille tarkoitettu standardi testisykli. Siinä ajetaan kahdeksan staattista mittauspistettä kahdella eri pyörimisnopeudella. Ensimmäisellä kuormalla ja sitten kuormitus lasketaan 75 %:iin, 50 %:iin ja lopuksi 10 %:iin. Lisäksi moottoria ajetaan kerran tyhjäkäynnillä. Moottorin kuormitusta säädetään laskemalla syötetyn polttoainemäärää.



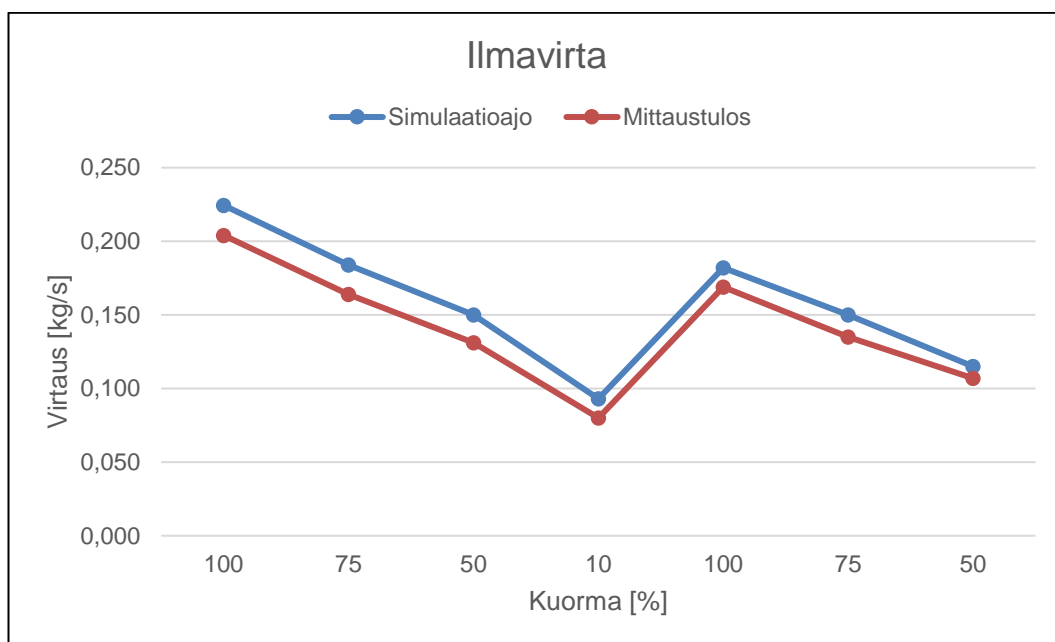
Kuvio 5. Akseliteho osakuormituksessa.

Simulaation tulokset moottorin akselitehon suhteen ovat hyvin lähellä kokeellisia mittaustuloksia. Ero oli useissa mittauspisteissä noin 1 %. Mittauspisteessä, jossa moottoria ajettiin 1950 rpm 10 % kuormalla, ero oli noin 6 %.



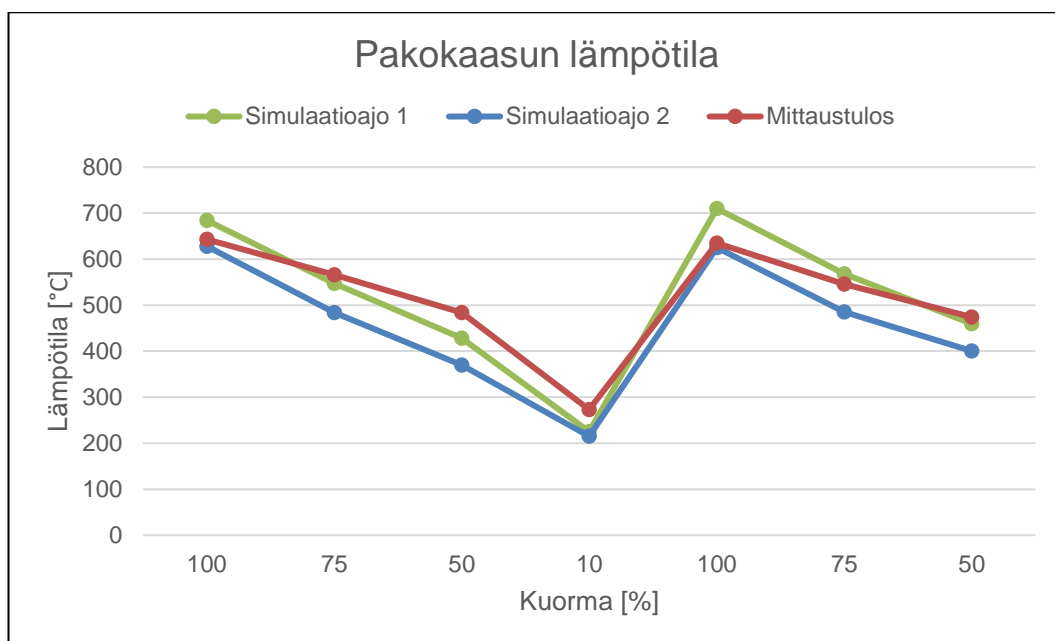
Kuvio 6. Ominaiskulutus osakuormituksessa.

Ominaiskulutuksen suhteen käyrä on hyvin samanlainen, mutta simulaation tulokset ovat hieman korkeammat kuin mitatut. Erot olivat 0,5 % - 4 %.



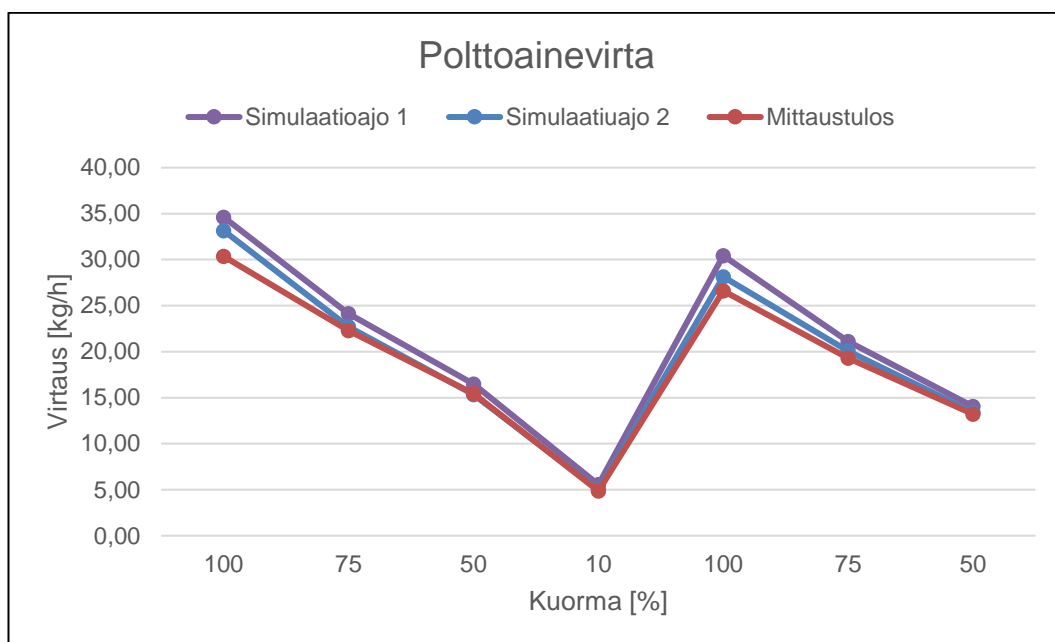
Kuvio 7. Ilmavirta osakuormituksessa.

Simulaatio ennustaa ilmavirran hieman alakanttiin. Erot sen ja mitaustulosten välillä olivat 5 - 15 %.



Kuvio 8. Pakokaasun lämpötilä osakuormituksessa.

Pakokaasun lämpötiloissa oli myös eroja. Erot simulaation ja mittausten välillä olivat 1,5 % - 18 %.

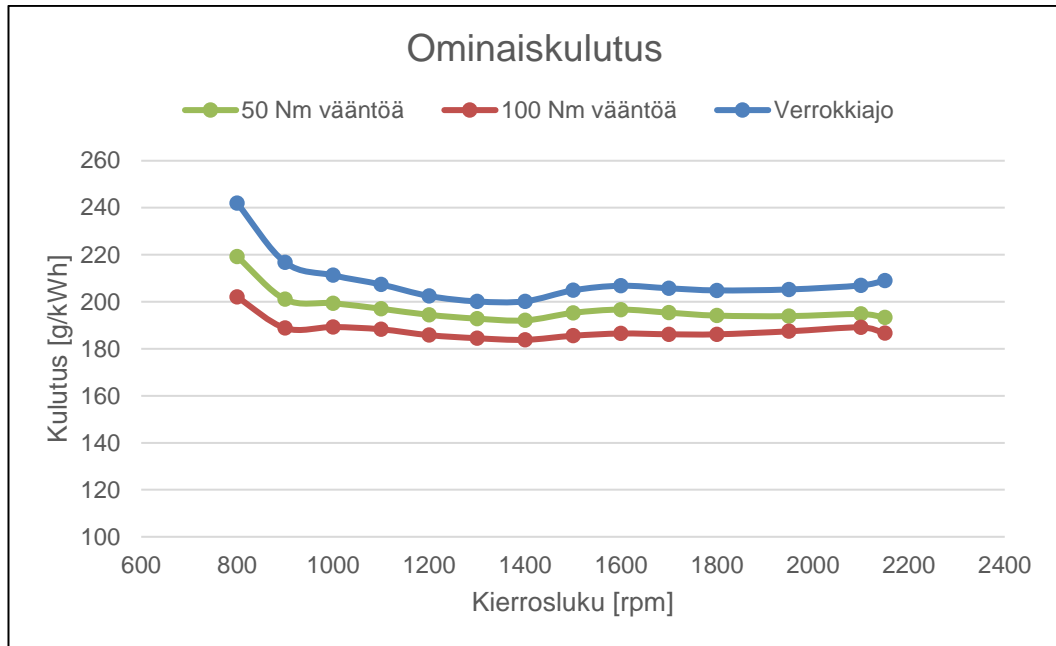


Kuvio 9. Polttoainevirta osakuormituksessa.

Polttoainevirran suhteen simulaation tulokset ovat melko lähellä mitattuja. Erot 0,3 - 4,1 %. Toisessa ajossa erot olivat 0,7 - 7 %.

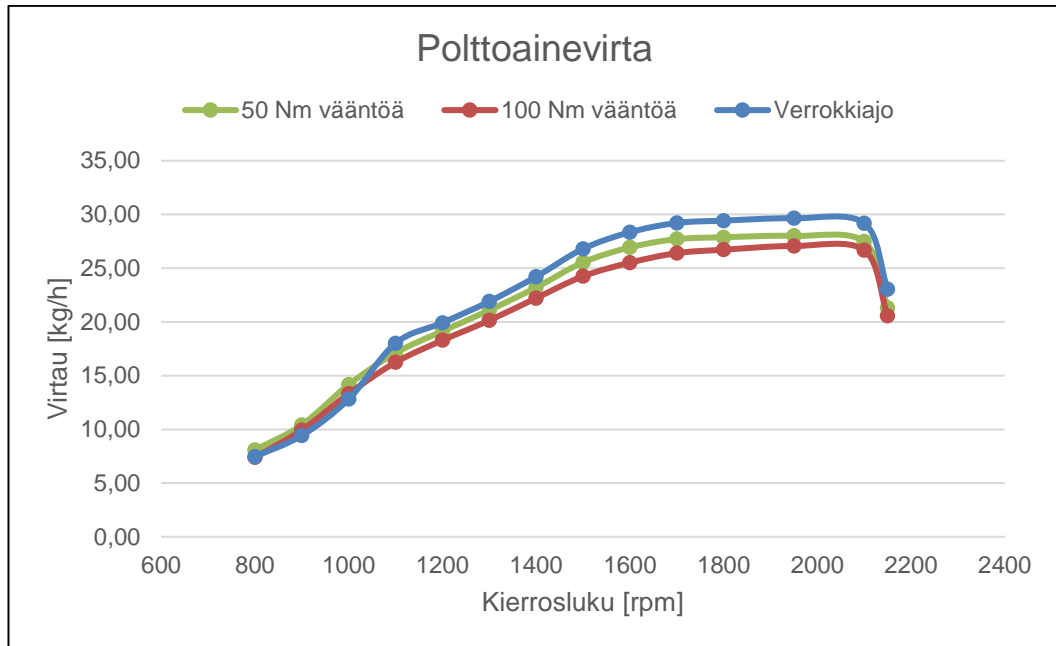
5.2 Toimilaitteen vaikutus tuloksiin

Vääntöä lisäävillä toimilaitteilla on valmistajien mukaan noin 5 - 10 %:n vaikutus kulutukseen. Se on realistinen tavoite myös tässä tapauksessa. Tulevaisuudessa valmistajat pyrkivät laskemaan polttoaineenkulutusta 15 %, jopa lähes 20 %. Prosessin merkittävin häviö muodostuu talteenotettavan energian muuntamisessa ja siirtämisessä ensin akkuun sähkövaraukseksi ja myöhemmin pois akusta väännöksi ajoneuvon käyttöön. Akun tyyppi vaikuttaa hieman häviöiden määrään. Paras valinta tältä osin on litium-ioni akku, jonka häviöt energian latauksessa ja purkamisessa ovat kussakin 10 - 20 %. Toimilaitteella voi muuten olla korkea hyötysuhde eli sen komponentit aiheuttavat vain noin 5 % häviöt. Suoraan prosessiin liittyviä häviöt ovat yhteensä siis 20 - 40 %. Tämän lisäksi ulkoiset olosuhteet aiheuttavat jonkin verran häviöitä, mutta ne eivät liity olennaisesti moottorin ja toimilaitteen kehitykseen.



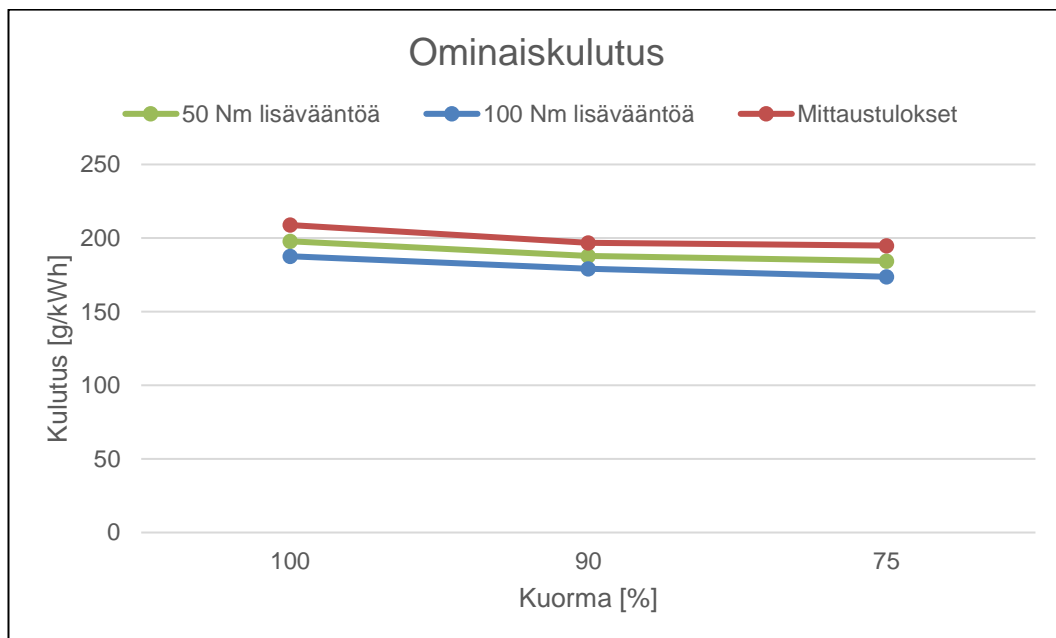
Kuvio 10. Toimilaitteen vaikutus ominaiskulutukseen.

Toimilaitteen avulla on mahdollista laskea moottorin ominaiskulutusta. 50 Nm:n lisävääntö laskee simulaatiossa ominaiskulutuksen useissa pisteissä noin 195 g/kWh:iin. 100 Nm laskee sen noin 185 g/kWh. 50 Nm lisäväännöllä ominaiskulutus laski 3,8 - 6,5 % ja 100 Nm lisäväännöllä 8,5 - 11 %. Aivan korkeimmilla ja matalimmilla kierrosluvulla muutos oli suurempi, mutta niissä oli enemmän poikkeamaa mittaustuloksiin, joten tulokset ovat niiltä osin epätarkkoja. Mentäessä yli 100 Nm:n, alkavat muutokset olla vähäisiä valtaosassa mittauspisteitä. Vain alimmat kierrosluvut hyötyvät enemmän suuremmasta määrästä lisävääntöä. Jos moottorille syötetään esimerkiksi 279 Nm lisävääntöä, ominaiskulutus laski 100 Nm:n lisävääntöön verrattuna keskimäärin vain 2 g/kWh lisää. Polttoainevirta laski keskimäärin 0,09 g/s lisää. Yli 100 Nm lisävääntöä ei tuo simuloitavalla moottorilla merkittävää lisähyötyä polttoaineenkulutukseen, jos moottoria ei kuormiteta normaalia enemmän. Toimilaitteen on kuitenkin hyödyllistä kyetä tuottamaan hetkellisesti enemmän vääntöä, jos kuormapiikkejä on odotettavissa tai moottoria kuormitetaan usein raskaasti.



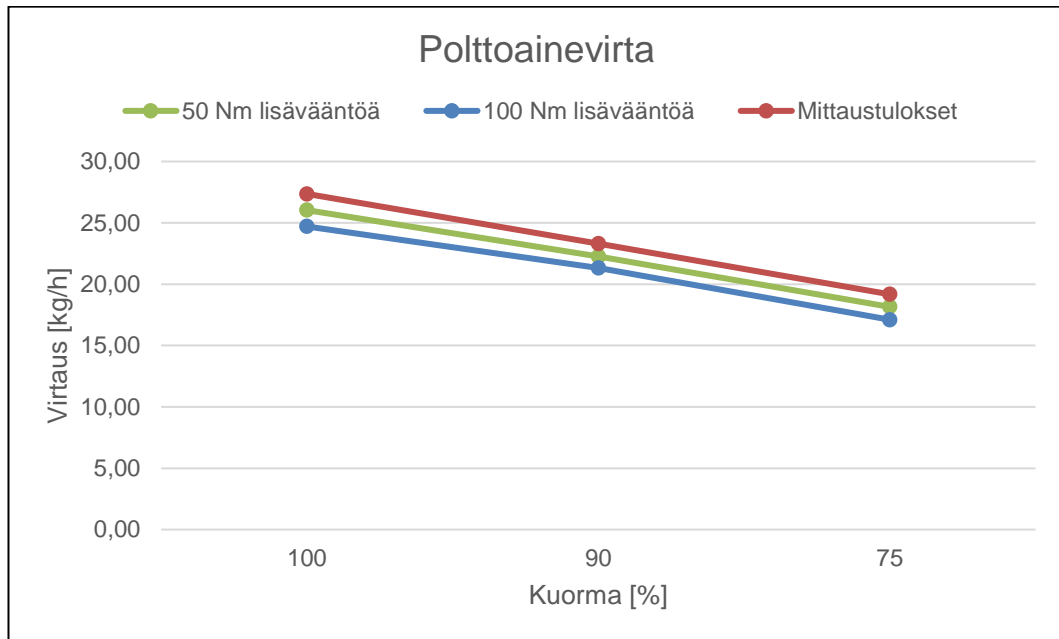
Kuvio 11. Toimilaitteen vaikutus polttoainevirtaan.

Moottorin polttoainevirta laskee 0,5 - 1,1 kilolla tunnissa useissa mittauspisteissä. Matalilla kierroksilla ero on alle 0,1 - 0,4 kiloa tunnissa. 50 Nm lisäväännöllä muutos oli 3,8 - 6 % ja 100 Nm väännöllä 8,7 - 11 %. Oikeassa ajotilanteessa kulutus laskee hieman vähemmän johtuen ympäristötekijöistä, kuten vierintä- ja ilmanvastuksesta.



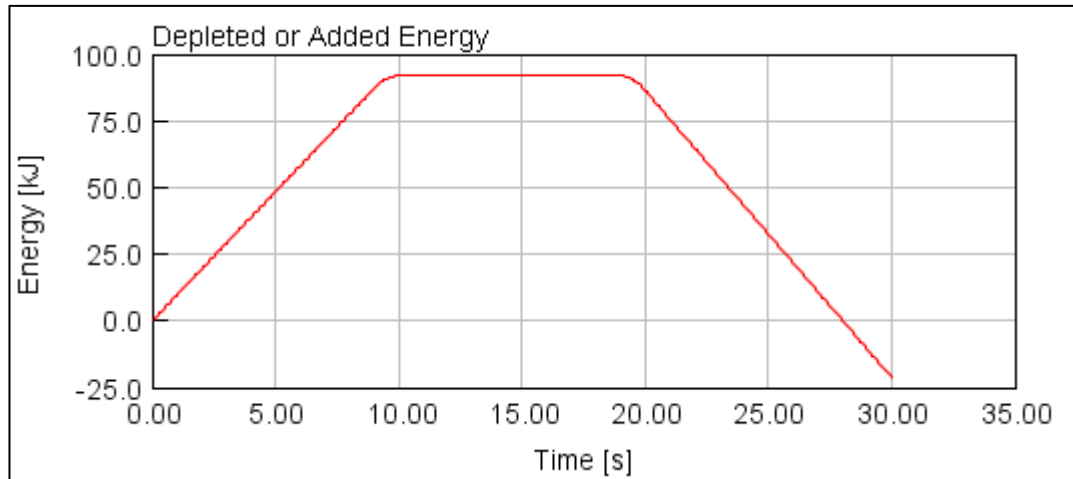
Kuvio 12. Toimilaitteen vaikutus kulutukseen osakuormituksessa.

Lisäväännön vaikutusta osakuormituksessa simuloitiin ajamalla moottoria kolmessa kuormitusasteessa ideaalin kulutuksen alueella eli 1500 rpm. Ominaiskulutus laskee keskimäärin 4,7 - 5,7 %, kun moottorille lisätään 50 Nm ja 9,7 - 12 %, kun vääntöä lisätään 100 Nm.



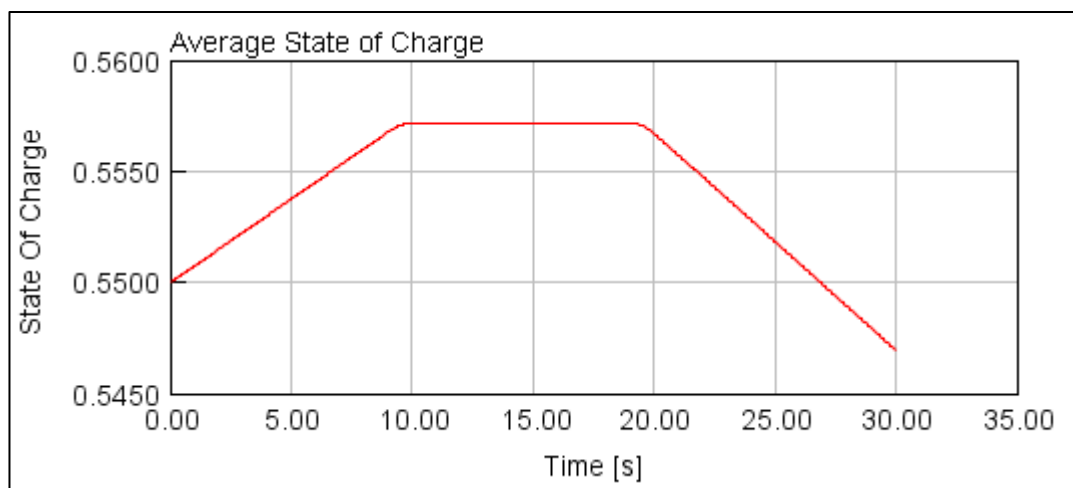
Kuvio 13. Toimilaitteen vaikutus polttoainevirtaan osakuormituksessa.

Polttoainevirta laskee myös 4,7 - 5,6 %, kun moottorille syötetään 50 Nm lisävääntöä. Lasku on 9,1 - 12 %, kun lisävääntöä syötetään 100 Nm. Suuremmilla vääntömäärillä muutokset ovat selvästi pienempiä mitä lähempänä testattu moottori on 100 % kuormitusta.



Kuvio 14. Akun energioiden muutos kierrosnopeudella 1950 rpm.

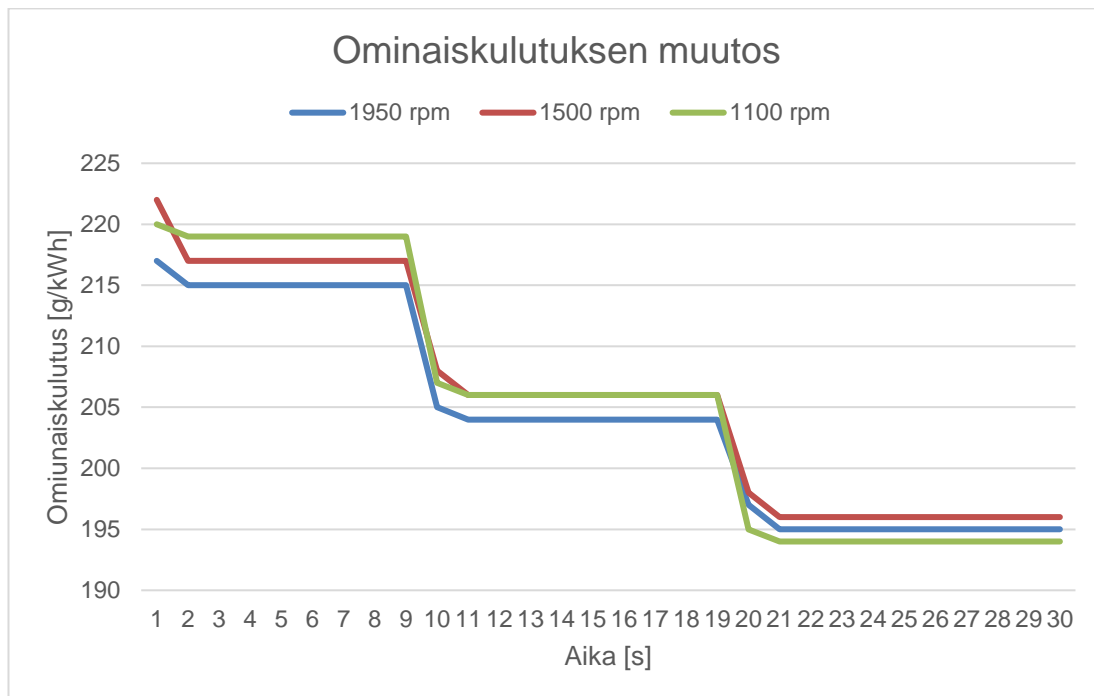
Kierrosnopeudella 1950 rpm ja täydellä kuormalla, akkuun lisätään 10 sekunnin aikana 92 kJ energiaa. Nollatilanteessa energiataso ei muutu. Kun akusta otetaan kymmenen sekunnin ajan 50 Nm vääntöä, se kuluttaa 114 kJ energiaa eli 22 kJ enemmän. Kyseisen energiamäärän lataaminen akkuun kestää noin 21 % kauemmin kuin kulutus. Muillakin simuloituilla nopeuksilla toimilaitteen käyttö kuluttaa samassa ajassa enemmän energiaa. Toimilaitteen akkua pitäisi ladata noin 20 - 25 % pidempään, jos sinne ladataan sama määrä energiaa kuin on kulutettu. Luvut ovat samat myös eri kuormitustasoilla, kun kierrosluku ja lisätyn väännön määrä ovat samat.



Kuvio 15. Akun varaustason muutos kierrosnopeudella 1950 rpm.

Akun varaustaso nousee 55 %:sta 55,71 %:iin ja laskee kulutuksen vuoksi 54,69 %:iin. Akun lataaminen on hitaampaa kuin energian kuluttaminen. Muilla nopeuksilla kuvaaja

on samanlainen, mutta muutokset varaustasossa ovat hieman alhaisemmat. Kun lisätyn väännön määrä kaksinkertaistetaan, akun varaustason muutokset korreloivat energiata-
sojen kanssa ja ovat noin kaksinkertaiset 50 Nm:in verrattuna.



Kuvio 16. Ominaiskulutuksen muutos.

Ominaiskulutusta simuloitiin kolmella nopeudella ja kolmella eri vääntömäärällä. Kulutus on korkein, kun akkua ladataan eli simulaatiossa moottorilta otetaan vääntöä. Keskellä on normaalitilanne. Kulutus on alhaisin, kun moottorille syötetään lisävääntöä. Jos akkuun ladataan sama määrä energiaa kuin sieltä on otettu, niin kulutus olisi korkeammalla tasolla noin 20 % kauemmin kuin se on matalalla. Kierrosnopeudella 1100 rpm kulutus on akun latausvaiheessa hieman suurempi, kuin muilla nopeuksilla ja lähes sama, kun moottorille syötetään lisävääntöä. Se ei ole taloudellisin vaihtoehto. Taulukko kuvastaa kuitenkin tilannetta, jossa hybridijärjestelmää ei ole optimoitu, vaan lataaminen vähentäisi selvästi toimilaitteen mahdollisia hyötyjä. Tähän pyritään vaikuttamaan niin kuljettajan ajotavalla kuin hybridijärjestelmää säätelemällä, jolloin kulutus ei latausvaiheessa nouse taulukon osoittamaa määrää. Näin on mahdollista saada polttoaineenkulutus kokonaisuudessa laskemaan. (Seulgi Lee, Jinguy Choi, 2015.)

Oheisissa taulukoissa on simulaatiosta saatuja tarkempia tuloksia toimilaitteen energiata-
sasoista. Kun lisävääntö nostetaan 100 Nm:in, akun energiamuutos ja MGU-yksikön tuot-
tama teho ovat likimain kaksinkertaiset kaikilla simuloiduilla nopeuksilla. Esimerkiksi

1500 rpm:n kohdalla akkuun lisätään 173 kJ energiaa ja otetaan 193 kJ energiaa. Kierrosnopeuden ollessa 1950 rpm, minuutin kestävä lataus tuo akkuun noin 550 kJ energiaa ja purku kuluttaa noin 670 kJ. MGU:n läpikulkeva teho on hieman pienempi akun lataus-
syklin aikana, koska energiamäärä 10 sekunnin aikana jäi purkusykliä pienemmäksi. Akusta ei kuitenkaan tarvitse ottaa aina samaa määrää energiaa, kuin sinne ladataan, vaan lukemat määräytyvät ajon ja olosuhteiden perusteella. Jarruttaminen voi kestää eri ajan, kuin kiihdyttäminen haluttuun nopeuteen.

Taulukko 3. Energiat kierrosnopeudella 1950 rpm.

Kierrosluku	rpm	1950			1950		
Kuorma	%	100			75		
Lisävääntö	Nm	50	0	-50	50	0	-50
Ominaiskulutus	g/kWh	189	204	220	183	201	219
Ero	%	7,63	0	7,55	9,38	0	8,57
Akun energiamuutos	kJ	113,50	0,00	91,89	113,50	0,00	91,89
Ero	%	21,04			21,04		
Akun varaustaso	%	54,69	55,00	55,71	54,69	55,00	55,71
MGU:n teho	kW	10,77	0	-9,68	10,77	0	-9,68
Ero	%	10,66			10,66		

Taulukko 4. Energiat kierrosnopeudella 1500 rpm.

Kierrosluku	rpm	1500			1500		
Kuorma	%	100			75		
Lisävääntö	Nm	50	0	-50	50	0	-50
Ominaiskulutus	g/kWh	191	206	222	180	195	210
Ero	%	7,56	0	7,48	8,00	0	7,41
Akun energiamuutos	kJ	87,86	0,00	69,50	87,86	0,00	69,50
Ero	%	23,35			23,35		
Akun varaustaso	%	54,69	55,00	55,55	54,78	55,00	55,55
MGU:n teho	kW	8,42	0	-7,32	8,42	0	-7,32
Ero	%	13,98			13,98		

Taulukko 5. Energiat kierrosnopeudella 1100 rpm.

Kierrosluku	rpm	1100			1100		
Kuorma	%	100			75		
Lisävääntö	Nm	50	0	-50	50	0	-50
Ominaiskulutus	g/kWh	194	207	219	187	205	221
Ero	%	6,48	0	5,63	9,18	0	7,51
Akun energiamuutos	kJ	64,55	0	50,19	64,55	0	50,19
Ero	%	25,03			25,03		
Akun varaustaso	%	54,84	55,00	55,40	54,84	55,00	55,40
MGU:n teho	kW	6,27	0	-5,29	6,27	0	-5,29
Ero	%	16,96			16,96		

Simulaatiossa toimilaitteen hyödyt jäivät lähelle nollaa, kun energiatarkastelu otetaan huomioon. Etenkin akun lataussyklin aiheuttama nousu polttoaineenkulutuksessa on todennäköisesti suurempi simulaatiossa kuin oikeasti. Simulaatiossa se käytännössä kumoaa purkussyklin tuottaman laskun polttoaineenkulutukseen. Lataussyklissä akkuun syötetty määrä energiaa jää toistuvasti alle purkussyklin sieltä ottaman määrän. Todellisuudessa akun lataaminen takaisin purkussykliä edeltävälle tasolle voi myös kestää hieman kauemmin, mutta erot ovat simulaation antamia tuloksia pienempiä.

Moottoria simuloitiin staattisissa mittauspisteissä, mikä voi olla syynä saatuihin tuloksiin. Valmistajat testaavat toimilaitetta ja moottoria paljon myös transient -ajossa, joka on ajosykli, jossa kierrosnopeus ja kuormitus kasvavat sekä laskevat useita kertoja testiajon aikana. Staattisissa mittauspisteissä moottorin kierrosnopeus ja kuormitus pysyvät valitulla tasolla. Simulaatiota voi ajaa transient -tilassa luomalla taulukon, johon on syötetty ajat ja kierrosnopeudet sekä asettamalla etukäteen simulaatioajolle tietyn ajan, kuten 1000 sekuntia. Tulokset eivät kuitenkaan ole käyttökelpoisia ilman mallin muokkaamista transient -ajoon sopivaksi. Se vaatisi suuriakin muutoksia, kuten mallin muokkaamista keskiarvomalliksi tai ohjelman neuroverkkojen hyödyntämistä. Nykyisen mallin rinnalle voi jatkossa rakentaa toisen mallin, joka on kalibroitu transient -ajoa varten.

Moottorin taloudellisuuteen vaikuttaa myös kuljettajan ajotyyli ja olosuhteet. Niitä pelkkä moottorin simulaatiomalli ei ota kunnolla huomioon, joten se ei täysin ennusta tositalanteen arvoja. Jos hybridijärjestelmää ei ole optimoitu ja ajo on aggressiivista, niin polttoaineenkulutus ei laske. Toimilaitteesta on eniten hyötyä, kun se käyttöä kohdennetaan tilanteisiin, jossa on kulutuspiikkejä, esimerkiksi ajoneuvo pysähtyy ja lähtee liikkelle usein. Hybridit soveltuvat huonommin tilanteisiin, jossa vaatimuksena on enemmän nopeutta tai tehoa. Äkillinen jarruttaminen, kiihdyttäminen ja aggressiivinen ajo johtaa suurempiin energiahäviöihin, akun varaustason nopeampaan laskuun ja nousevaan polttoaineenkulutukseen.

6 YHTEENVETO

Simulaatiomallin rakentamisessa keskityttiin moottorin ja toimilaitteen mallinnukseen. Siitä johtuen se ei kuvaa täysin kattavasti jarrutusenergian hyödyntämisen kokonaissykliä voimansiirrossa eikä erilaisia ajotapoja, koska se vaatisi kokonaisen ajoneuvomallin rakentamisen. Se olisi huomattavasti laajentanut ja monimutkaistanut työnkuvaa. Työn ulkopuolelle rajattiin sähköajoneuvot ja pistokehybridit. Simulaatio ennustaa moottorin tuloksia kokonaisuutena tarkemmin rajamomenttiajossa kuin osakuormituksessa. Pakokaasun lämpötiloissa oli eniten heittoa kokeelliseen dataa nähden ja myös eri simulaatioajojen välillä oli nähtävissä tulosten heittelyä. Muuten simulaatiomalli ennustaa tuloksia suhteellisen tarkasti. Simulaatiomallia verrattiin kuitenkin työn aikana vain yhteen moottoriin.

Jos suurempi toimilaite on kalliimpi ja selvästi painavampi, pienempään tyytyminen voi riittää. Suurempi paino muuttaa myös ajoneuvon painojakaumaa ja voi aiheuttaa sitä kautta lisäkustannuksia. Jarrutusenergiaa hyödyntävät toimilaitteet kykenevät suurempaan väännöntuottoon kuin sähköiset turboahtimet, joka on kuitenkin helpommin sovitettavissa moottorin yhteyteen ja voi tuottaa pienemmälle moottorille nähtävissä olevan laskun polttoaineenkulutukseen. Toimilaite mahdollistaa taloudellisemman ajon, joten sen käytöstä on hyötyä. Käyttötarkoituksella ja ajo-olosuhteilla on kuitenkin merkitystä esimerkiksi polttoaineenkulutuksen laskulle. Henkilöautot ja kuljetusajoneuvot voivat tällä hetkellä hyötyä työkoneita enemmän hybridiratkaisusta.

Valmistajat ilmoittavat nykyisten tuotteidensa voivan laskea polttoaineenkulutusta keskimäärin 5 % - 10 %, mutta kulutus voi laskea hieman vähemmän tai enemmän. Jos järjestelmää ei ole optimoitu ja ajo on aggressiivista, kulutus nousee ja toimilaitteen akku kuluu nopeammin verrattuna rauhalliseen ajoon. Ajotapojen vaikutukseen pyritään vaikuttamaan toimilaitetta säätelämällä, jolloin erilaisten ajotapojen vaikutuksia voidaan hillitä ja ajo on taloudellisempaa. Simulaation tulokset toimilaitteen vaikutuksesta polttoaineenkulutukseen jäivät lähelle nollaa, kun energiatarkastelu otetaan huomioon. Saatuihin tuloksiin voi vaikuttaa se, että moottoria simuloitiin staattisissa mittauspisteissä eikä transient -ajossa. Mallia voi jatkokehittää sopimaan transient -ajoon tai luoda kokonaan uusi malli sitä varten.

LÄHTEET

- BorgWarner 2019a. eTurbo for commercial vehicles. Viitattu 8.5.2019. https://www.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/product-sheet-eturbo-cv.pdf?sfvrsn=f665b33c_8
- BorgWarner 2019b. eBooster for commercial vehicles. Viitattu 9.5.2019. https://www.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/product-sheet-ebooster-cv.pdf?sfvrsn=f765b33c_12
- Bosch 2019. 48V battery. Viitattu 20.7.2019. <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/powertrain-systems/electric-drive/4>
- Dana Electronics 2019. Direct drive electric powertrain. Viitattu 10.7.2019. <https://www.danatm4.com/products/direct-drive-electric-powertrain/>
- Danfoss Editron 2019a. EM-PMI300-T310 data sheet. Viitattu 8.5.2019. <https://assets.danfoss.com/documents/DOC296734051602/DOC296734051602.pdf>
- Danfoss Editron 2019b. EC-C1200-450 -konvertteri. Viitattu 1.8.2019. <https://assets.danfoss.com/documents/DOC313331270440/DOC313331270440.pdf>
- Danfoss Editron 2018. Europe's first hybrid-powered heavy truck. Viitattu 8.5.2019. <https://www.danfoss.com/en/service-and-support/case-studies/dps/europe-s-first-hybrid-powered-heavy-truck/>
- DieselNet 2017. Turbocharger Fundamentals. Viitattu 10.8.2019. https://www.diesel-net.com/tech/air_turbocharger.php
- Gamma Technologies 2019. GT-Suite overview. Viitattu 15.5.2019. <https://www.gtisoft.com/gt-suite/gt-suite-overview/>
- Seulgi Lee, Jingyu Choi, Kiyun Jeong & Hyunsoo Kim 2015. A Study of Fuel Economy Improvement in Hybrid Electric Vehicle using Engine on/off and Battery Charging Power Control Based on Driver Characteristics. Viitattu 10.11.2019.
- Valeo 2019. Electric Supercharger. Viitattu 20.7.2019. <https://www.valeo.com/en/electric-supercharger/>
- Volkswagen 2013. Fuel consumption reduction potential of a mild hybrid system. Viitattu 26.9.2019. https://www.gtisoft.com/wp-content/uploads/publication/Fuel_consumption_reduction_mild_hybrid_flex_fuel-VW-Rudge.pdf
- X-Engineer 2019. Mild hybrid electric vehicle architectures. Viitattu 23.9.2019. <https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/hybrid/mild-hybrid-electric-vehicle-mhev-architectures/>