

Jussi Hyvärinen

Biofore-auton päästöjen hallinta

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikan insinööri

Opinnäytetyö

16.4.2015

Tekijä Otsikko	Jussi Hyvärinen Biofore-auton päästöjen hallinta
Sivumäärä Aika	55 sivua 16.4.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikan insinööri
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja	Lehtori Heikki Parviainen
<p>Tässä opinnäytetyössä käsitellään Biofore-auton päästöjen hallintaa. Biofore-auto on Ammattikorkeakoulu Metropoliaassa valmistettu konseptiauto, jonka valmistuksessa on käytetty puupohjaisia materiaaleja. Bioforessa on kolmisylinterinen Volkswagenin dieselmoottori, jota ohjataan jälkiasenteisella moottorinohjaimella, jolla voidaan ohjata hyvin laajasti moottorin eri käyttölaitteita. Työn alkaessa moottorille oli tehty karkea perussäätö. Pakokaasupäästöjen hallintaan ei ollut vielä juuri paneuduttu. Työn tavoite oli laskea Biofore-auton pakokaasupäästöt riittävän alhaisiksi, jotta auto voidaan katsastaa Suomen tieliikenteeseen. Lisäksi työssä suunniteltiin hiukkasloukun regenerointijärjestelmä.</p> <p>Työ aloitettiin perehtymällä kirjallisuuden avulla dieselpolttoaineen palamistapahtumaan sekä eri päästöjen syntymekanismeihin. Työtä jatkettiin tutkimalla käytännössä mittalaitteen avulla eri säätömahdollisuuksien vaikutusta typenoksidien synnyn määrään. Tämän jälkeen moottori säädettiin tuottamaan mahdollisimman vähän päästöjä ilman hyötysuhteen selkeää laskua.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitetta ei saavutettu, sillä työn aikana havaittiin, etteivät eri polttoainesuuttimien ruiskutusmäärät olleet riittävän lähellä toisiaan, jotta eri sylinterien palamistapahtumia olisi voitu hallita riittävän tarkasti. Opinnäytetyössä luotiin kuitenkin hyvät edellytykset jatkaa säätötyö loppuun.</p>	
Avainsanat	Biofore, Euro5, Metropolia, Regenerointi, EGR

Author Title	Jussi Hyvärinen Control of exhaust gas emissions of the Biofore Concept Car
Number of Pages Date	55 pages 16 april 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor	Heikki Parviainen, Senior Lecturer
<p>This Bachelor's thesis discusses the control of exhaust emissions of the Biofore concept car. The Biofore concept car was designed and manufactured at Helsinki Metropolia University of Applied Sciences. Wood-based materials were used in the Biofore concept car. The Biofore concept car has a three-cylinder diesel engine which is manufactured by Volkswagen. The engine control unit has been replaced to an aftermarket engine control unit which allows to adjust the different systems of the engine widely. At the beginning of this work the engine was already roughly tuned and only minimal effort was made to control emissions. The objective of this thesis work was to lower the exhaust emissions of this car so that the Biofore concept car can be road-legal. Also the regeneration system was designed during this work.</p> <p>The thesis work was started by studying literature on diesel fuel burning and the formation of different emissions. The work was continued by practical tests in which measuring device were used to study how different adjustments affect the formation of nitric oxides. After that the engine was tuned to produce a minimum amount of nitric oxides without considerable decrease of efficiency.</p> <p>The objective was not reached because the injection quantities of the different injectors were not close enough to each other. Hence, the burning of diesel fuel could not be controlled in different cylinders. However, functional facilities were created to continue this work.</p>	
Keywords	Biofore, Euro5, Metropolia, Regeneration, EGR

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	6
1.1	Opinnäytetyön tausta	6
1.2	Tavoitteet	6
1.3	Pakokaasujen takaisinkierrätys	6
1.4	Hiukkasloukun regenerointi	7
2	Valmistautuminen säätötyöhön	7
2.1	Pakokaasupäästöjen Euro 5 -mittaustestin eri vaiheet	7
2.2	Dieselpolttoaineen syttyminen ja palamistapahtuma	8
2.3	Eri päästöjen synty, hallinta ja vaikutukset	12
2.3.1	Hiilivedyt	12
2.3.2	Hiilimonoksidi	13
2.3.3	Hiukaspäästöt	13
2.3.4	Hiilidioksidi	13
2.3.5	Typenoksidit	13
2.3.6	Melupäästöt	16
2.4	Samanlaisen moottorin arvojen tutkiminen ajon aikana	17
2.5	Laskennallisen- ja mitatun ilmassan määrien näyttämien synkronointi	18
3	Moottorin säätäminen ja pakokaasun takaisinkierrätysjärjestelmän logiikan suunnittelu	20
3.1	Säätötyöasioita	20
3.1.1	Closed loop -säätöjärjestelmä	20
3.1.2	PID-säätimen toiminta ja komponentit	21
3.1.3	Feed forward -arvo	21
3.2	PID-säätimen käyttötapa tässä työssä	22
3.3	Pakokaasun takaisinkierrätyksen ohjauksen suunnittelu	23
3.4	EGR:n ja kaasuläpän käyttöönotto	27
3.5	Moottorin vaatimukset sen lämpötilan ollessa alle normaalin käyntilämpötilan	28
4	Typenoksidien muodostumiseen vaikuttavien tekijöiden tutkiminen käytännössä	30

4.1	Tutkimusten valmistelu	30
4.2	Mittauksissa käytetyt mittalaitteet	31
4.3	Ylijäämähapen merkitys typenoksidien syntyyn	32
4.4	Ylijäämähapen määrän vaikutus verrattuna lämpökapasiteetin muutoksen vaikutukseen typenoksidien synnyssä	33
4.5	Ahtoilman lämpötilan vaikutus typenoksidipäästöjen määrään	34
4.6	Kierrosluvun vaikutus typenoksidipäästöihin	34
4.7	Lambda-arvon ja kierrosluvun yhteisvaikutus typenoksidien synnyn määrään	35
5	Moottorin ajettavuussäätäminen	36
5.1	Suuttimien toiminta sekä ruiskutusmäärien mittaus	36
5.2	Kaasupolkimen vasteen säätö	40
6	Hiukkassuodattimen regenerointi	41
6.1	Hiukkasloukun vaatimukset regeneroinnille	42
6.2	Noen kertyminen ja poistuminen hiukkasloukusta	43
6.3	Vaatimukset regenerointilogiikalle	44
6.4	Regenerointilogiikan suunnittelu	46
6.5	Tarvittavat muutokset ohjainlaitteeseen	48
7	Yhteenveto	49
7.1	Tarvittavat muutokset jo tehtyyn työhön	49
7.2	Yhteenveto työntuloksista	50
	Lähteet	52

Lyhenteet ja määritelmät

Closed loop	Säätöjärjestelmä, jossa järjestelmän tuottaman arvon perusteella säädetään itse järjestelmää.
Diffuusiopalaminen	Haluttu dieselpolttoaineen palamistapa, jossa dieselpolttoaine palaa polttoaineen ja ilman rajakerroksessa.
Esisekoittumispalaminen	Dieselpolttoaineen palamistapa, jossa ruiskutuksen syttymisjättämä on suuri ja ison osan polttoaineesta syttyessä kerralla syntyy karkea ääni. Tätä palamistapaa voidaan verrata ottomoottorin nakuttavaan palamiseen.
Esiruiskutus	Ennen pääruiskutusta tapahtuva pieni ruiskutus, jonka tarkoitus on esilämmittää palotila, jotta pääruiskutus saadaan palamaan nopeasti ja hallitusti
EGR	Exhaust Gas Recirculation, pakokaasun takaisinkierrätys.
Euro 5a	1.9.2009 ja 1.9.2014 välillä rekisteröityjen autojen päästö määräysnormi.
Feed forward -arvo	Säätöjärjestelmän esiasetusarvo.
Jälkiruiskutus	Ruiskutustapa, jolla nostetaan pakokaasun lämpötila regeneroinnin ajaksi, jotta hiukkasloukku saadaan puhdistettua noesta.
Katalyytti	Aine joka ei itse osallistu kemialliseen reaktioon, mutta auttaa sitä tapahtumaan nopeammin tai matalammassa lämpötilassa.
Lambda-arvo	Arvo, joka kuvaa käytettävän seossuhteen suhdetta stokiometriseen seossuhteeseen. Lambda-arvo on 1 silloin, kun tavallista EN590-standardin täyttävää dieselpolttoainetta

grammaa kohti sylinteriin johdetaan noin 14,5 grammaa ilmaa. Jos ilmaa johdetaan sylinteriin tätä enemmän, on lambda-arvo tällöin enemmän kuin 1. Tämä tarkoittaa sitä, että moottori käy happilyijäämällä.

NEDC New European Driving Cycle. Pakokaasupäästöjen Euro 5 -päästöttestissä ajettava sykli, jossa mitataan auton tuottamat päästöt sekä polttoaineenkulutus. Testaus suoritetaan 20 °C:n lämpötilassa, ja sen pituus on noin 20 minuuttia.

Nopeakäyntinen dieselmoottori

Puristusytytteinen mäntämoottori, joka käy korkeammilla kierroksilla kuin 1000 rpm.

Reaktioentalpia Arvo, joka kertoo reaktion lämpötilavaikutuksen ympäristöönsä. Kun entalpia on positiivinen, sitoo se ympäristöstään lämpöenergiaa. Tällöin puhutaan endotermisestä reaktiosta. Eksotermisen reaktion vastakohta.

Sakkaus Ilmiö, jossa ilmavirtaus irtoaa jostakin pinnasta. Turboahtimessa sakkaus ilmenee kompressoripyörän siivissä, kun liian pienellä ilmamäärällä yritetään tuottaa liian korkea ahtopaine.

Tasapainoreaktio Kemiallinen reaktio joka ei etene loppuun saakka, vaan jää tasapainopisteeseen, jossa lopputuotteet palaavat lähtötuotteiksi yhtä nopeasti, kuin lähtötuotteet muuttuvat lopputuotteiksi.

Volymetrinenhyötysuhde Arvo, joka määrittää sylinterin täytösasteen. Esimerkiksi jos sylinterin tilavuus on 400 mm^3 ja moottorin volymetrinen hyötysuhde on 0,5, saadaan sylinteriin tällöin imettyä 200 mm^3 kaasuja yhden työkierronaikana.

Ykk Yläkuolokohta. Ylin kohta, jossa mäntä käy puristus- ja pakotahtien aikana.

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön tausta

Tämä opinnäytetyö on yksi osa Biofore-autoprojektia. Biofore-auto on Ammattikorkeakoulu Metropolian ja UPM:n yhteistyössä valmistama kaupunkiauto, jonka valmistuksessa on käytetty puupohjaisia materiaaleja.

Biofore-auto halutaan katsastaa Suomen tieliikenteeseen. Jotta se olisi mahdollista, on sen alitettava pakokaasupäästöjen Euro 5 -päästörajat, jotka kaikkien Suomen tieliikenteeseen rekisteröitävien autojen tulee alittaa. Näissä päästörajoissa rajoitetaan hiukkaspäästöt, typenoksidipäästöt, hiilivetyypäästöt sekä hiilimonoksidipäästöt. Ennen varsinaista päästöt testiä autolla ajetaan 3000 km, jotta pakokaasupäästöjen jälkikäsittelylaitteiden toiminta voidaan varmentaa.

1.2 Tavoitteet

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on saada Biofore- auton pakokaasupäästöt riittävän alhaisiksi, jotta se voi läpäistä sille asetetut rajat. Tämän lisäksi pakokaasun jälkikäsittelylaitteiden ylläpito suunnitellaan niin, että ne voivat toimia riittävän pitkän aikaa.

1.3 Pakokaasujen takaisinkierrätys

Typenoksidipäästöt ovat hankalimmin hallittavia päästöjä hiukkassuodattimella varustetuissa dieselmootoreissa. Tämän takia niihin perehdytään tässä työssä syvällisimmin. Pakokaasun takaisinkierrätys on erittäin tehokas tapa laskea typenoksidipäästöjä. Työssä suunniteltiin takaisinkierrätyksen ohjaus sekä saatettiin se toimintaan. Tämän jälkeen mitattiin eri vaikutuskeinojen tehokkuutta käytännön mittauksilla typenoksidipäästöjen vähentämiseksi. Lopuksi moottori säädettiin tuottamaan mahdollisimman vähän typenoksidipäästöjä, niin että moottorin hyötysuhde ei laskenut selkeästi.

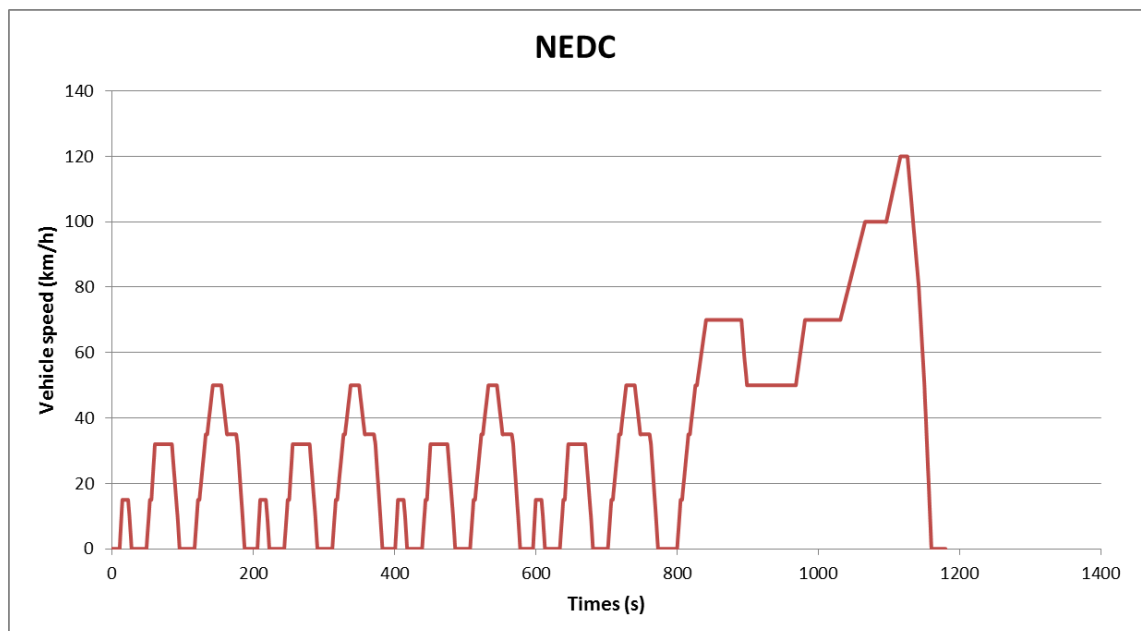
1.4 Hiukkasloukun regenerointi

Hiukkasloukku vähentää dieselmoottorin hiukkaspäästöjä erittäin tehokkaasti. Loukku kerää hiukkaset ja noen itseensä suodattimen tavoin. Aika ajoin hiukkasloukku on regeneroitava eli puhdistettava, jotta se ei tukkeutuisi. Työn loppuvaiheessa perehdyttiin hiukkasloukun ja hapetuskatalysaattorin toimintaan sekä suunniteltiin hiukkasloukun regenerointijärjestelmä.

2 Valmistautuminen säätötyöhön

2.1 Pakokaasupäästöjen Euro 5 -mittaustestin eri vaiheet

Pakokaasupäästöjen Euro 5 -mittaustesti koostuu kahdesta eri testistä. Ensimmäinen testi on tyyppi 5 -testi, jossa autolla ajetaan 3000 kilometriä vaihtelevilla nopeuksilla. Tämän syklin tarkoitus on mitata pakokaasun jälkikäsittelylaitteiden kestävyys. Toinen testi on tyyppi 1 -testi, jossa autolla ajetaan kylmäkäynnistyksen jälkeen (NEW European Driving Cycle) NEDC -sykli, jossa mitataan auton tuottamat pakokaasupäästöt ja polttoaineen kulutus. (1).



Kuva 1. NEDC-sykli. (www.car-engineering.com).

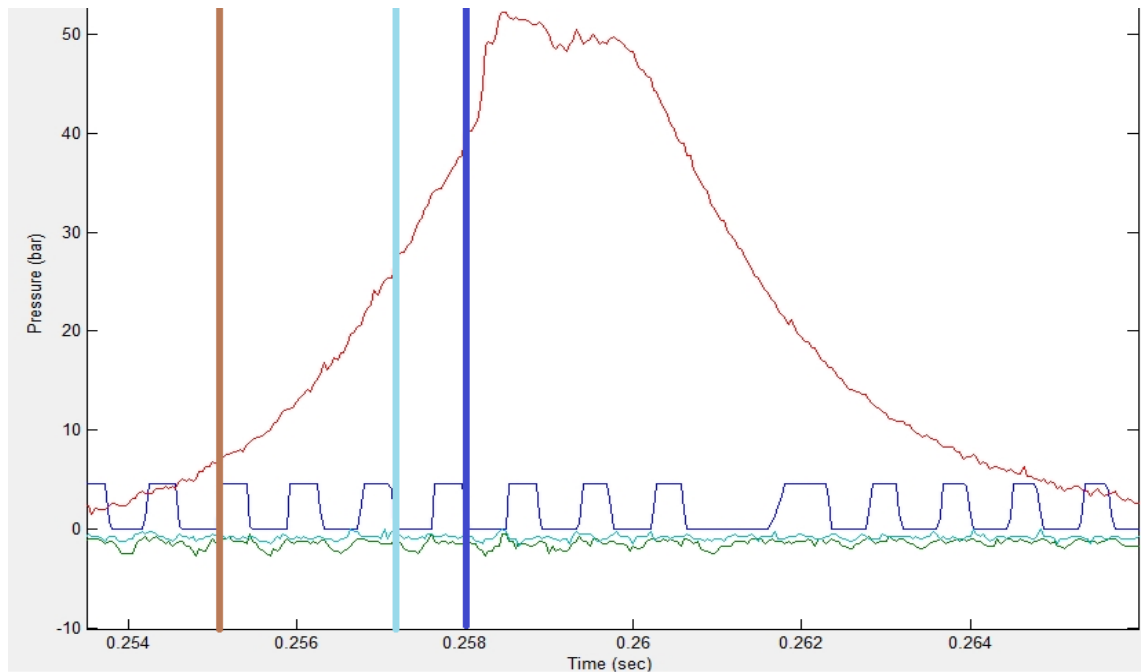
Päästörajat eivät huomioi auton massaa ajoneuvoluokan sisällä. Tämä tarkoittaa sitä, että kevyiden autojen on merkittävästi helpompia alittaa rajat, sillä niiden kiihdyttämiseen tarvitaan vähemmän energiaa, joka tuotetaan polttamalla polttoainetta.

Stage	Date	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM	PN
		g/km					#/km
Compression Ignition (Diesel)							
Euro 1†	1992.07	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	0.14 (0.18)	-
Euro 2, IDI	1996.01	1.0	-	0.7	-	0.08	-
Euro 2, DI	1996.01*	1.0	-	0.9	-	0.10	-
Euro 3	2000.01	0.64	-	0.56	0.50	0.05	-
Euro 4	2005.01	0.50	-	0.30	0.25	0.025	-
Euro 5a	2009.09 ^b	0.50	-	0.23	0.18	0.005 ^f	-
Euro 5b	2011.09 ^c	0.50	-	0.23	0.18	0.005 ^f	6.0×10 ¹¹
Euro 6	2014.09	0.50	-	0.17	0.08	0.005 ^f	6.0×10 ¹¹

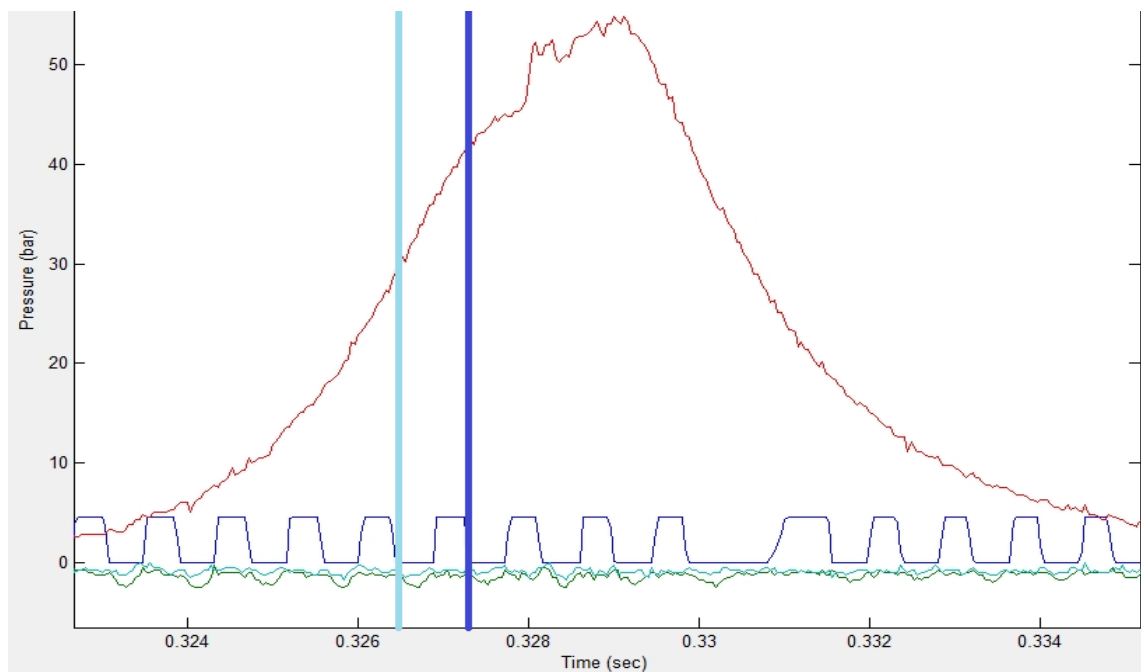
Kuva 2. Kunkin päästönormin raja-arvot jokaiselle eri päästölle puristussytteisillä moottoreilla varustetuille henkilöautoille. (www.dieselnet.com)

2.2 Dieselpolttoaineen syttyminen ja palamistapahtuma

Syttyäkseen dieselpolttoaine vaatii riittävän suuren lämpötilan sekä riittävästi happea. Mitä enemmän happea syttymis- ja palamistapahtumilla on käytettävissä, sitä nopeammin ja matalammissa lämpötiloissa ne voivat tapahtua. Tämä johtuu siitä, että tarvittava syttymisenergia laskee hapen tiheyden noustessa (2, s.148). Lisäksi keskimääräinen syttymisviive lyhenee, jos happea on käytettävissä paljon. Tämä johtuu siitä, että polttoaineen ei tarvitse kulkea palotilassa yhtä pitkää matkaa, jotta se voisi reagoida hapen kanssa. Lämpötilalla on kuitenkin käytännössä suurin yksittäinen vaikutus syttymisviiveeseen, sillä ennen kuin dieselpolttoaine voi palaa, sen on höyrystyttävä. Lämpötilan vaikutus voidaan nähdä säätämisen aikana mitatuista sylinteripainekuvaajista. Molemmissa kuvaajissa (kuvat 3 ja 4) pääruiskutuksen ruiskutusennakko on sama. Ensimmäisessä kuvaajassa on käytetty esiruikutusta, jonka ansiosta sylinterin paineen huippuarvo saavutetaan huomattavasti nopeammin, sillä syttymisviive on korkeamman palotilan lämpötilan ansiosta huomattavasti pienempi.



Kuva 3. Sylinteripainekuuvaja. Moottorin tuottama vääntömomenti on 42 Nm ja kierrosluku 2000 rpm. Ruskea viiva kuvaa esiruisutuksen alkamisajankohtaa, vaalean sininen viivaa kuvaa pääruisutuksen alkamisajankohtaa, ja sininen viiva kuvaa yläkuolokohtaa. Kuvassa 4 ruiskutusmäärä on ollut selkeästi suurempi, sillä moottorin tuottama tehollinen keskipaine ja vääntömomenti ovat suurempia, vaikka sylinterin painehuippu esiintyykin huomattavasti yläkuolokohdan jälkeen.



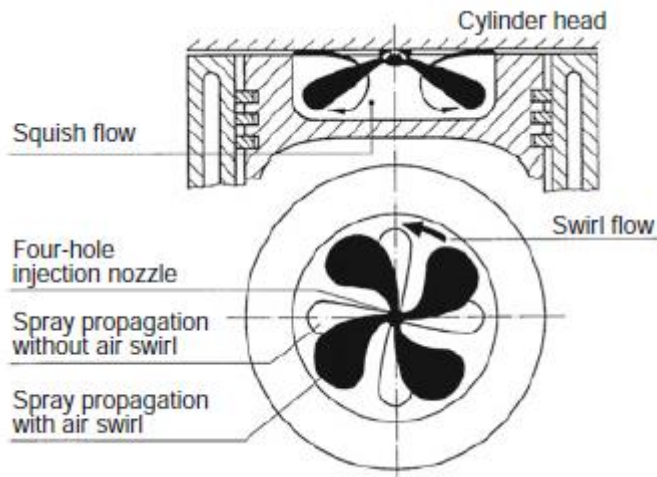
Kuva 4. Sylinteripainekuuvaja. Moottorin vääntömomenti 52 Nm ja kierrosluku 2000 rpm. Esiruisutusta ei käytetty. Vaalean sininen viiva kuvaa ruiskutuksen alkamisajankohtaa ja sininen viiva kuvaa yläkuolokohtaa.

Kuvassa 4 voidaan myös nähdä selkeä viite tapahtuvasta esisekoittumispalamisesta ajanhetkellä 0,328 sekuntia, sillä paineen nousu on tuolla kohdalla äkillistä ja jyrkkää.

Yksi puristussytytteisen moottorin suurimmista ongelmista on palamiskelpoisen seoksen muodostaminen. Ongelma syntyy siitä, että seoksen muodostamiseen on käytettävissä hyvin vähän aikaa, sillä pääruiskutus ruiskutetaan sylinteriin vasta hieman ennen yläkuolokohtaa. Jotta polttoaine saataisiin palamaan edes lähes täydellisesti, täytyy dieselmoottorin toimia happiylijäämällä. Lisäksi vaaditaan polttoaineen ja ilman huolellinen sekoittuminen. Sekoittumista pyritään parantamaan kolmella tavalla, jotka ovat ilman pyörteily palotilassa, palotilanmuotoilu sekä polttoaineen ruiskuttaminen sylinteriin useista pienistä rei'istä korkealla paineella.

Tämän moottorin palotilassa pyörteily on pääsääntöisesti swirl- tai squish-pyörteilyä. Swirl-pyörteily aiheutetaan toisen imukanavan muotoilulla. Imukanava on suunnattu niin, että ilman tullessa sylinteriin se alkaa pyöriä kehää. Toinen imukanava taas on muotoiltu niin, että sylinterin täytös saataisiin mahdollisimman suureksi. Swirl-pyörre sekoittaa tehokkaasti ilmaa ja polttoainetta, mutta sen varjopuoli on moottorin pumppaushäviöiden kasvu niin imu- kuin pakotahdinkin aikana. Jotta pyörteily saadaan riittäväksi matalilla kierroksilla ja pienillä imusarjanpaineilla, täytyy imukanavan swirl-pyörrettä aiheuttavat ominaisuudet valita niin, että swirl-pyörre saataisiin mahdollisimman voimakkaaksi. Toisaalta näin toimiessa suurilla kierrosluvuilla ja imusarjanpaineilla muodostuisi aivan liian suuri painehäviö imukanavistoon. Bioforen moottorissa ongelma on ratkaistu siten, että siihen imukanavaan, joka mahdollistaa suuren täytösateen, on sijoitettu niin sanotut pyörreläpät. Tarvittaessa vain pientä tehoa moottorista, läpät suljetaan, jolloin kaikki ilma tulee sylinteriin pyörrettä voimistavan kanavan kautta. Suurilla rasiuksilla nämä läpät avataan, jotta sylinterin volymetrinen hyötysuhde saadaan hyväksi.

Squish-pyörre muodostuu männän noustessa yläkuolokohtaan. Ilma puristetaan paljerraosta männänlaessa olevaan kuppiin. Tullessaan kuppiin ilma joutuu myös pystysuuntaiseen pyörteilyyn. Squish-pyörteen huono puoli on sen mäntää jarruttava vaikutus, männän joutuessa puristamaan kaasut pois kapeasta alueesta päästäkseen yläkuolokohtaansa kuten kuvassa 5. Lisäksi ilman puristaminen keskelle mäntää kasvattaa swirl-pyörteen pyörimisnopeutta, sillä swirl-pyörteellä on oma pyörimismääränsä, joka pyrkii säilymään vakiona. Koska ilma pakotetaan pyörimään pienemmällä kehällä, sen on pyörittävä suuremmalla kehänopeudella jotta pyörimismäärä säilyisi vakiona.



Kuva 5. Erilaiset pyörteet palotilassa. Sylinterin poikkileikkauksessa nuolilla kuvataan squish-pyörrettä ja ylhäältäpäin kuvatussa sylinterissä nuolella kuvataan swirl-pyörrettä. (6, s. 64.)

Palotilan muodolla on myös erittäin suuri vaikutus palotapahtuman onnistumisen kannalta. Sen lisäksi, että mäntään tehty kuppi lisää pyörteilyä, sillä on myös kolme muuta hyvää syytä olla olemassa. Poltettaessa polttoaine kupissa se ei palaessaan luovuta lämpöä niin suurelle palotilan pinta-alalle kuin se luovuttaisi, jos se poltettaisiin vanhemman mallisessa palotilassa. Lisäksi polttoaine saadaan syttymään helpommin, kun se ruiskutetaan männän sisälle, sillä männän laen lämpötila on suurempi kuin sylinterinseinämän lämpötila. Tämän lisäksi polttoaineen ei tarvitse syttymisensä aikana kulkea läheskään yhtä pitkää matkaa, kuin sen tarvitsisi vanhemman mallisessa palotilassa. Tällöin vaadittava ruiskutusaine voi olla pienempi.

Suuttimilla ja ruiskutusaineella on myös suuri vaikutus seoksen muodostumiseen. Mitä enemmän suuttimessa on reikiä, sitä paremmin polttoaine sekoittuu ilmaan jo ennen pyörteilyn vaikutusta, sillä polttoaine saadaan leviämään useampaan suuntaan palotilan sisällä.

Ruiskutusaineen valintaan vaikuttavat moottorin kierrosluku, ruiskutettavan polttoaineen määrä sekä sylinterin täytösaste. Kierrosluku määrittää ruiskutukseen käytettävissä olevan ajan. Mitä suurempi on moottorin kierrosluku, sitä vähemmän on aikaa käytettävissä ruiskutukseen, sillä polttoaine tulisi saada ruiskutettua männän päässä olevaan kuppiin. Suuttimen avauskulma on noin 20 astetta, joten suuttimen kärjen tulee olla lähestulkoon kupin sisällä, jotta polttoaine saadaan kuppiin. Mitä enemmän polttoainetta on ruiskutettava tietyssä ajassa sitä suurempi on myös ruiskutusaineen oltava. Ruiskutusaineen kohotus auttaa myös levittämään ruiskutusviuhkan leveämmälle alueelle.

Tämä johtuu siitä, että ruiskutuspaineen kasvaessa myös kavitointi suuttimien rei'issä kasvaa (6, s. 65). Kavitointi tarkoittaa sitä, että nesteen paineen laskiessa se alkaa kiehua. Paineen lasku aiheutuu suuresta virtausnopeudesta.

Mitä suurempi on sylinterin täytösaste, sitä suurempi on ruiskutuspaineen oltava. Tämä johtuu siitä, että kaasun tiheys palotilassa kasvaa täytösasteen parantuessa. Kaasun tiheyden kasvaessa sen tuottama väliaineen vastus kasvaa. Jotta polttoaine tällöinkin saadaan leviämään kunnolla, täytyy ruiskutuspainetta kasvattaa täytösasteen kasvaessa.

2.3 Eri päästöjen synty, hallinta ja vaikutukset

2.3.1 Hiilivedyt

Pakokaasussa olevat hiilivedyt ovat palamatonta polttoainetta. Hiilivety päästöjä syntyy sellaisissa palotilan osissa, joihin päätyy polttoainetta, mutta joissa ei ole riittävän suurta lämpötilaa, polttoaineen syttymiselle (3, s. 449). Tällaisia paikkoja ovat esimerkiksi sylinterin seinämät. Dieselmoottorissa hiilivety päästöjä syntyy pääsääntöisesti ainoastaan moottorin ollessa alle normaalin käyntilämpötilan. Pieniä määriä hiilivety päästöjä syntyy myös suuttimien rei'issä, koska sinne jää hieman polttoainetta ruiskutuksen päätyttyä. Tämä polttoaine höyrystyy osittain vasta työtahdin aikana, jolloin se ei välttämättä syty enää sylinterin lämpötilan jo laskettua.

Hiilivety päästöt saadaan poistettua katalysaattorin avulla lähes täydellisesti. Hiilivety päästöjen hallinta on ongelmallista ainoastaan silloin, kun hapetus katalysaattori ei ole vielä lämmennyt toimintalämpötilaansa.

Hiilivety päästöjä voidaan vähentää vähentämällä sylinterin pyörteilyä (3, s. 63). Tämä tapahtuu pitämällä imukanavistossa olevat pyörreläpät joko kokonaan auki tai vain hieman suljettuina. Hiilivety päästöjen väheneminen pyörteilyä vähentämällä perustuu siihen, että tällöin sylinterin lämpöhäviöt saadaan vähenemään, koska rajakerrokset palavien polttoaineryppäiden ja palotilojen pintojen välillä kasvavat. Lisäksi palaminen saadaan tapahtumaan pienemmillä alueilla, kun ilman ja polttoaineen sekoittumista vähennetään. Pyörteilystä saadaan heikompaa myös kuristamalla imuilman virtausta kaasuläpällä. Ruiskutuspaineen laskeminen vähentää myös polttoaineen ja ilman sekoittumista vaikuttaen tällöin samalla tavalla, kuin pyörteilyn vähentäminen. Käynnistyshetkellä hiilivetyjen muodostumista voidaan vähentää myös hehkutulppien avulla.

2.3.2 Hiilimonoksidi

Hiilimonoksidia eli häkää syntyy sellaisissa osissa palotilaa, joissa ei ole riittävää määrää happea dieselpolttoaineen kunnolliselle palamiselle ja lämpötila on matalahko (3, s. 449). Puristussytytteisessä moottorissa hiilimonoksidin syntyminen on hiilivetyjen tapaan ongelma vain moottorin ollessa alle normaalin käyntilämpötilan. Häkäpäästöjen hallinta tapahtuu samalla tavalla kuin hiilivetyjenkin hallinta.

2.3.3 Hiukkaspäästöt

Hiukkaspäästöt syntyvät sellaisissa osissa palotilaa, joissa ei ole riittävästi happea kaiken polttoaineen palamiselle, mutta lämpötila on kuitenkin korkea. Lambda-arvo tällaisissa paikoissa on yleensä nollan ja puolen välillä. Täysin tarkkaa määritelmää hiukkaspäästöille ei ole. Niihin kuitenkin lasketaan kiinteitä ja nestemäisiä yhdisteitä sekä niiden sekoituksia. Yksi tapa hiukkasen synnylle on se, että palamaton polttoaine kerää itseensä muita sylinteristä löytyviä partikkeleita. (4, s. 147).

Hiukkaspäästöjä saadaan vähennettyä erittäin tehokkaasti hiukkasloukun avulla. Hiukkasloukku on ikään kuin virtauspinta-alaltaan suuri suodatin, joka kerää pakokaasusta tehokkaasti kiinteät aineet. Hiukkasten syntyyn voidaan vaikuttaa myös moottorin sisäisillä toimilla. Tällaisia ovat suuren happilyijäämän käyttö sekä suurien ruiskutuspainoiden käyttö. Pienentämällä moottorin kierroslukua voidaan myös vähentää hiukkasten syntyä, sillä kierrosluvun pienentyessä palamistapahtumalle jää enemmän aikaa, sillä tällöin palotilan lämpötila laskee hitaammin työtahdin aikana.

2.3.4 Hiilidioksidi

Hiilidioksidia syntyy aina palamisprosessin lopputuotteena. Mikäli kaikki polttoaine saadaan poltettua, on hiilidioksidin määrä suorassa suhteessa polttoaineen kulutukseen.

2.3.5 Typenoksidit

Typenoksidipäästöt koostuvat lähes kokonaan typpimonoksidi- ja typpidioksidipäästöistä. Typenoksidit muodostuvat pääosin sellaisissa osissa palotilaa, joissa lambda-arvo on välillä 1,1–1,4. Tällaisilla alueilla toteutuvat ne ehdot, että typenmonoksidgeja voi

syntyä. Ehdot ovat riittävän suuri lämpötila ja hapen läsnäolo. Typenmonoksidit muodostuvat kemiallisten reaktioiden kautta, joita kutsutaan Zeldovichin reaktioiksi. Zeldovichin reaktiot ovat tasapainoreaktioita. Kaikki typpimonoksidi muuttuu ajan saatossa typpidioksidiksi viimeistään ilmakehässä. (3, s. 445).

Jotta typenmonoksideja voi alkaa muodostua, täytyy ensin olla yksittäisiä happiatomeja ja typpi-atomeja. Normaalisti happi ja typpi esiintyvät kaksiatomisina kaasuina, mutta noin 2000 °C:n lämpötilassa ne molemmat ovat hajonneet yksiatomisiksi kaasuiksi (3, s. 445). Paikallisesti riittävä lämpötila typenoksidien muodostumiseen saavutetaan useassa kohdassa palotilaa. Koska typenoksidit muodostuvat tasapainoreaktioiden kautta, voidaan niiden syntymiseen vaikuttaa monin eri tavoin. Tasapainoreaktion suuntaan ja nopeuteen vaikuttavat lähtöaineiden määrä, lopputuotteiden määrä sekä lämpötila. Mitä enemmän lähtöaineita eli ja happi- ja typpi-atomeja on, sitä nopeammin typenoksideja muodostuu. Vastaavasti mitä enemmän typenoksideja on jo muodostunut, sitä hitaammin niitä syntyy lisää. Mitä suurempi lämpötila on, sitä kiivaammin typenoksideja muodostuu, sillä typenoksideja muodostava reaktion on endoterminen, eli ympäristöstään lämpöä sitova reaktio. Typenmonoksidien syntymisen määrään vaikuttaa myös aika, sillä Zeldovichin reaktiot tapahtuvat melko hitaasti verrattuna esimerkiksi dieselpolttoaineen reaktionopeuteen. Typenoksidien muodostumista tapahtuu palotilassa niin pitkään, kuin lämpötila on paikallisesti riittävän suuri.

EGR:n käyttö vähentää typenoksidien muodostumista usealla eri tavalla. Pakokaasun takaisinkierätyks laskee palamisen huippulämpötiloja. Tämä tapahtuu kahdella eri tavalla. Pakokaasu on suureksi osaksi vesihöyryä, hiilidioksidia ja typpeä. Vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti on merkittävästi suurempi kuin ilman, joten se pystyy varaamaan itseensä merkittävästi enemmän lämpöä, jolloin maksimilämpötilat jäävät matalimmiksi. Toinen maksimilämpötiloja laskeva tekijä on se, että palotilan happipitoisuus laskee. Tällöin osan ruiskutetusta polttoaineesta on kuljettava pidempi matka, jotta se voisi reagoida hapen kanssa. Tällöin palamistapa siirtyy enemmän diffuusiopalamisen puolelle. Kun polttoaine palaa suuremmalla alueella, niin paikalliset lämpötilat eivät pääse nousemaan yhtä korkeiksi. Varjopuoli EGR:n käytössä on kuitenkin se, että palamistapahtuma kestää pidempään, jolloin moottorin hyötysuhde laskee. Ongelmaa voidaan lievittää aikaisemmalla ruiskutusennakolla ja suuremmalla ruiskutuspainella. Ruiskutuspaineen nosto toisaalta lisää polttoaineen korkeapainepumpun kampiakselilta ottamaa vääntömomenttia, laskien näin moottorin hyötysuhdetta. Ruiskutusennakon kasvatus taas lisää

paineennousua puristustahdin lopussa, jolloin palava kaasu ehtii tehdä enemmän negatiivista työtä.

Kun palotilaan tuodaan pakokaasua, niin samalla tuodaan typenoksideja. Tällöin tasapainoreaktio ei ole niin kiivas tuottamaan lisää typenoksideja, sillä lopputuotteita on jo valmiiksi sylinterissä. Lisäksi pakokaasu vie tilaa typenoksidien lähtöaineilta.

Huippulämpötiloja voidaan laskea myös muilla tavoilla. Yksi keino on myöhäistää ruiskutusta. Tällöin koko palotilan lämpötila ehtii laskea koska, palotilassa oleva kaasu on jo ehtinyt tehdä työtä mäntään. Ruiskutusennakoiden myöhäistämällä on myös varjopuolensa. Kun ruiskutusennakkoa myöhäistetään siitä hetkestä, jossa se on optimaalinen tehon tuoton ja hyötysuhteen kannalta, laskee moottorin hyötysuhde. Toinen varjopuoli myöhäistetyssä ruiskutusennakossa on sen palotilaa ja pakokaasua lämmittävä vaikutus. Kun palava kaasu ei ehdi tehdä työtä niin pitkään, kuin se tekisi jos ruiskutusennakko olisi aikaisempi, jää se kuumemmaksi. Tämä lämpö poistuu moottorista isoksi osaksi pakokaasun mukana, mutta poistuessaan sylinteristä se myös lämmittää sylinterin seinämiä, männän lakea, palotilaa, pakoventtiiliä, pakokanavan seinämiä sekä tietysti pakosarjaa että turboahdinta. Palotilan, männän laen ja sylinterin seinämien lämpeneminen lisää palotilassa olevaa lämpöä, joten se omalta osaltaan lisää typenoksidien muodostumista. Tärkeää on kuitenkin huomata se, että tämä lämpö on nimenomaan palotilan pinnoilla, jolloin se ei ole suorassa kosketuksessa palotapahtumaan. Osa lämmöstä, joka on säteilyt ja johtunut edellä mainittuihin osiin edellisten työ- ja pakotahtien aikana ehtii myös siirtyä jäähdytysnesteeseen. Toisaalta osa tästä lämmöstä on myös siirtynyt imutahdin aikana imettyihin kaasuihin nostaen näin koko palotapahtuman lämpötilaa.

Imuilman lämpötilalla on merkitystä typenoksidien muodostumiseen. Kun imuilman lämpötilaa lasketaan, niin myös palamislämpötilat laskevat, sillä viileämpi ilma pystyy sitomaan itseensä enemmän lämpöä kuin lämpimämpi ilma. Sama pätee myös takaisin kierrätettyyn pakokaasuun. Myös sitä tulee jäähdyttää, jotta se pystyy laskemaan palotilan lämpötilaa mahdollisimman paljon.

Käytetty kierrosluku vaikuttaa typenoksidien syntymisen määrään kahdella tavalla. Mitä suurempi on moottorin kierrosluku, sitä nopeammin lämpötilat palotilan eri osissa laskevat. Toisaalta kun kierrosluku kasvaa, niin tapahtumia, joissa typenoksideja voi syntyä ilmenee useammin aikayksikköä kohti. Kun käytetään suurempaa kierroslukua, niin saman tehon tuottamiseksi tarvitaan pienempi vääntömomentti. Tämä tarkoittaa sitä, että

yksittäisen työtahdin ruiskutusmäärä pienenee, jolloin typenoksidien muodostumiseen tarvittava lämpötila ilmenee pienemmällä alueella palotilaa ja lyhemmän aikaa. Lisäksi yksittäisen työtahdin ruiskutusmäärän pienentyessä voidaan pakokaasun takaisinkierräystä lisätä, sillä polttoaineen määrän vähentyessä ei myöskään happea tarvita yhtä paljoa.

Myös moottorin mekaanisilla ominaisuuksilla voidaan vaikuttaa typenoksidien muodostumiseen. Tällaisia mekaanisia ominaisuuksia ovat muun muassa puristussuhde sekä kampikoneiston geometria, mutta koska niihin ei tässä työssä tehdä muutoksia, niin niitä ei myöskään sen enempää käsitellä.

2.3.6 Melupäästöt

Puristussytytteinen moottori voi tuottaa ääntä viidellä eri tavalla, jotka ovat palamisäänet, imuäänet, pakoäänet, mekaanisista äänilähteistä syntyvät äänet sekä turboahtimen tuottamat äänet.

Palamisäänet syntyvät esisekoittumispalamisen seurauksena. Kun esisekoittunut diesel syttyy useassa paikassa palotilaa, aiheutuu niistä paineaalloja. Nämä paineaallot törmäävät toisiinsa ja palotilan pintoihin. Näin syntyy puristussytytteiselle moottorille ominainen karkea käyntiääni. Palamisääniä voidaan vähentää vähentämällä esisekoittumispalamista. Tämä tapahtuu helpoiten esiruiskutuksen avulla. Pienellä määrällä polttoainetta esilämmitetään palotila, jolloin ruiskutettava polttoaine saadaan palamaan diffuusioliekillä.

Turboahdetussa dieselmoottorissa imuäänten vaimentamiseen ei tarvitse nähdä yhtä suurta vaivaa, kuin ahtamattoman dieselmoottorin kanssa. Turboahtimen kompressori sekä ilmanpuhdistin koteloineen yhdessä ahtoilman putkien kanssa vaimentavat imuäänet niin alhaisiksi, ettei niistä ole haittaa. Myöskään pakoäänet eivät ole ongelma, sillä turboahdin vaimentaa itsessään pakoääniä reilusti. Lisäksi katalysaattori ja hiukkasloukku vaimentavat pakoääniä. Tällöin pakoputkeen ei välttämättä tarvitse sijoittaa kuin yksi äänenvaimennin. Moottorin ollessa mekaanisesti kunnossa, mekaanisia ääniä ei käytännössä kuulu.

Turboahdin voi pitää ääntä kahdella tavalla. Ahdin pitää normaalisti toimiessaan korkeaa ja tasaista ääntä. Johtuen sen korkeasta taajuudesta, se absorboituu nopeasti väliaineeseen, joten myöskään siitä ei tarvitse välittää moottoria säätäessä. Ahtimen toimiessa oikein, ilmanvirtaus pysyy kiinni sen kompressorisiivessä. Mikäli näin ei ole, pitää kompressorisiipi sakkaava ääntä. Kompressorisiiven sakkaus ei ole toivottua, joten myöskään sen tuottamasta äänestä ei tarvitse huolehtia melupäästöjen kannalta.

2.4 Samanlaisen moottorin arvojen tutkiminen ajon aikana

Ennen säätötyön aloittamista haluttiin tutkia samanlaisen moottorin arvoja ajon aikana, jotta saatiin tietoa siitä, millaisiin arvoihin säätäessä pyrittäisiin ja mitkä olisivat säätötarkkuuden vaatimukset. Kyseinen moottori oli Volkswagen Polossa. Ajon aikana moottori oli koko ajan normaalissa käyntilämpötilassaan. Autolla ajettiin vaihtelevissa olosuhteissa.

Ruiskutuspainet vaihtelivat välillä 230–1740 bar. Tyhjäkäynnillä ruiskutuspainet olivat hyvin pienet. Kierrosluvun tai moottorin rasituksen kasvaessa ruiskutuspainet kasvoivat. Maksimiruiskutuspainet saavutettiin vasta kaasupolkimen ollessa pohjassa ja kierrosluvun ollessa yli 2000 rpm. Tästä voidaan päätellä ainakin Volkswagenin tapauksessa, ettei suuria ruiskutuspainetä käytetä sen takia, että typenoksidi tai hiukkaspäästöt alenisivat. Tämä pääteltiin siitä, että suuria painetä ei käytetty sellaisilla moottorin kierros- tai rasitusalueilla, joilla moottori toimii pakokaasupäästöjen Euro 5 -päästötestissä. Suuret ruiskutuspainet mahdollistavat kylläkin sen, että polttoaine voidaan suihkuttaa riittävän lyhyessä ajassa myös suurella kuormituksella, vaikka suuttimen reiät ovat pienet. Pienet suuttimen reiät taas mahdollistavat polttoaineen suihkuttamisen hienojakoisempaan, jolloin polttoaine saadaan sekoittumaan ilman kanssa hyvin. Imusarjan maksimi paine ajonaikana oli 2,44 bar.

Lambda-arvo vaihteli välillä 0,95–10. Lähdeittäessä paikoiltaan, moottorinohjaus salli lambda-arvon laskea 0,95:een. Suurella polttoaineen ruiskutusmäärällä on haluttu paikata moottorin tyhjäkäynnin läheisten kierroslukujen huonosta volymetrisestä hyötysuhteesta johtuvaa heikkoa vääntömomenttia. Maantieajossa lambda-arvo pysytteli 1,4:n ja 2:n välillä.

Volkswagenissa riittävä pakokaasun takaisinvirtaus tuotettiin kuristamalla imuilman virtausta kaasuläpällä. Kun autolla ajettiin maantiellä normaalien liikennevirran mukana, niin kaasuläpän tehollinen avautuma vaihteli välillä 30–50 %. Pienillä moottorin rasisuhteilla kaasuläppää avattiin vain n. 30 %. Myöskään EGR-venttiiliä ei avattu paljoa. Maksimissaan venttiili oli auki vain 40 % koeajon aikana. Kierrosluvun noustessa yli 3000:n ei kaasuläppä sulkeutunut missään vaiheessa. Myös EGR-venttiili pidettiin täysin suljettuna. Tämä johtunee siitä, että päästötesteissä ei tarvita kolmen tuhannen ylittäviä kierroslukuja, joten niillä kierrosluvuilla syntyvillä päästöillä ei ole auton rekisteröinnin kannalta merkitystä.

Kevyillä rasisuhteilla ruiskutus tehtiin kahdessa, jotakuinkin yhtä suuressa osassa. Ensimmäinen ruiskutus suoritettiin 10–20 astetta ennen ykk:ta ja toinen ruiskutus välillä kaksi astetta ennen ykk:ta ja kolme astetta ykk:n jälkeen. Kun rasisuhteita kasvatettiin, niin jälkimmäisen ruiskutuksen osuus kokonaisruiskutuksesta kasvoi ja ensimmäisen ruiskutuksen osuus pieneni. Tällöin syntyi siis selkeästi esi- ja pääruiskutukset. Ruiskutusten ajoitukset siirtyivät myös huomattavasti aikaisemmiksi.

Myös pakokaasun lämpötilaa seurattiin, koska se on merkittävä asia hiukkasloukun regeneroinnin kannalta. Maantiellä pakokaasujen lämpötilat vaihtelivat 250 celsiusasteen ja 300 celsiusasteen välillä. Kun autolla kiihdytettiin ripeästi paikoiltaan lähtien nopeuteen 120 km/h, saatiin pakokaasun lämpötila nousemaan hetkeksi 600 celsiusasteeseen.

2.5 Laskennallisen- ja mitatun ilmassan määrien näyttämien synkronointi

Jotta takaisinkierätetyn pakokaasun määrä voidaan tietää, täytyy moottorin imemää ilmassaa mitata. Lisäksi tarvitaan myös laskennallinen arvo siitä, kuinka paljon moottori on imenyt kaasuja sisälleen. Näiden kahden arvon erotus vastaa takaisinkierätetyn pakokaasun määrää.

Aluksi ilmassamittarin näyttämässä oli ongelma, sillä sen arvo muuttui liian hitaasti moottorin kierrosluvun tai ahtopaineen muuttuessa. Käytetty ilmassamittari kertoo sen läpivirran ilman massan taajuus arvona. Ilman massavirran kasvaessa kasvaa myös mittarin antaman signaalin taajuus. Taajuuden muutosta mitattiin oskilloskoopilla, jolloin havaittiin, että taajuus muuttui mittaustarkkuudet huomioon ottaen välittömästi

moottorin kierrosluvun muututtua. Tällöin voitiin päätellä, että ongelma oli siinä, miten moottorinohjainlaite luki ilmamassamittarin arvoa.

Ilmamassan virtausnopeus ei pysy täysin vakaana edes silloin kun moottorin kierrosluku ja ahtopaine pysyvät vakiona. Tämä johtuu muun muassa siitä, että mäntämoottorit imevät ilmaa pulssimaisesti johtuen niiden rakenteesta. Lisäksi ilmavirta pyöntelee jonkin verran mittarin anturin ympärillä aiheuttaen näin virhettä näyttämään. Koska ilman virtaus mittarin anturin ympärillä ei siis ole tasaista, on ilmamassamittarin näyttämää keskiarvostettava. Moottorinohjainlaite ei siis käytä täysin reaaliaikaista ilmamassan virtausnopeutta vaan keskiarvoa tietyltä aikaväliltä. Tätä aikaväliä lyhentämällä saatiin ilmamassamittarin näyttämän hitautta vähennettyä riittävästi. Aikavälin lyhentäminen aiheutti luonnollisesti ilmamassamittarin näyttämän muuttumisen epävakammaksi, mutta vaihtelu on vain muutaman prosentin luokkaa kokonais ilmamäärästä.

Moottorinohjain laskee moottorin imemän ilmamäärän kierrosluvun, imusarjan paineen sekä volymetrinen hyötysuhteen perusteella. Volymetrinen hyötysuhde vaihtelee kierrosluvun ja ahtopaineen mukaan. Tämän takia sille on oma taulukkonsa, jossa x-akselilla on moottorin kierrosnopeus ja y-akselilla imusarjan paine. Taulukkoon syötettiin sellaiset arvot, että laskennallinen ja mitattu ilmamäärä pysyivät keskenään samoissa arvoissa, vaikka moottorin pyörintänopeus ja imusarjanpaine muuttuivat.

On kuitenkin huomattava, että moottorin volymetrinen hyötysuhde muuttuu, kun pakokaasujen takaisinkierrätys otetaan käyttöön, sillä pakosarjan paine laskee avattaessa EGR-venttiiliä. Toisaalta se taas kasvaa, kun johdesiipiä joudutaan kääntämään kiinni päin, jotta haluttu ahtopaine saadaan pidettyä yllä. Lisäksi moottorin imuilmajärjestelmän painehäviöt laskevat, sillä osa imuilmasta korvataan pakokaasulla. Nämä asiat on kompensoitava säätötoita tehtäessä.

3 Moottorin säätäminen ja pakokaasun takaisinkierätyjärjestelmän loogiikan suunnittelu

3.1 Säätötyöasioita

Moottoria säätäessä tulee pyrkiä välttämään suuria harppauksia säätöarvoissa. Tällöin ehkäistään ylilyöntejä sekä parannetaan asioiden hallittavuutta. Kaikkia suuria harppauksia ei kuitenkaan pystytä välttämään. Esimerkiksi kuljettaja saattaa ajon aikana kiihdyttää kaasua pohjassa ja heti tämän jälkeen nostaa kaasupolkimen ja painaa kytkimen pohjaan. Tällöin moottorin kierrosluku ja ilman pumppauskyky putoavat nopeasti. Jos ahtimen johdesiivet eivät reagoi tilanteeseen hyvin nopeasti, niin ahtimen pyörimisnopeus saattaa jäädä liian korkeaksi. Tällöin ahdin sakkaa hetken aikaa. Jotta johdesiivet saadaan reagoimaan riittävän nopeasti, täytyy säätöjärjestelmästä tehdä hyvin aggressiivinen. Toisaalta johdesiipien vaatiessa aggressiivisemmän säätöjärjestelmän säädön seuraa siitä helposti se, että esimerkiksi kaasua hieman nostaessa johdinsiivet aukeavat liikaa. Tällöin ahtopaine menetetään, vaikka sitä edelleen tarvittaisiin. Jotta ahtimen pyörimisnopeus saadaan pysymään haluttuna nopeasti muuttuvissa tilanteissa, täytyy säätöjärjestelmän säätö tehdä erittäin tarkasti.

Tärkeintä säätötyössä on se, että perusasiat ovat tehty kunnolla. Moottorin imemä ilmämäärä ja suuttimien ruiskuttama polttoainemäärä pitää olla tarkasti säädetty ja tiedossa. Nämä asiat määrittävät loppujen lopuksi kaikkien moottorin toimilaitteiden toiminnan ohjauksen. Mikäli moottorin saamat ilma- ja polttoainemäärät eivät ole oikeat, vastaa se samaa tilannetta, kuin talo olisi rakennettu väärän muotoisen kivijalan päälle.

Auton moottorin säätämisestä tekee työlästä se, että moottoria käytetään hyvin laajoilla kierroslukualueilla. Tarvittava vääntömomentti voi myös olla mitä tahansa nollan ja maksimi vääntömomentin väliltä. Kaikkien toimilaitteiden tulee pystyä seuraamaan muuttuvaa tilannetta niin, että ne toimivat myös yhdessä.

3.1.1 Closed loop -säätöjärjestelmä

Moottorinohjauksen perussäätöjärjestelmänä käytetään closed loop -järjestelmää. Se koostuu viidestä eri tekijästä, jotka ovat feed forward -arvo eli esiasetusarvo, toimija, järjestelmän tuottama arvo, haluttu arvo sekä PID -säädin. Esimerkiksi kohdassa 3.2 esiteltävässä järjestelmässä feed forward -arvo on arviolta oikean suuruinen arvo EGR

-venttiilin asennolle. Toimija (actuator) on itse EGR-venttiili yhdessä säätömoottorinsa kanssa. Järjestelmän tuottama arvo on potentiometrin antama jännitearvo. Haluttu toimijan asentotaulukko määrittää halutun arvon.

3.1.2 PID-säätimen toiminta ja komponentit

PID -säädin koostuu kolmesta termistä, jotka ovat proportionaalitermi, integraalitermi ja derivaattatermi. Proportionaalitermi saa arvonsa virheen suuruudesta. Proportionaalitermin heikkous on se, että se ei välttämättä pysty korjaamaan virhettä silloin, kun virhe on pieni. Jos proportionaalitermin arvo säädetään suuremmaksi, jotta se palauttaisi järjestelmän haluttuun arvoon, niin se aiheuttaa helposti ylilyönnin. Integraalitermi saa arvonsa virheen suuruuden lisäksi virheen kestosta. Jos virhe ei ala pienentymään, niin integraalitermin arvo alkaa kasvaa, kunnes virhe alkaa pienentyä. Myös integraalitermi aiheuttaa helposti ylisuuren korjauskertoimen. Jos korjauskerron aiheuttaa ylisuuren korjauskertoimen, niin järjestelmä voi alkaa oskilloimaan eri puolilla tavoitearvoa. Jotta integraalitermin arvo ei pääse kasvamaan liian suureksi, on sille aina asetettava maksiarvo. Derivaattatermi saa arvonsa virheen muutosnopeudesta. Tässä työssä käytetty moottorinohjainlaite mahdollistaa erisuuruisten termien korjausarvon käytön kunkin säätötermin tekijän suuruudesta riippuen. Esimerkiksi proportionaalitermille voidaan antaa eri virheen suuruuksille eri muutosarvo.

3.1.3 Feed forward -arvo

Feed forward -arvo eli esiasetusarvo tulisi saada asetettua mahdollisimman lähelle haluttua lopullista arvoa, jotta järjestelmä pystyisi reagoimaan nopeasti ilman suuria ylilyöntejä. Esiasetusarvoa tarvitaan silloin, kun jokin sen arvon määrittävä asia muuttuu. Esimerkiksi jos esiasetusarvo määräytyy kierrosluvun ja ruiskutusmäärän perusteella, ei esiasetusarvoa tarvittaisi, mikäli kierrosluku ja ruiskutusmäärä pysyisivät vakioina. Aina kun toinen muuttuu, niin säätäminen aloitetaan uudelleen esiasetusarvosta.

3.2 PID-säätimen käyttötapa tässä työssä

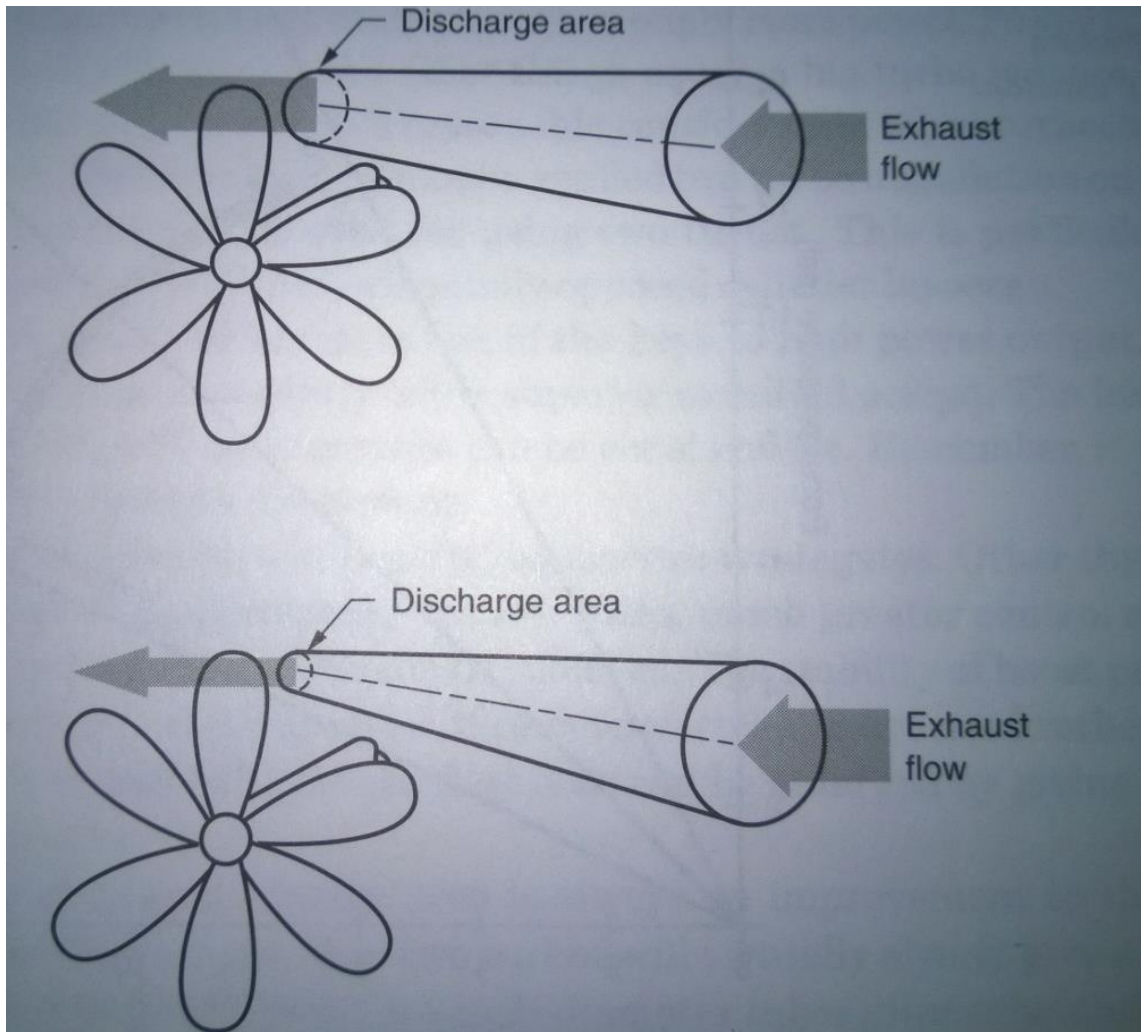
PID-säädintä säädettäessä on usein kaksi tavoitetta. Ensimmäinen tavoite on se, että järjestelmä saavuttaa halutun arvon mahdollisimman nopeasti. Toinen tavoite on välttää säätimen ylilyönti. Nämä kaksi tavoitetta ovat ristiriitaisia, sillä mitä nopeammin järjestelmä pyrkii korjaamaan virhettä, sitä helpommin se syyllistyy ylilyöntiin. Toinen säätötavoite on siis aina valittava pääsääötavoitteeksi. Mikäli säätimen aiheuttamat ylilyönnit voivat rikkoa jonkin osan järjestelmästä, niin pääsääötavoitteeksi on valittava ylilyönnin välttäminen. Säädettäessä PID -säätimen arvoja tulee aina ajatella säätimen termien yhteisvaikutusta. Mikäli esimerkiksi P- ja I-termeille annetaan suuret säätöarvot, jotka esiintyvät samaan aikaan, niin järjestelmä alkaa suurella todennäköisyydellä oskilloimaan.

Jotta säädin reagoisi nopeasti, täytyi PID-säätimien säätö tehdä pääsääntöisesti seuraavalla tavalla. PID-säädin säädettiin niin, että P-termi kasvaa progressiivisesti virheen kasvaessa, jolloin säädin pystyy säätämään järjestelmän nopeasti lähelle toivuttua tilanetta. P-termin arvot tulee pitää riittävän maltillisina, etenkin sellaisissa järjestelmissä, joissa on suuria massojen hitauksia, jotta järjestelmän P-termi ei aiheuta yliampumista. I-termi säädettiin kasvamaan lineaarisesti hyvin pienellä kulmakertoimella. Tällöin vältetään tilanne, jossa sekä P-termi että I-termi saavat samaan aikaan suuren arvon. Silti säätöjärjestelmä pystyy säätämään järjestelmän lähelle haluttua tilaan hyvin nopeasti. Kun järjestelmä on lähellä haluttua tilaa, niin P-termin arvot ovat jo mitättömiä. Tällöin pyrkiminen kohti tavoitetilaa on yksin I-termin tehtävänä. I-termillä on kuitenkin usein mielen tapana aiheuttaa järjestelmän tuottaman arvon oskilloiminen. Tämä voi johtua esimerkiksi siitä, että säädettävän mekaanisen järjestelmän lepokitkat ovat suurempia, kuin liikekitkat. Myös käämin induktanssi voi aiheuttaa samankaltaisen ongelman. Tällöin järjestelmän oskilloiminen tapahtuu niin, että järjestelmän arvo pysähtyy aina hetkeksi amplitudinsa maksi- ja minimiarvoihin. Esimerkiksi säädettäessä PI-säätimellä askelmoottoria, voisi askelmoottorin kitkan muuttuminen lepokitkasta liikekitkaksi aiheuttaa edellä kuvatun laisen oskilloinnin. Eli I-termi kasvaa niin pitkään, että se voittaa lepokitkan, jolloin järjestelmän arvo alkaa muuttua. Lepokitkan muuttuessa liikekitkaksi järjestelmän säätyminen alkaa tapahtua nopeammin sitä vastustavan voiman pienentyessä. Jotta näin ei kävisi, käytettiin myös D-termiä. Pääsääntöisesti D-termille annettiin melko tasaiset arvot kautta säätöalueen, jolloin se toimii järjestelmässä vaimentajana. Kun I-termi aiheuttaa edellä kuvatun oskilloinnin, niin D-termi huomaa virheen muutosnopeuden kasvun, jolloin D-termi alkaa hidastamaan muutosta. Tällä tavoin se rauhoittaa järjestelmän oskilloinnin, jotta järjestelmä jää tavoite arvoonsa.

3.3 Pakokaasun takaisinkierrätyksen ohjauksen suunnittelu

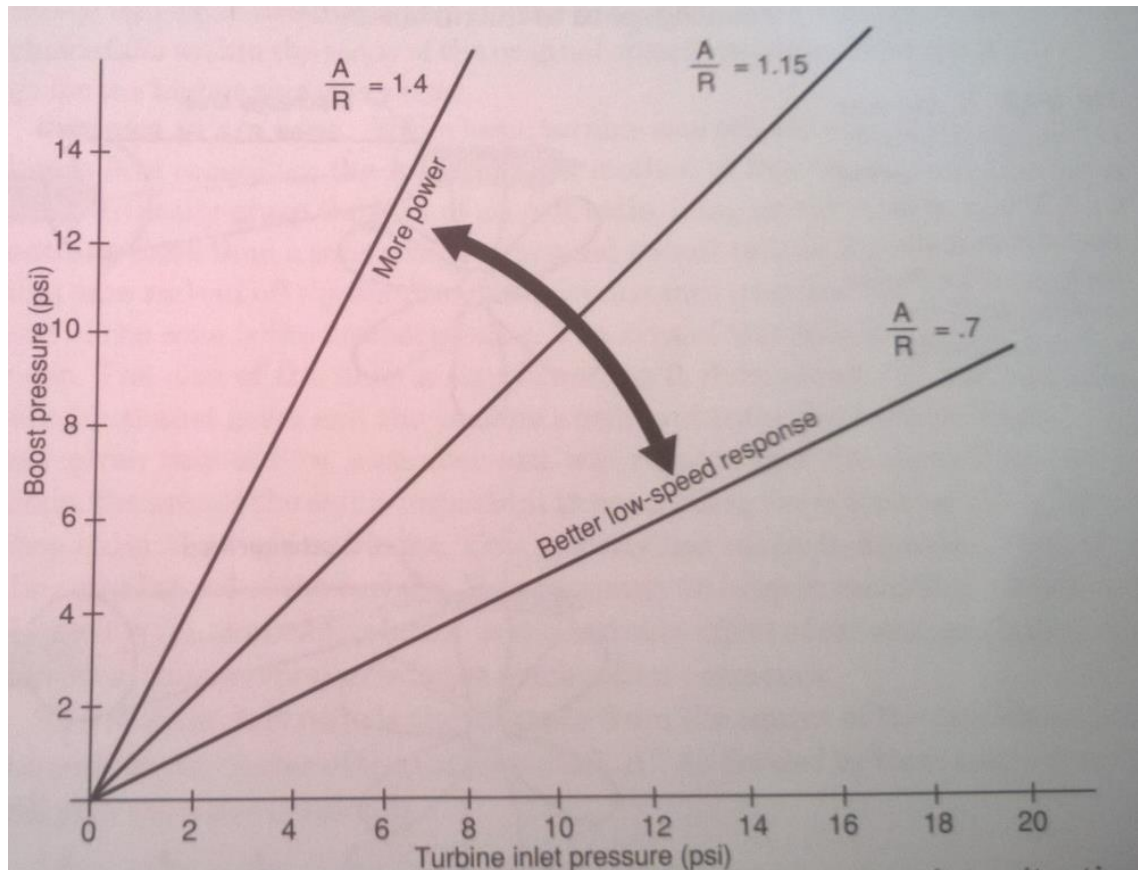
Kun pakokaasua aletaan takaisinkierrättämään, niin samalla sylinteriin päätyvän hapen määrä vähenee, koska pakokaasu korvaa osan sylinteriin muuten päätyvästä ilmasta. Sylinteriin päätyy happea myös pakokaasun mukana, mutta mitä enemmän pakokaasua takaisin kierrätetään sitä vähemmän se sisältää happea prosentuaalisesti. Typenoksidipäästöjen vähentämisen kannalta pakokaasua tulisi johtaa mahdollisimman paljon sylintereihin. Toisaalta happea on oltava riittävästi, jotta polttoaine saadaan poltettua.

Takaisinkierrätetyn pakokaasun määrään voidaan vaikuttaa kolmella eri tavalla. Ensimmäinen tapa on muuttaa EGR-venttiilin asentoa. Kun venttiiliä avataan enemmän, pienenee sen virtausta vastustava vaikutus, jolloin pakokaasua pääsee virtaamaan enemmän. Toinen tapa vaikuttaa takaisinkierrätetyn pakokaasun määrään on pienentää imu-sarjan painetta. Tämä tapahtuu kuristamalla imuilman virtausta kaasuläpän avulla. Myös ahtimen johdesiipien asennolla on vaikutus imu- ja pakosarjojen väliseen paine-eroon. Ahtimen johdesiipien asennon muutos vaikuttaa ahtimen turbiinipesän A/R-suhteeseen. A tarkoittaa sitä pinta-alaa, jolla pakokaasu pääsee virtaamaan tietyssä kohtaa turbiinikotelo ja R saman pinta-alan keskipisteestä ahtimen akselin keskipisteeseen piirrettyä viivaa. Käännettäessä johdesiipiä kiinni päin A/R-suhde pienenee, pakokaasun virtauspinta-alan pienentyessä. (5, s. 32.) Tämä tarkoittaa sitä, että pakokaasu pakotetaan kulkemaan pienemmistä rei'istä, ennen kuin se törmää turbiinisiipeen. Pakokaasun kulkiessa pienemmistä rei'istä, sen nopeus kasvaa, jolloin se pystyy tuottamaan suuremman impulssin turbiinipyörän siipeen. Tällöin pakokaasusta voidaan ottaa suurempi energia kompressorisiiven pyörittämiseen.



Kuva 6. Havainnollistava kuva eri A/R-suhteiden vaikutuksesta pakokaasun virtaukseen. Ylemmässä kuvassa A/R-suhde on suurempi, sillä pakokaasun virtauspinta-ala on suurempi. (5, s. 33.)

A/R -suhteen muutos vaikuttaa myös siihen, mihin kohtaan pakokaasu osuu turbiinisiipeä. Suljettaessa siipiä pakokaasu osuu kauemmas turbiinisiiven keskiosasta, jolloin sen momenttivarasi kasvaa. Myös tällä on vaikutus ahtimen kykyyn tuottaa ahtopainetta. Ahtimen niin sanottu hyötysuhde laskee A/R-suhteen pienentyessä. A/R-suhteen pienentäminen kasvattaa ahtopainetta, mutta se kasvattaa vielä enemmän turbiinin aiheuttamaa vastapainetta. Kun A/R-suhde on riittävän iso, niin imusarjan paine kasvaa suuremmaksi kuin pakosarjan paine.



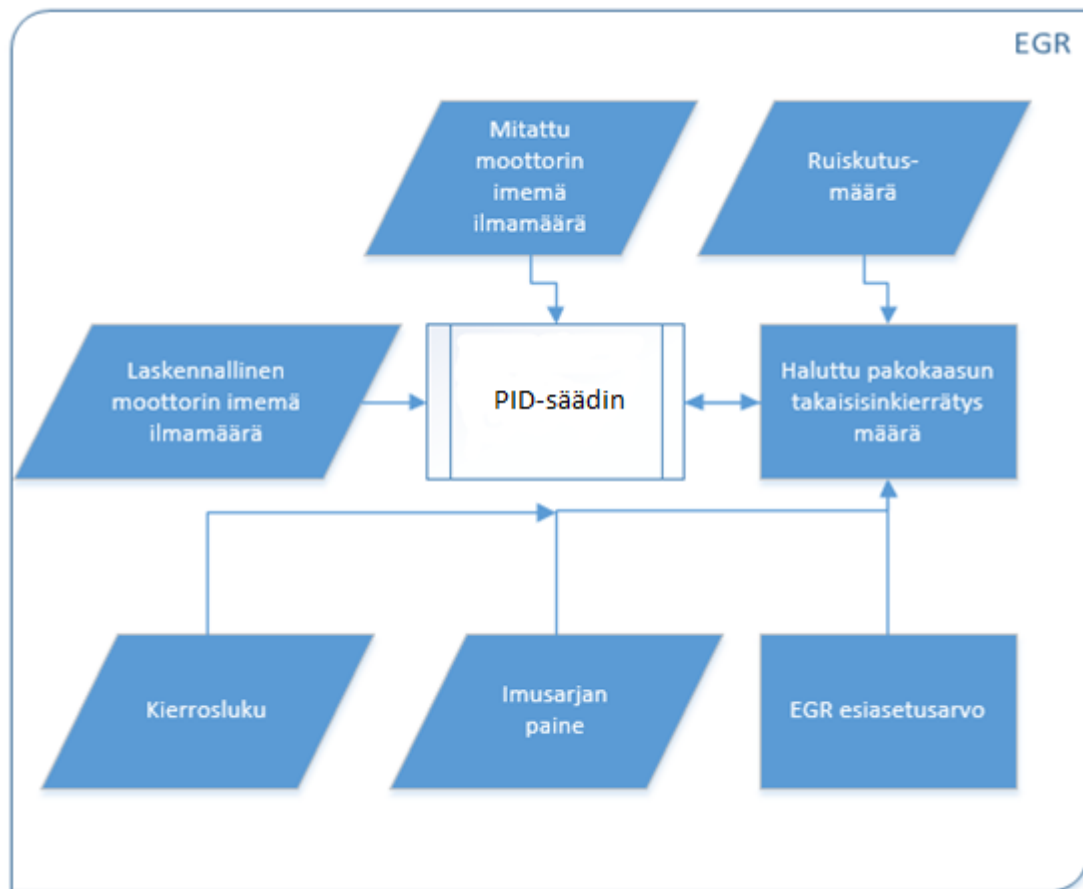
Kuva 7. A/R-suhteen vaikutus imu- ja pakosarjojen väliseen paine-eroon (5, s. 34).

Ohjainlaitteen valmistajalla ei ollut valmista pakokaasujen takaisienkierrätyksen logiikkaa, joten se täytyi suunnitella. EGR-venttiilin asentoa haluttiin pystyä säätämään moottorin kierrosluvun, ruiskutusmäärän ja ahtopaineen mukaan. Ruiskutusmäärä on tärkein yksittäinen tekijä määrittämään tarvittavaa hapen määrää sylinterissä. Mitä suurempi ruiskutusmäärä on sitä vähemmän pakokaasua voidaan kierrättää takaisin.

Mitä suurempi on moottorin kierrosluku sitä, enemmän pakokaasua täytyy kierrättää takaisin, sillä moottorin imemä kaasumäärä kasvaa moottorin kierrosluvun kasvaessa. Myös moottorin volymetrinen hyötysuhde muuttuu kierrosluvun muuttuessa.

Ahtopaine vaikuttaa myös sylintereihin päätyvään ilmamäärään. Mitä suurempi ahtopaine on, sitä suurempi on moottorin volymetrinen hyötysuhde. Volymetrisen hyötysuhteen parantuessa voidaan pakokaasua kierrättää enemmän takaisin. Ahtopainetta kasvatetaan kääntämällä ahtimen johdesiipiä kiinni, jolloin myös turboahtimen tuottama vastapaine kasvaa. Myös tämä lisää takaisin kierrätetyn pakokaasun määrää. Toisaalta pakokaasun takaisin kierrättäminen pakosarjasta imusarjaan aiheuttaa sen, että ahtimen

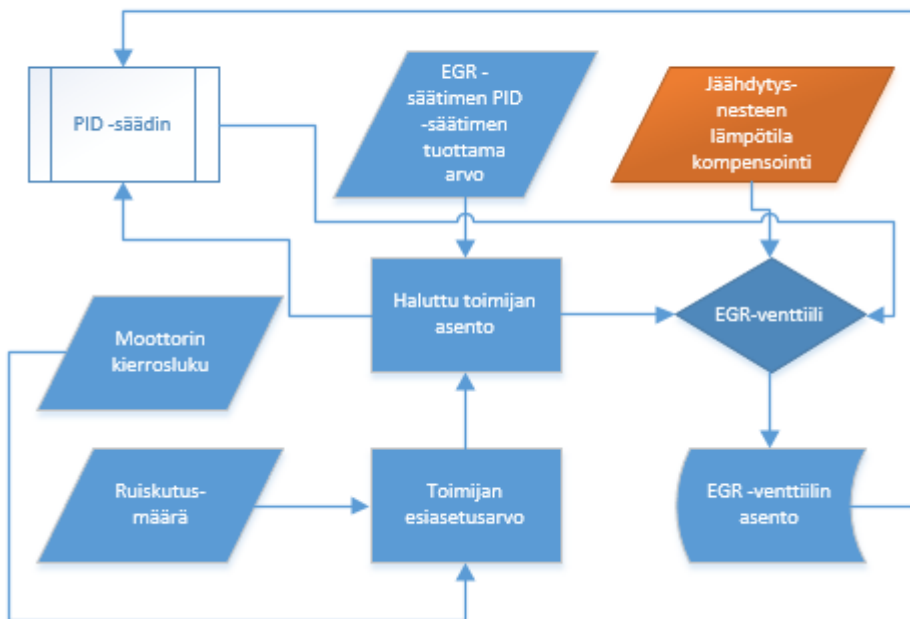
turbiiniin päätyvän pakokaasun määrä laskee. Tällöin johdesiipiä on suljettava lisää, jotta ahtopaine saadaan pidettyä riittävän korkeana.



Kuva 8. Ensimmäinen osa pakokaasun takaisinkierrätyksen säätöjärjestelmästä. Tämä järjestelmä pyytää EGR-säätöventtiilin säätöjärjestelmää joko avaamaan tai sulkemaan venttiiliä.

Koska pakokaasun takaisinkierrätysjärjestelmän vaatimukset muuttuvat jatkuvasti ajotilanteen mukana, jouduttiin järjestelmästä tekemään melko monimutkainen, jotta takaisinkierrätetyn pakokaasun määrä saataisiin pysymään haluttuna muuttuvissa tilanteissa. Ensimmäinen säätöjärjestelmä on esimiesjärjestelmä (kuva 8). Sen tehtävä on päättää sopiva pakokaasun takaisinkierrätyksen määrä kussakin ajotilanteessa ja pyytää tätä EGR-säätöventtiilin ohjausjärjestelmältä, joka on alaisjärjestelmä. Esimiesjärjestelmän PID-säädin vertaa haluttua taulukkoon asetettua pakokaasun takaisinkierrätysmäärää ja toteutunutta arvoa, jonka se tietää vertaamalla moottorin imemää laskennallista ja mitattua ilmamassaa. Kun PID-säädin huomaa eron näissä, se antaa tilanteeseen sopivan pyynnön alaisjärjestelmälle (kuva 9).

EGR-säätöventtiilin ohjausjärjestelmä



Kuva 9. Toinen osa pakokaasun takaisinkierätyksen säätöjärjestelmästä. Tämä osa on itse säätöventtiilin säätöjärjestelmä. Suorakulmaiset siniset nelikulmiot ovat säätötaulukkoita. Muut siniset nelikulmiot ovat säätöarvoja lukuun ottamatta EGR-venttiiliä. Jäähdytysnesteen lämpötila kompensointi on säätöhierarkiassa ylimmäisenä, sillä muuten järjestelmä säätäisi itsensä niihin arvoihin, jotka on sijoitettu ”Haluttu toimijan asento” -taulukkaan.

EGR-säätöventtiilin tehtävä on liikuttaa säätöventtiiliä isännän pyyntöjen mukaan. Tämän järjestelmän PID-säädin vertaa haluttua venttiilin asentoa todelliseen venttiilin asentoon ja säätää venttiiliä tilanteeseen sopivalla tavalla. Tiedon todellisesta asennosta se saa EGR-säätöventtiilin askelmoottoriin kiinnitetystä potentiometrillä. Jäähdytysnesteen lämpötilakompensointi on säätöhierarkiassa ylimmäisenä. Kun jäähdytysnesteen lämpötila on alle normaalin, niin lämpötilakompensointi päättää kuinka suuren osan venttiili voi aueta esimiesjärjestelmän pyytämästä arvosta. Esimerkiksi jäähdytysnesteen lämpötilan ollessa 20 °C, venttiili voi aueta vain puolet siitä, mitä se voisi aueta, jos jäähdytysnesteen lämpötila olisi 90 °C.

3.4 EGR:n ja kaasuläpän käyttöönotto

Takaisinkierätyksen käyttöönotto toteutettiin niin, että esimies- ja alaisjärjestelmien PID-säätimiin asetettiin säätötyön aikana hyviksi havaitut arvot. Tämän jälkeen esimiesjärjestelmän pyyntö- ja esiasetustaulukoihin asetettiin pienet arvot moottorin käydessä tyhjäkäyntiä. Sama tehtiin myös alaisjärjestelmän taulukoihin. Rasiustasoa nostettiin

niin, että ahdin alkoi tuottaa ahtopainetta. EGR-venttiilin avautuessa moottorin ahtopaine laski uudelleen, sillä ahtimen turbiiniin ei enää virrannut riittävästi pakokaasua. Tämän takia ahtimen johdesiipien säätöjärjestelmään täytyi myös tehdä muutoksia, jotta ahtopaine saatiin kohoamaan uudelleen. Työtä jatkettiin niin, että EGR-venttiiliä avattiin taas lisää kunnes moottori alkoi käydä heikommin ja suuremmalla polttoaine määrällä tuottaakseen saman vääntömomentin. Taas ahtimen johdesiipiä jouduttiin sulkemaan lisää, jotta moottori sai riittävästi happea. Kun moottori saatiin toimimaan mahdollisimman suurella pakokaasun takaisinkierätysmäärällä, niin rasisustetta ja kierroslukua alettiin muuttamaan. Samat toimenpiteet suoritettiin moottorin kaikilla rasisusteilla aina 3000 rpm:ään saakka. Tämän kierrosluvun jälkeen ei haluta enää käyttää pakokaasun takaisinkierätystä, jotta moottori voi tuottaa maksimaalisen tehonsa. Jotta EGR-venttiilin sulkeutuminen ei aiheuttaisi ahtopaineen säätöön ongelmia, se säädettiin sulkeutumaan hitaasti kierrosnopeuteen 3200 mennessä.

Lambda-arvo säädettiin tyhjäkäyntiä lukuun ottamatta kaikilla kierrosluvuilla ja rasisusteilla arvoon 1,5–1,7, sillä tätä matalammilla lambda-arvoilla moottorin hyötysuhde laski. Säätötyön lopuksi moottorin rasisusta ja kierroslukua vaihdeltiin eri tavoilla ja eri nopeuksilla. PID-säätimeen ja esiasetusarvoihin tehtiin muutoksia, jotta toimilaitteet vaihtoivat asentojaan halutuilla tavoilla. Kaasuläppää ohjattiin open loop -menetelmällä, eli kaasuläpälle annettiin kiinteät arvot. Kierrosten ollessa yli 2200 rpm ja EGR-venttiilin ollessa auki, säädettiin kaasuläppä pitämään imusarjan paine pakosarjan painetta pienempänä. Matalammilla kierrosluvuilla kaasuläppää ei tarvittu.

3.5 Moottorin vaatimukset sen lämpötilan ollessa alle normaalin käyntilämpötilan

Säätötyön aikana havaittiin, että moottorin ollessa alle käyntilämpötilan, se ei suostunut käymään samalla pakokaasun takaisinkierätysmäärällä, kuin mitä se kävi moottorin ollessa lämmin. Kun moottoria yritettiin käynnistää EGR-venttiilin asennon ollessa sama, kuin mihin se oli säädetty moottorin ollessa lämmin, ei moottori suostunut käynnistymään, vaan tuotti startilla pyöriessään vain harmaata savua. Tämä johtui siitä, että lämpötilan ollessa matala, ei dieselpolttoaine suostunut reagoimaan sylinterissä olevan hapen määrän ja pitoisuuden ollessa niin matala, vaan se tuli sumuna pakoputken kautta ulos. Jotta moottori saatiin käynnistymään, otettiin käyttöön jäähdytysnesteen lämpöti-

laan perustuva kompensointi EGR-venttiilin asennolle. Moottorin lämmitessä EGR-venttiili avautuu koko ajan enemmän ja enemmän. Kun jäähdytysnesteen lämpötila on noin 80 °C, niin EGR-venttiili avautuu sille asetettuihin maksimi aukioasentoihin.

Pakokaasun takaisinkierätystä pystyttiin lisäämään ilman hyötysuhteen merkittävää laskua, lisäämällä esiruiskutuksen ennakkoa noin kolme astetta. Ilmiön täytyi johtua siitä, että esiruiskutus ei aiemmin ehtinyt palaa kunnolla ennen pääruiskutusta, mikä taas johtui palotilan kaasusekoituksen pienemmästä happipitoisuudesta. Tällöin myöskään pääruiskutus ei palanut kunnolla. Pääruiskutuksen ennakon hienosäädöllä ei ollut vaikutusta moottorin hyväksymään takaisinkierätysmäärään.

Säätötyön aikana havaittiin myös, että EGR:n ollessa käytössä, moottori lämpeni useita minutteja nopeammin normaaliin käyntilämpötilaansa. Tämä on erittäin hyvä asia päästöjenhallinnan, moottorin kulumisen, polttoaineen kulutuksen sekä matkustamon lämpenemisen kannalta. Moottorin nopea lämpeneminen selittyy sillä, että takaisinkierätettävästä pakokaasusta saadaan lämpöenergiaa talteen takaisinkierätettävän pakokaasun lämmönvaihtimessa ja palotilassa.

Rasituksen ollessa suuri pääruiskutuksenkin ennakkolla oli suurempi vaikutus moottorin hyväksymään pakokaasun takaisinkierätysmäärään. Lisäämällä yhdestä kahteen astetta pääruiskutuksen ennakkoa, saatiin takaisinkierätettävän pakokaasun määrää lisättyä ilman, moottorin hyötysuhteen laskua. Myös ruiskutuspaineen nosto auttoi pitämään moottorin hyötysuhteen korkeampana lisättäessä takaisinkierätystä. Ruiskutuspainetta kohotettiin noin 100–200 bar.

Suurilla rasituksilla takaisinkierätystä ei käytetä, mutta ruiskutusennakot haluttiin kuitenkin tarkistaa. Näitä säädettäessä havaittiin mielenkiintoinen ilmiö. Kun rasitus oli ollut pitkään korkealla, niin moottorin vääntömomentti alkoi laskea. Kadonnut vääntömomentti saatiin palaamaan pienentämällä pääruiskutuksen ennakkoa. Tällöin saavutettiin noin kaksi prosenttia korkeampia vääntömomenttiarvoja kuin juuri sillä hetkellä, kun kaasua oli painettu pohjaan. Ilmiö havaittiin toistuvasti useita kertoja. Ilmiön täytyi johtua osittain siitä, että männän laen ja muun palotilan lämpötila kohosi rasitusasteen kasvaessa. Tällöin dieselpolttoaine pystyi reagoimaan nopeammin. Myös ahtoilman lämpötila kohosi rasituksen jatkuessa pitkään, mutta ilmiö ei selittynyt yksin sillä, koska ahtoilman lämpötila kohosi nopeammin kuin mitä vääntömomentti laski.

4 Typenoksidien muodostumiseen vaikuttavien tekijöiden tutkiminen käytännössä

4.1 Tutkimusten valmistelu

Eri tekijöiden vaikutusta typenoksidien muodostumisen määrään haluttiin tutkia teke-mällä käytännön kokeita. Tällöin saataisiin käsitys siitä, millä tavoin typenoksidipäästöjä voidaan vähentää tehokkaimmin, ilman moottorin hyötysuhteen dramaattista laskemista. Kokeet suoritettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun kylmälaboratoriossa. Pakokaasut suunnattiin niin, että ne päätyivät laboratorion ilmanpoistoaukon luo ja moottorin ilman-otto suunnattiin laboratorion ilmantuloaukon luo. Näin moottorin hengittämän ilman koos-tumus säilyi mahdollisimman samanlaisena mittausten ajan. Laboratorion lämpötila vaih-teli mittausten aikana 16 ja 20 °C:n välillä.

Valitettavasti tutkimuksissa huomattiin se, että aiemmin tehdyt suuttimien tuottojen mit-taukset oli tehty väärin. Tästä seurasi se, että moottorinohjainlaitteen mittaamat ruisku-tusmäärät eivät olleet todellisia mittausten aikana. Suuttimien tuottojen virheellisyys huo-mattiin siitä, että moottori tuotti eri kierrosluvuilla saman vääntömomentin, vaikka ruisku-tusmäärä yhtä työkiertoa kohti muuttui yli 35 prosenttia. Kierroslukujen muutosten ol-lessa pieniä, tulisi moottorin ruiskutusmäärän korreloida vääntömomentin kanssa. Kier-roslukujen muutokset olivat kuitenkin niin pieniä, ettei moottorin hyötysuhde voinut muut-tua niin dramaattisesti kitka- ja pumppaushäviöiden kasvun seurauksesta. Tämän takia mittaustulokset ovat vain suuntaa antavia.

Typenoksidianalysaattori mittasi pakokaasun typenoksidipitoisuutta, joten typenoksidien määrä jouduttiin laskemaan ilmamassamittarin näyttämän ilman massa arvon mukaan ja ruiskutetun polttoaineen massan mukaan. Mittaustuloksista käsitellään vain ne, joissa moottorin tuottama vääntömomentti on sama 42 Nm, koska tällöin ruiskutusmäärien voi-daan olettaa olevan melko lähelle samat. Jonkin verran hyötysuhde laskee moottorin-kierrosluvun kasvaessa, mutta kierrosnopeus muutokset olivat niin maltillisia, ettei niillä ollut juuri merkitystä. Typenoksidien massat on laskettu niin, että polttoaineen ruiskutus-määräksi moottorin työkiertoa kohti on valittu 23,9 mg, jolloin moottorin hyötysuhde olisi ollut mittausten aikana noin 27 %.

Ruiskutusennakoiden vaikutusta ei pystytty mittaamaan, sillä ruiskutusennakon vaikutus moottorin hyötysuhteeseen on niin suuri, että ruiskutusmäärää oli kasvatettava, jotta moottori olisi pystynyt tuottamaan halutun 42 Nm:n vääntömomentin. Johtuen suuttimien vääristä tiedoista ei todellista ruiskutusmäärän kasvua voitu tietää. Pienillä, alle yhden asteen ruiskutusennakon muutoksilla ei kuitenkaan havaittu olevan vaikutusta typenoksidien syntyyn.

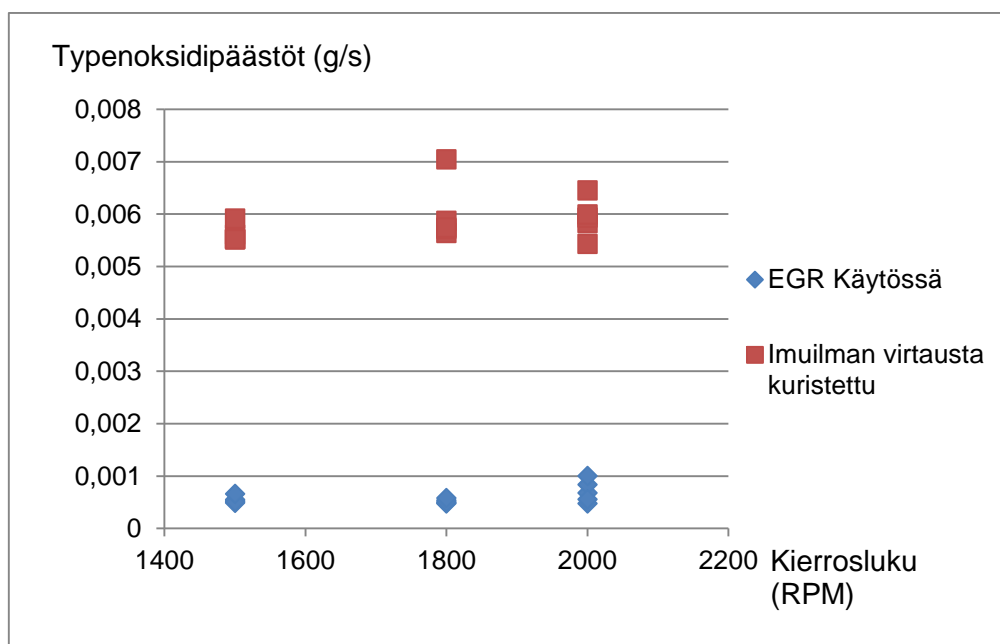
4.2 Mittauksissa käytetyt mittalaitteet

Pakokaasun happipitoisuutta mitattiin ETAS-lambdamittarilla. Pakokaasun happipitoisuus kertoo suuntaa antavasti palamistapahtumaan osallistuneiden hapen ja dieselpolttoaineen määrän toisiinsa nähden. Lambdamittari näyttää pakokaasun lambda-arvoksi yhtä, kun pakokaasussa on happea 0,5–1 % pakokaasun tilavuudesta (6, s.235). Tämä tarkoittaa sitä, ettei lambdamittarin näyttämään voida luottaa sokeasti, sillä etenkin dieselmoottorissa ei koskaan pystytä käyttämään kaikkea palotilassa olevaa happea polttoaineen polttamiseen. Tämä johtuu hapen ja polttoaineen epätäydellisestä sekoittumisesta, sekä sylinterin reunoilla olevista viileämmistä alueista, joissa palamista ei tapahdu, sillä siellä polttoaineen lämpötila ei ole riittävän suuri, jotta se voisi syttyä. Tämän takia ruiskutustapahtumassa pyritään siihen, että polttoaine ei joutuisi näille alueille. Reagoimatta jäävien ilman ja polttoaineen määrä riippuu moottorin ja palotapahtuman lämpötiloista sekä moottorin kyvystä kuljettaa lämpöä palotilasta jäähdytysnesteeseen. On myös huomattava se, että pakokaasun takaisinkierrätys aiheuttaa lambdamittarin näyttämään virhettä. Tämä johtuu siitä, että lambdamittari mittaa hapen prosentuaalista osuutta pakokaasussa. Johdettaessa sylinteriin pakokaasua, on tällöin pakokaasun tilavuudesta suurempi osuus pakokaasua, vaikka sylinteriin päätyvän hapen määrä olisikin vakio. Toisin sanoen pakokaasun takaisinkierrätys saa lambdamittarin näyttämään pienempää arvoa kuin mitä se on palotapahtuman aikana.

Pakosarjan painetta mitattiin painemittarilla ja imusarjan painetta moottorinohjaimen kautta moottorin omalla imusarjan paineanturilla. Mitattujen painearvojen perusteella voitiin päätellä se, milloin kaasuläpän käyttö oli välttämätöntä riittävän suuren paine-eron tuottamiseksi imu- ja pakosarjojen välille. Typenoksidipäästöt mitattiin pakoputkesta ahtimen jälkeen. Typenoksidianalysaattori oli malliltaan Eco Physics CLD 700 EL ht, kemoluminenssi-NO_x-analysaattori, joka vuokrattiin VTT:ltä.

4.3 Ylijäämähapen merkitys typenoksidien syntyyn

Ensimmäisessä testissä haluttiin tutkia, kuinka suurelta osin EGR:n typenoksidipäästöjä laskeva vaikutus perustuu siihen, että palotilassa on vähemmän ylimääräistä happea. Asiaa tutkittiin rajoittamalla moottorin hapen saantia ensin EGR:n avulla ja tämän jälkeen kaasuläpän avulla. Seossuhde pyrittiin pitämään samana mittausten välillä niin, että kun hapen saantia rajoitettiin esim. 1500rpm kierrosluvulla, niin lambda-arvo pysyi samana, rajoitettiin hapensaantia sitten EGR:n tai kaasuläpän avulla. Lambda-arvo mittausten aikana oli 1,8–2.2. Testissä moottoria käytettiin kierrosluvuilla 1500 rpm, 1800 rpm ja 2000 rpm. Alin kierrosluku valittiin sillä perusteella, että dynamometri ei toiminut luotettavasti alle 1500rpm:n kierroksilla. Ylin kierrosluku valittiin sillä perusteella, että moottorin kierrosluvun noustessa yli 2000 rpm, oli ahtimen hyötysuhde jo riittävän hyvä tuottamaan imusarjan paineesta suuremman kuin pakosarjan paineesta. Tällöin kaasuläppää olisi tarvittu myös EGR:n käytön yhteydessä. Tutkimustulokset on esitetty kuvassa 10.



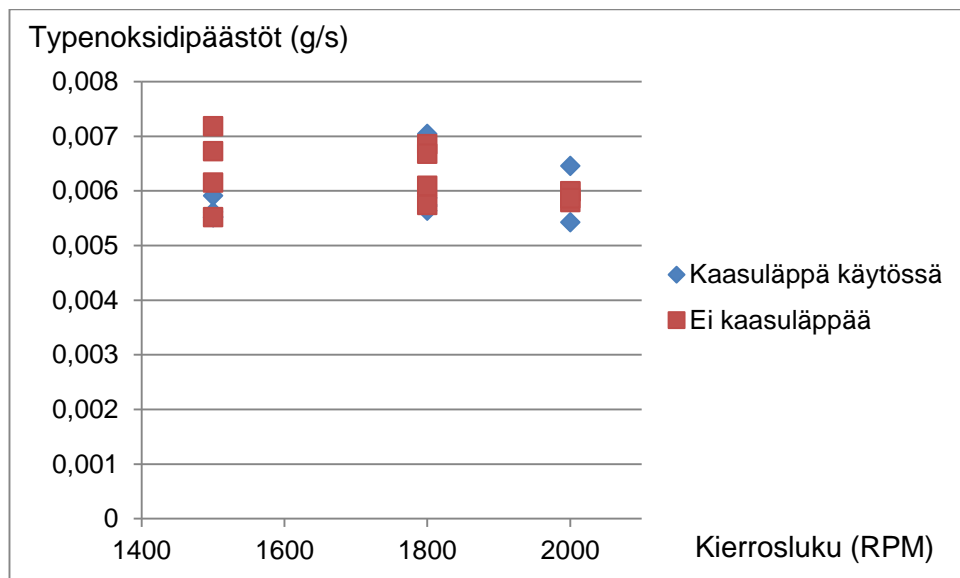
Kuva 10. Vakiolambda-arvolla suoritettavat mittaukset.

Mittaustuloksista nähdään erittäin selkeästi se, että pakokaasun takaisinkierrätys on huomattavasti tehokkaampi tapa laskea typenoksidipäästöjä kuin imuilman virtauksen kuristaminen. Tästä voidaan päätellä se, että ylijäämähapen määrällä ei ole suurta merkitystä ainakaan silloin kun ylijäämähappea on reilusti. On tosin huomattava se, että

huippulämpötilat kasvavat silloin, kun sylinteriin virtaavaa ilmaa kuristetaan, sillä imuilman kuristaminen laskee sylinteriin päätyvän ilman massaa ja sitä kautta myös sylinterissä olevan ilman lämpökapasiteettia.

4.4 Ylijäämähapen määrän vaikutus verrattuna lämpökapasiteetin muutoksen vaikutukseen typenoksidien synnyssä

Seuraavassa mittauksessa moottoria ajettiin samoilla kierrosluvuilla ja ruiskutusmäärillä, mutta toisissa mittauksissa imuilman virtausta kuristettiin ja toisessa moottorin annettiin hengittää vapaasti. Imuilmaa kuristettiin niin, että lambdamittarin näyttämä laski noin kahteen. Moottorin hengittäessä vapaasti lambdamittarin näyttämä oli noin kolme. Tutkimustulokset ovat kuvassa 11.



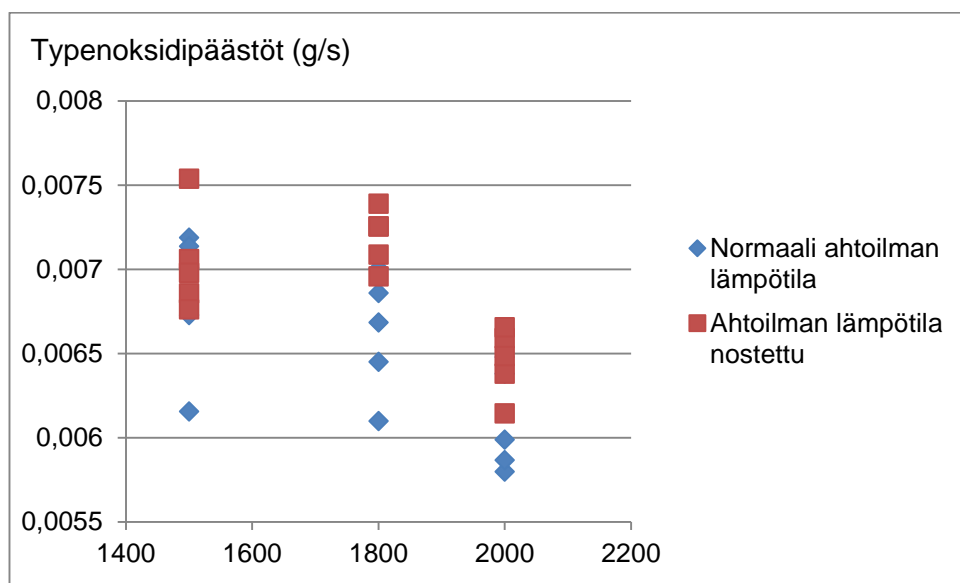
Kuva 11. Imuilmankuristuksen vaikutus typenoksidipäästöihin.

Tässä mittauksessa ei saatu aikaan eroja mittausten välillä. Tämä johtunee siitä, että vaikka lähtöaineiden massaa laskettiin, niin kohonneet maksimilämpötilat kompensoivat muutoksen typenoksidipäästöjen massa.

Myöskään moottorin tuottamassa vääntömomentissa ei havaittu mittaustarkkuudet huomioon ottaen muutosta, vaikka moottorin pumppaushäviöt kasvoivatkin imuilman virtauksen kuristamisen johdosta.

4.5 Ahtoilman lämpötilan vaikutus typenoksidipäästöjen määrään

Mittauksessa haluttiin tutkia moottorin Ahtoilman lämpötilan vaikutusta typenoksidien syntyyn. Mittausten aikana ei käytetty pakokaasun takaisinkierrätystä tai imuilman kuristusta. Ahtoilman lämpötilan kohoaminen saatiin aikaan asettamalla ahtoilman jäähdyttimen eteen pahvi, joka esti jäähdytysilman virtauksen ahtoilman jäähdyttimen läpi. Toisessa mittauksessa jäähdytyspuhaltimen tuottaman ilmavirran annettiin virrata vapaasti ahtoilman jäähdyttimen läpi. Kun ahtoilmaa jäähdytettiin, niin sen lämpötila oli imusarjan lämpötila-anturilla mitattuna noin 10 °C matalampi kuin normaali tilanteessa, jolloin sen lämpötila oli 20 °C. Tutkimustulokset on esitetty kuvassa 12.



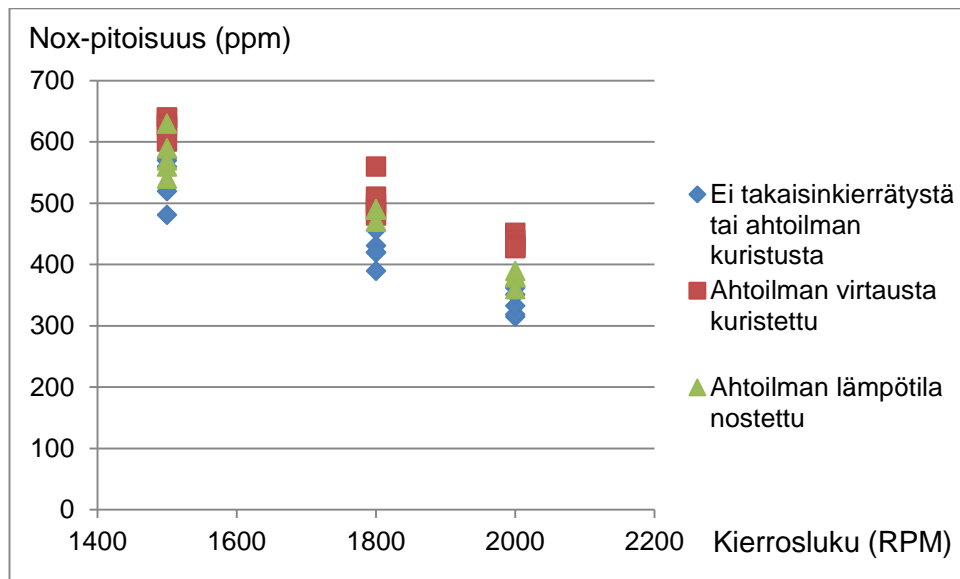
Kuva 12 . Imuilman lämpötilan vaikutus typenoksidipäästöihin.

Ahtoilman lämpötilan muutoksella voidaan havaita olevan hienoinen vaikutus typenoksidipäästöihin.

4.6 Kierrosluvun vaikutus typenoksidipäästöihin

Kierrosluvun kasvattaminen laskee pakokaasun typenoksidipitoisuutta siitä syystä, että niiden muodostumiselle jää vähemmän aikaa yhtä työkiertoa kohden. Kierrosluvun vaikutusta tutkittiin usealla eri mittauksella. Ensimmäisessä mittauksessa moottorin annet-

tiin hengittää vapaasti, toisessa mittauksessa ahtoilman virtausta kuristettiin ja viimeisessä mittauksessa ahtoilman lämpötilaa kohotettiin. Lambda-arvo pyrittiin pitämään eri kierroslukujen välillä mahdollisimman vakaana. Tutkimustulokset ovat kuvassa 13.



Kuva 13. Kierrosluvun vaikutus pakokaasun typenoksidipitoisuuteen.

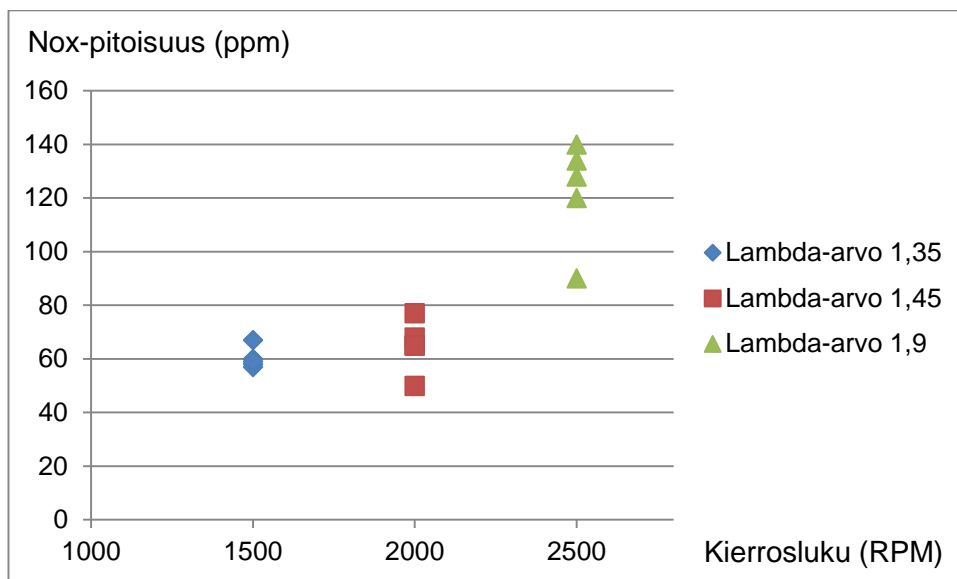
Kierrosluvun kohottaminen laskee mittausten perusteella pakokaasun typenoksidien pitoisuutta lähes lineaarisesti. Tämä kertoo siitä, että typenoksideja muodostavat kemialliset reaktiot eivät ehdi reagoimaan kovinkaan lähelle tasapainopistettään. Jos reaktio olisi nopea, niin kierrosluvun vaikutus täytyisi olla pienempi, sillä mitä lähemmäs tasapainoreaktio pääsee tasapainopistettään, sitä hitaammaksi se muuttuu.

On myös huomattava se, että kierrosnopeuden noustessa voidaan käyttää suurempaa välityssuhdetta saman tehon tuottamiseksi, jolloin vääntömomenttia ei tarvita yhtä paljon. Tällöin tarvittava ruiskutusmäärä yhtä työkiertoa kohden laskee. Tämä vähentää entisestään typenoksidien syntyä, sillä ruiskutusmäärän laskiessa myös palotilan lämpötilat laskevat.

4.7 Lambda-arvon ja kierrosluvun yhteisvaikutus typenoksidien synnyn määrään

Mittausten aikana ei tehty tutkimuksia siitä, kuinka typenoksidipäästöt laskevat pakokaasun takaisinkierrätystä lisättäessä, sillä aina sitä lisättäessä typenoksidipitoisuuksien havaittiin laskevan erittäin selkeästi. Viimeiseen tulosten analysointiin kerättiin kuitenkin eri

tuloksia eri lambda-arvoilla, jotta pakokaasun takaisinkierrätyksen tehokkuutta typenoksidien vähennyskeinona voitaisiin havainnollistaa. Lambda-arvo kertoo pakokaasun suhteellisesta määrästä sylinteriin imetyistä kaasuista.



Kuva 14. Pakokaasun takaisinkierrätyksen ja kierrosluvun yhteisvaikutus pakokaasun typenoksidipitoisuuteen.

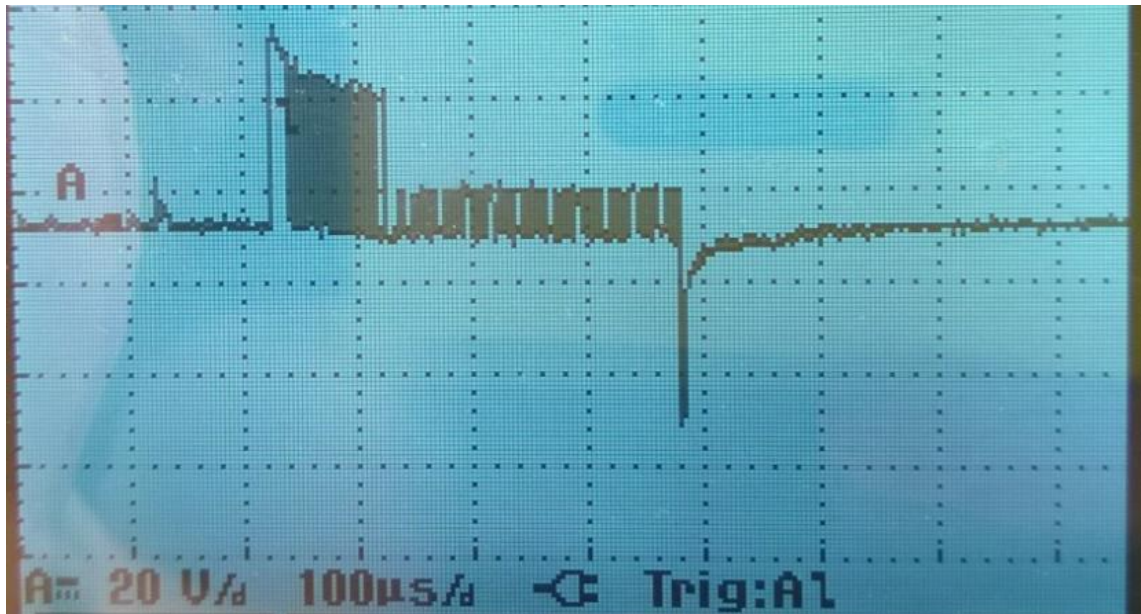
Mittauksesta nähdään erittäin selkeästi pakokaasun takaisinkierrätyksen tehokkuus typenoksideja laskevana tekijänä. Lambda-arvon noustessa arvosta 1,35 arvoon 1,9 nousevat typenoksidi pitoisuudet kaksinkertaisiksi. Mikäli kierros-luku olisi pidetty vakiona, olisi ero vielä suurempi.

5 Moottorin ajettavuussäätäminen

5.1 Suuttimien toiminta sekä ruiskutusmäärien mittaus

Typenoksidipäästöjä mitattaessa tehonmittauspenkissä havaittiin, etteivät moottorinohjainlaitteeseen syötetyt suuttimien ruiskutusmääräarvot voineet olla todellisia. Tämän takia suuttimien ruiskutusmäärät mitattiin uudelleen. Mittaukset suoritettiin Kuopin diesel-huollossa, sillä heillä on mittauksiin soveltuva laite. Ennen uusia mittauksia haluttiin var-

mistua, että tässä moottorissa oleva ohjainlaite käyttäisi samanlaista suuttimen avaus-
singnaalia, kuin suuttimille käytetään alkuperäisestäikin. Avaussingnaali (kuva 15) oli os-
killoskoopilla tarkasteltuna silmämääräisesti täysin samanlainen kuin alkuperäinenkin.

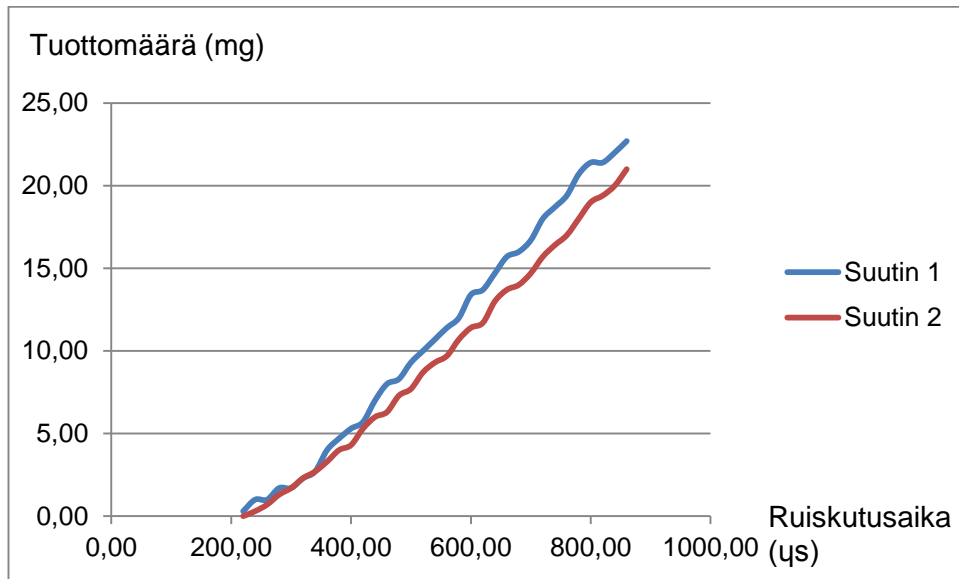


Kuva 15. Oskilloskoopilla mitattu suuttimen jännitteen kuvaaja. Jotta suuttimen kytkentäventtiili ja suuttimen neula liikkuisivat mahdollisimman nopeasti, käytetään suuttimen avauksen alkuvaiheessa suurempaa, noin 40 voltin jännitettä. Tämän jälkeen jännite laskee noin 12 volttiin. Kun suuttimen ohjausvirta katkaistaan, niin suuttimen käämiin syntyy induktiopiikki.

Suuttimien tuoton mittaavalla laitteella voitiin valita vapaasti paine 230 baarin ja 1600 baarin väliltä. Ruiskutusaika voitiin valita nollan mikrosekunnin ja 2000 mikrosekunnin väliltä. Jokaisessa mittauspisteessä testipenkki suoritti kymmenen ruiskutusta. Näistä mittalaite laski keskiarvon. Kymmenen ruiskutuksen ruiskutusmäärän keskiarvo vaihteli suutin kohtaisesti tyypillisesti noin 0,5 milligrammaa. Tämä on arvona melko suuri, etenkin pienillä ruiskutusmäärillä, jolloin käytännössä sylinterissä olevan ilman ja polttoaineen suhde vaihtelee merkittävästi. Suuttimien tarkkuudessa olisi siis vielä yleisesti paljon parannettavaa. Kahden suuttimen mittaustuloksista piirrettiin kuvaajat (kuva 16)

Mittausten aikana suuttimien paluulinjassa paine pidettiin noin 0,3 baarin absoluuttisessa paineessa, sillä tämän suuruinen paine siellä on myös suuttimen normaalissa toimintaympäristössä. Paine saadaan laskettua polttoaineen tulopuolella olevan venturin

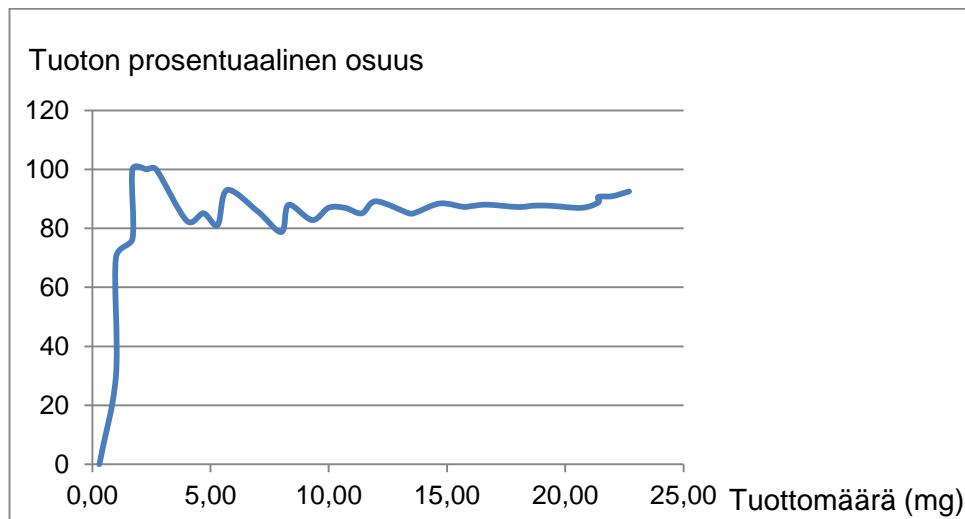
avulla. Suuttimen paluulinjan paineella on erittäin merkittävä vaikutus kytkentäventtiilin toimintaan ja täten koko suuttimen toimintaan.



Kuva 16. Kahden eri suuttimen tuottojen vertailu. Käytetty ruiskutusaine oli 600 bar.

Moottorissa käytettävät suuttimet ovat kaikki yksilöllisiä ruiskutusmääriltään. Volkswagen käyttää jokaiselle suuttimelle niin sanottuja korjauskoodoja, joita moottorinohjain tulkitsee ja muokkaa niiden perusteella jokaisen suuttimen avaus- ja aukipitosignaaleja, jotta kaikkien suutinten ruiskutusmäärät saadaan yhtä suuriksi kaikissa tilanteissa.

Kuvasta 17 nähdään tärkeimmän yksittäisen eron eli avautumisajan vaikutus suutinten ruiskutusmäärään. Ero avautumisajassa aiheuttaa prosentuaalisesti erittäin suuren eron ruiskutusaikojen ollessa lyhyitä.



Kuva 17. Yhden suuttimen prosentuaalinen tuottomäärä verrattuna toisen suuttimen tuottomäärään. Ruiskutuspainetta mitattiin 600bar. Toisin sanoen molemmat suuttimet tuottivat saman ruiskutusmäärän vai silloin, kun ruiskutusmäärä oli noin 2,5 mg.

Yhden suuttimen avautumisaika oli 240 μ s ja toisen suuttimen avautumisaika vain 200 μ s. Tällä erolla on erittäin suuri vaikutus etenkin pienillä ruiskutusmäärillä, jolloin suutin on jännitteellisenä esimerkiksi vain 280 μ s. Toisin sanoen toisen suuttimen ruiskutusmäärä saattaa olla vain puolet toisen suuttimen ruiskutusmäärästä. Eniten tästä ongelmasta on haittaa esiruikutusten käytössä, sillä niiden ruiskutusajat ovat hyvin lyhyitä. Moottorin käyntiäänestä voikin kuulla selkeästi sen, että yhdessä sylinterissä ei ole esiruikutusta lainkaan. Tässä sylinterissä palamisäänet ovat huomattavasti voimakkaammat kuin toisissa sylintereissä. Esiruikutuksen puute aiheuttaa myös tyhjäkäyntiin ongelmia etenkin moottorin ollessa alle normaalin käyntilämpötilan, sillä esiruikutuksen puute hidastaa pääruikutuksen syttymistä ja palamista merkittävästi.

Moottori voitaisiin säätää toimimaan tarkemmin tietyllä ilma-polttoaine seoksella, jos suuttimien tuotot olisivat yhtä suuret. Tällöin moottorin päästöt saataisiin matalammiksi, koska seossuhde olisi mahdollisimman tarkasti sama kaikissa sylintereissä. Esiruikutuksen olemassaolo mahdollistaa myös suuremmat pakokaasun takaisinkierätykset määrät.

Moottorinohjainlaitteen valmistajalta tilattiin kompensointimahdollisuus suuttimien eri aukioloaikojen säätämisen mahdollistamiseksi, mutta se ei ehtinyt saapua tämän opinnäytteen aikana.

5.2 Kaasupolkimen vasteen säätö

Kun moottorin ajettavuutta alettiin testaamaan sen ollessa kiinni autossa, huomattiin että moottori vastasi etenkin matalilla kierrosnopeuksilla hitaasti kaasuun. Myös moottorin momentin tuotto oli heikkoa matalilla kierroksilla, josta seurasi se, että kaasupoljin oli poljettava lähes pohjaan, jotta autolla päästiin edes liikkeelle. Tilanne korjaantui merkittävästi, kun suuttimien keskimääräiset tuotot korjattiin moottorinohjaimen suuttimien tuoton määrittävään taulukkoon. Silti moottorin kaasuun vastaavuus oli edelleen hidasta.

Suurin syy huonoon kaasuun vastaamiseen löytyi tyhjäkäynnin ja rasiustilan välisestä PID-säätimestä. Kun kaasupoljinta ei paineta, on moottori tällöin kierroslukusäätöinen. Se tarkoittaa sitä, että moottorinohjainlaite säätää ruiskutusmäärää niin, että kierrosluku pysyy mahdollisimman tarkoin asetetussa arvossa, joka on 900 rpm. Kun esimerkiksi ilmastointilaite kytketään päälle, niin moottorin kierrosluku pyrkii laskemaan. Moottorinohjainlaite huomaa tämän ja lisää ruiskutusmäärää, jotta kierrosluku pysyy asetetussa. Kaasupoljinta painettaessa moottori siirtyy rasiustilaan, jolloin kaasupolkimella toivotaan tiettyä momenttia kierrosluvun sijaan. Jotta vaihdos eri ohjaustilojen välillä saadaan tapahtumaan hallitusti, on niiden väliin sijoitettu PID-säädin. Säädin säädettiin ohjaamaan aggressiivisemmin, jolloin kaasupoljinta painettaessa moottori reagoi nopeammin. Osittain moottori on kierroslukusäätöinen myös rasiustilassa, koska kierrosluvun muuttumisnopeudelle on asetettu raja-arvot. Tällä järjestelyllä helpotetaan ahtimen pyörimisnopeuden muutoksen viivettä, jotta lambda-arvo ei pääse laskemaan liian matalaksi myöskään kiihdytystilanteissa.

Moottorin näennäistä kaasupolkimeen vastaavuutta saatiin parannettua muuttamalla ohjainlaitteen tapaa tulkita kaasupolkimen asentoa. Muutos saadaan aikaan muuttamalla halutun vääntömomentin taulukkoa (kuva 18). Tämä taulukko on ensisijaisesti tärkein ruiskutusmäärään vaikuttava tekijä. Taulukko muokattiin niin, että sen yläosa mukailee moottorin volymetristä hyötysuhdetta ja taulukon alaosan ruiskutus arvot taas pyritään pitämään vakioina.

Kierrosluvun ollessa 2000rpm ja kaasupoljin pohjaan painettuna taulukko määrää ruiskutusmääräksi 100 prosenttia sallitusta maksimiruiskutusmäärästä, joka on noin 85 milligrammaa kampiakselin kahta pyörähdystä kohden. Kierrosluvun noustessa tai laskeessa ruiskutusmäärää pienennetään, jotta moottori ei savuttaisi. Pienillä rasiuksilla

ruiskutusmäärä pyritään pitämään vakiona kierrosluvusta riippumatta, jotta auton kiihtyvyys saadaan pysymään melko vakiona tietyllä kaasupolkimen painalluksena, moottorin kierrosluvusta riippumatta. Tällöin auto on kuljettajalle helppo ja miellyttävä ajaa. Lopuksi suuret hyppäykset taulukon arvoissa pyöristettiin, jotta muutokset moottorin vääntömomentissa tapahtuisivat riittävän loivasti, jolloin vältetään yllättäviä tilanteita.

rpm	300.0	1 00...	1 50...	2 00...	2 50...	3 00...	3 50...	4 00...	4 50...	5 00...	5 50...	6 00...
100.0	50.0	50.0	75.0	100.0	90.0	85.0	72.0	69.0	56.0	0.0	0.0	0.0
90.0	45.0	50.0	63.0	90.0	80.0	70.0	64.8	62.1	50.4	0.0	0.0	0.0
80.0	40.0	50.0	54.0	73.0	63.0	59.2	57.6	55.2	44.8	0.0	0.0	0.0
70.0	35.0	45.0	48.0	62.0	50.0	45.0	43.0	40.0	39.2	0.0	0.0	0.0
60.0	30.0	35.0	40.0	50.0	40.0	35.0	30.0	30.0	30.0	0.0	0.0	0.0
50.0	28.0	32.0	35.0	40.0	30.0	28.0	28.0	28.0	28.0	0.0	0.0	0.0
40.0	26.0	30.0	30.0	30.0	26.0	26.0	26.0	26.0	22.4	0.0	0.0	0.0
30.0	23.0	25.0	25.0	25.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	0.0	0.0	0.0
20.0	18.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	0.0	0.0	0.0
10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	0.0	0.0	0.0
0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Kuva 18. Halutun vääntömomentin taulukko. Y-akselilla on kaasupolkimen asento prosentuaalisesti ja x-akselilla on moottorin kierrosluku.

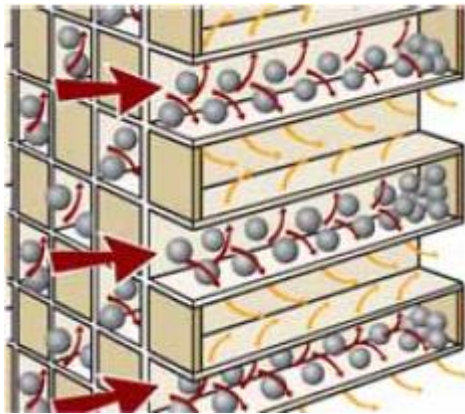
Kuvan 10 taulukosta on merkittävä huomata se, että kierrosluvulla 1000 rpm:n moottori saa sen kierrosluvun maksimiruiskutusmäärästä jo puolet, kun kaasupoljinta on painettu vasta 30 prosenttia sen liikematkasta. Samalla kaasupolkimen painalluksella moottori saa vain neljäsosan sen kierrosluvun maksimiruiskutusmäärästä, kun kierrosluku on 2000 rpm.

6 Hiukkassuodattimen regenerointi

Hiukkassuodatin suodattaa pakokaasusta hiukkaspäästöt itseensä. Hiukkassuodatin sisältää kennoston, jonka voidaan ajatella rakentuvan vierekkäin olevista putkista (kuva 19), joista joka toisesta on tukittu putken toinen pää ja joka toisesta toinen pää. Putkien

seinämien voidaan ajatella olevan hyvin pienisilmäistä verkkoa, joka kerää pakokaasusta kiinteät partikkelit. Putkiston pinta-ala on rakennettu hyvin suureksi, jotta hiukkasloukun aiheuttama vastapaine saadaan matalaksi.

6.1 Hiukkasloukun vaatimukset regeneroinnille



Kuva 19. Hiukkasloukun periaatekuva. Pakokaasu ja hiukkaset kulkevat nuolien suunnassa. Hiukkaset jäävät kennon huokoiseen materiaaliin. (7, s.52)

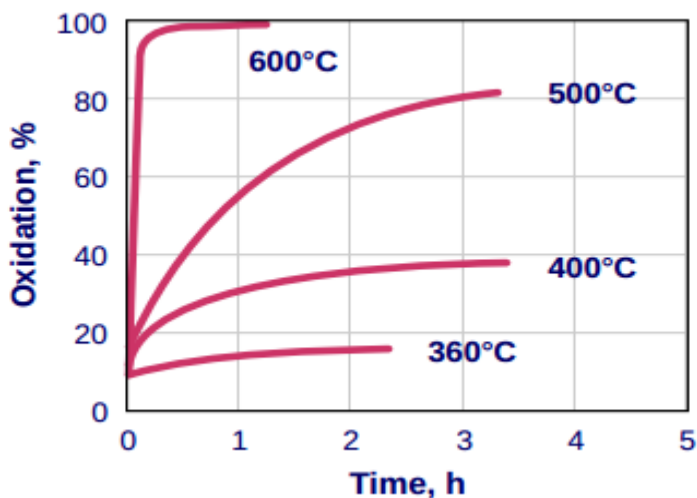
Kun hiukkassuodatin on täyttynyt, on se puhdistettava eli regeneroitava. Regeneroinnin aikana hiukkassuodattimen lämpötila täytyy nosta noin 600 °C:seen noin 12–15 minuutin ajaksi, jotta regenerointi tapahtuisi riittävän nopeasti ja jotta huonoimminkin palavat hiukkaset ehtivät palaa. Jos hiukkassuodatinta ei puhdistettaisi säännöllisesti, kertyisi loukkuun paljon nokea. Tämän suuren nokimäärä alkaessa kerralla hapettua, nousisi loukun lämpötila hallitsemattomasti liian korkeaksi, jolloin loukun kennosto sulaisi.

Sopiva lämpötila loukun regenerointiin voidaan saavuttaa kolmella eri tavalla. Tavallisessa ajossa pakokaasun lämpötila voidaan saada kohoamaan hetkellisesti 600 °C:seen. Tällainen tilanne on esimerkiksi reipas kiihdytys moottoritienopeuteen. Ajettaessa suurella vaihteella tasaista moottoritienopeutta, voidaan regenerointi suorittaa myöhäistämällä pääruiskutusta. Tällöin moottorin hyötysuhde huononee, koska palava kaasu ei ehdi tehdä työtä mäntään niin paljoa kuin se moottorin hyötysuhteen kannalta optimaalisessa tilanteessa ehtisi. Tällöin ruiskutusmäärää on kuitenkin kasvatettava, jotta moottori tuottaisi kuitenkin saman vääntömomentin. Huonontunut hyötysuhde ja kasvanut ruiskutusmäärä nostavat pakokaasun lämpötilaa. Kun autolla ajetaan taajamanopeuksia, niin regenerointia ei voida toteuttaa hieman myöhäistetyllä pääruiskutuksella, vaan

on otettava käyttöön jälkiruiskutus, joka ruiskutetaan vasta noin 70 astetta yläkuolokohdan jälkeen. Tällöin polttoaine höyrystyy sylinterissä ja poltetaan se vasta katalysaattorissa, joka on juuri ennen hiukkasloukkaa.

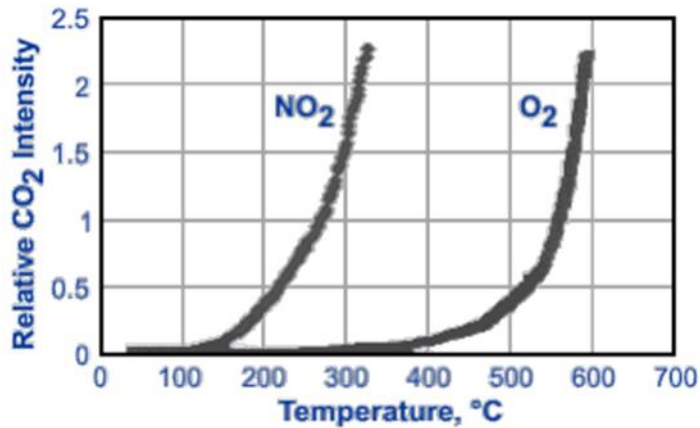
6.2 Noen kertyminen ja poistuminen hiukkasloukusta

Noen kertyminen ja poistuminen hiukkasloukusta voidaan ajatella tapahtuvan tasapainoreaktion tavoin (8, s. 8-16). Tämä tarkoittaa sitä, että tietyssä lämpötilassa, tietyllä loukussa olevalla noen massalla ja tietyllä noen massan saapumisnopeudella loukkuun tulee ja loukusta poistuu hapettumalla sama noen massa samassa ajassa. Mitä suurempi lämpötila loukussa on, sitä pienempi on loukussa olevan noen massa silloin, kun tasapainotilanne saavutetaan (kuva 20). Kuitenkin loukkuun kertyy myös sellaisia huonosti palavia nokihiukkasia, jotka vaativat lämpötilan noston 600 °C:seen, jotta ne hapetuvat. Tämä tarkoittaa sitä, että aikaa myöten tasapainopiste siirtyy suuremman noki-massan kohdalle, mikäli huonosti palavia nokihiukkasia ei saada poltettua.



Kuva 20. Lämpötilan vaikutus nokihiukkasten hapettumiseen. Mitä suurempi on loukun lämpötila sitä nopeammin ja täydellisemmin hiukkasloukku puhdistuu. (7, s. 2.)

Noen polttamiseen tarvittavaa lämpötilaa lasketaan kahdella eri tavalla. Ensimmäinen tapa on johtaa loukkuun typpidioksidia (kuva 21). Sitä tehdään hapetuskatalysaattorissa typpimonoksidista. Pieniä määriä typpidioksidia syntyy myös sylinterissä sekä sylinterin ja katalysaattorin välillä.



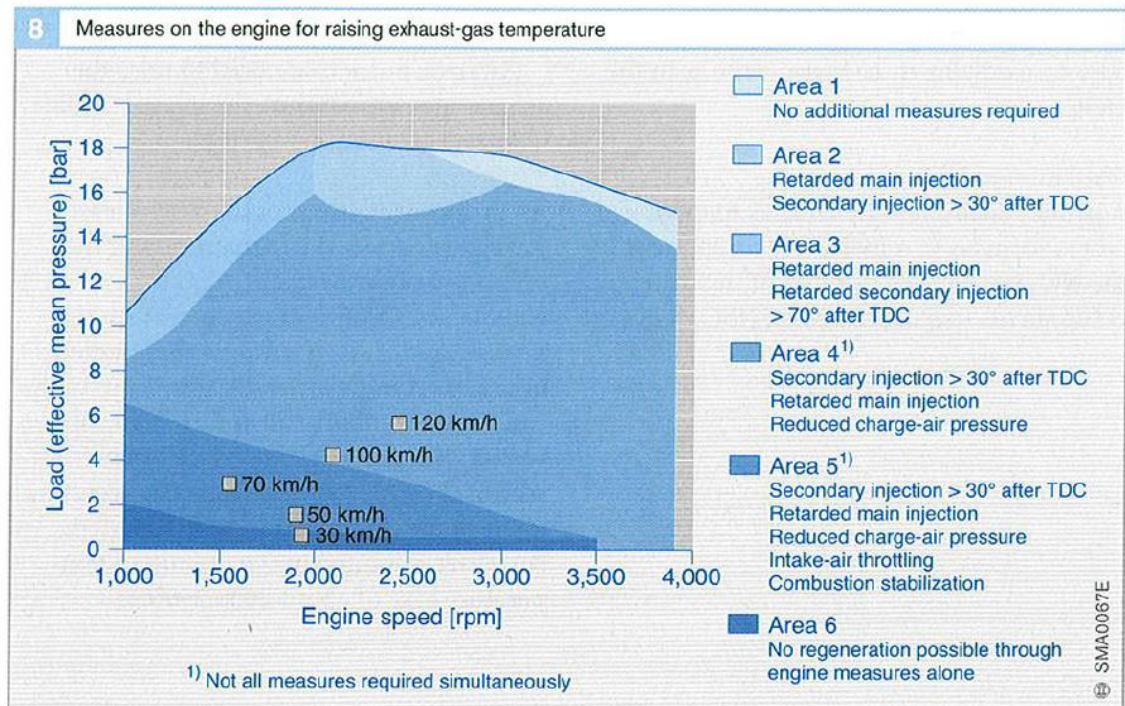
Kuva 21 (7, s.5) Typpidioksidi on voimakas hapetin, joka helpottaa noen polttamista.

Tämän työn kohteena olevassa moottorissa käytetään sellaista hiukkasloukkua, jossa katalyyttinä käytetään platinaa (9, s.14). Platina on laitettu suodattimen kennon pinnalle tehtaalla. Platina ei laske hiukkasten hapettumislämpötilaa yhtä tehokkaasti, kuin typpidioksidi, mutta platinalla ei myöskään ole haittavaikutuksia. Katalyytin ja typpidioksidin avulla regenerointiväliä voidaan pidentää merkittävästi. Tämä parantaa polttoaineta-
loutta, sillä polttoaineen kulutus kasvaa selkeästi regeneroinnin aikana.

6.3 Vaatimukset regenerointilogiikalle

Regenerointilogiikalta vaaditaan se, että regenerointi tapaa voidaan vaihtaa ajonaikana, ajotilanteen muuttuessa. Lisäksi regeneroinnin tulee tapahtua loukun täyttymisen kan-
nalta optimaaliseen aikaan ja sen tulee kestää riittävän pitkään, kunnollisen puhdistuk-
sen varmistamiseksi. Regeneroinnin haittavaikutukset moottoriin ja polttoaineen kulutuk-
seen tulee minimoida.

Lähteissä (4, s. 459) ja (10, s. 351) regenerointitavat eri moottorin toiminta-alueille on
jaettu kuuteen eri alueeseen kuvan 22 mukaisesti.



Kuva 22. Regenerointitavat moottorin eri rasitus- ja kierroslukalueilla. Kuva kertoo suurpiirteisesti, millaisin toimenpitein pakokaasun lämpötilan nosto tulee suorittaa moottorin eri toimintatiloissa. (10, s. 351.)

Pienillä rasituksilla (alue 6 kuvassa 20) sylinterin lämpötilat ovat niin matalia, että jälkiruiskutusta ei saataisi syttymään enää yläkuolokohdan jälkeen. Pakokaasunkin lämpötila on niin matala, ettei polttoainetta saada palamaan katalysaattorissa. Tällöin on kuitenkin viisasta kuristaa imuilman virtausta kaasuläpän avulla, jotta moottorin ja hiukkasloukun läpi kulkeva massavirta saadaan pidettyä mahdollisimman pienenä. Tällöin hiukkasloukun lämpötila saadaan pidettyä mahdollisimman korkeana myös matalilla rasituksilla. Pääruiskutusta voidaan hieman myöhäistää, jos esiruiskutuksen määrää kasvatetaan palotilanlämpötilan ylläpitämiseksi.

Hieman suuremmilla rasituksilla (alue 5) pakokaasun lämpötila saadaan kohoamaan riittävän suureksi, kun käytetään myöhäistettyä pääruiskutusta ja noin 30 astetta yläkuolokohdan jälkeen tapahtuvaa jälkiruiskutusta. Jotta jälkiruiskutus saadaan varmasti palaamaan kunnolla sylinterissä, voidaan esiruiskutuksen massaa jälleen kasvattaa, riittävän suuren palotilan lämpötilan varmistamiseksi. Moottorin rasitustason taas kasvaessa (alue 4) sylinterin lämpötila voi riittää sytyttämään jälkiruiskutuksen ilman suurennettua esiruiskutuksen massaa. Lisäksi moottorin ja hiukkasloukun läpi virtaavan ilma massaa on syytä rajoittaa, jotta lämmitettävä massa saataisiin mahdollisimman pieneksi, jolloin

polttoainetalous heikkenee mahdollisimman vähän. Ilman massan ollessa optimoitu, polttoainetta kuluu mahdollisimman vähän pakokaasun lämmittämiseen.

Suurilla rasiuksilla mutta pienillä moottorin kierrosluvuilla (alue 3) happilyijäämää ei ole paljoa. Tämä johtuu siitä, että käytössä oleva turboahdin ei pysty tuottamaan kovin suurta painetta, ilman tilavuusvirran ollessa pienehkö moottorin matalasta kierrosluvusta johtuen. Jos ahdin pakotettaisiin tuottamaan ahtopainetta, olisi siitä seurauksena ahti-men kompressorisiiven sakkkaus. Pienestä happilyijäämästä johtuen jälkiriiskutusta ei saada palamaan kunnolla sylinterissä, koska se tulisi mustana savuna ulos moottorista, hapen määrän ollessa riittämätön polttamaan kaikki sylinterissä oleva polttoaine. Tämän takia jälkiriiskutus tehdään erittäin myöhään, noin 70 astetta yläkuolokohdan jälkeen. Tällöin dieselpolttoaine ei enää syty sylinterissä, vaan se ainoastaan höyrystyy siellä. Diesel syttyy vasta katalysaattorissa, kun katalyytti on helpottamassa palamista. Tällöin pakokaasun lämpötilaa nostetaan siis vasta katalysaattorissa. Jälkiriiskutuksen massan ei kuitenkaan tarvitse olla suuri, sillä pakokaasun lämpötila on jo valmiiksi korkeahko johtuen moottorin suuresta rasiustasosta ja pienehköstä ilman massavirrasta.

Kierrosluvun noustessa edellisestä tilanteesta, on ilmaa taas käytettävissä riittävästi, jotta jälkiriiskutus voidaan polttaa sylinterissä (alue 2). Kun rasiustaso on riittävän suuri, niin jälkiriiskutusta ei tarvita ollenkaan. Kaikkein suurimmilla rasiuksilla pääriiskutusta ei tarvitse edes myöhäistää sillä pakokaasu on riittävän kuumaa muutenkin.

6.4 Regenerointilogiikan suunnittelu

Koska ohjainlaitteen valmistajalla ei ollut olemassa valmista regenerointilogiikkaa, täytyi sellainen suunnitella. Regenerointi tarve määritetään hiukkasloukun aiheuttaman vastapaineen ja moottorin läpivirtaavien kaasujen tilavuudesta. Kun seuraavat ehdot täyttyvät, niin regenerointi aloitetaan:

- Hiukkasloukun tuottama vastapaine ylittää kyseiselle moottorin toimintatilanteelle sallitun vastapaineen.
- Pakokaasunlämpötila ennen katalysaattoria on alle 650 °C, ennen hiukkasloukkaa alle 800°C tai hiukkaloukun jälkeen alle 1100 °C.
- Moottorin jäähdytysnesteen lämpötila on yli 85 °C.

Kun ohjainlaite havaitsee, että hiukkasloukun aiheuttama vastapaine kasvaa jossakin ajotilanteessa yli siinä tilanteessa sallitun vastapaineen, siirtyy ohjainlaite regenerointitilaan. Regeneroinnin alkaessa käynnistetään ajastin. Kun regenerointitilan ajastin on päässyt 15 minuuttiin, siirtyy ohjainlaite takaisin normaaliin tilaansa. Vaadittu regenerointi aika vaihtelee eri tietolähteiden mukaan. 15 minuuttia on kuitenkin yleisimmin mainittu aika. Regenerointitilan ajastin on oltava säädettävä, mikäli 15 minuuttia ei riitä regenerointiin. Jos regenerointi on kestänyt liian lyhyen ajan, ei hiukkasloukun tuottama vastapaine ole laskenut puhtaasti hiukkasloukun tasolle regeneroinnin jälkeen.

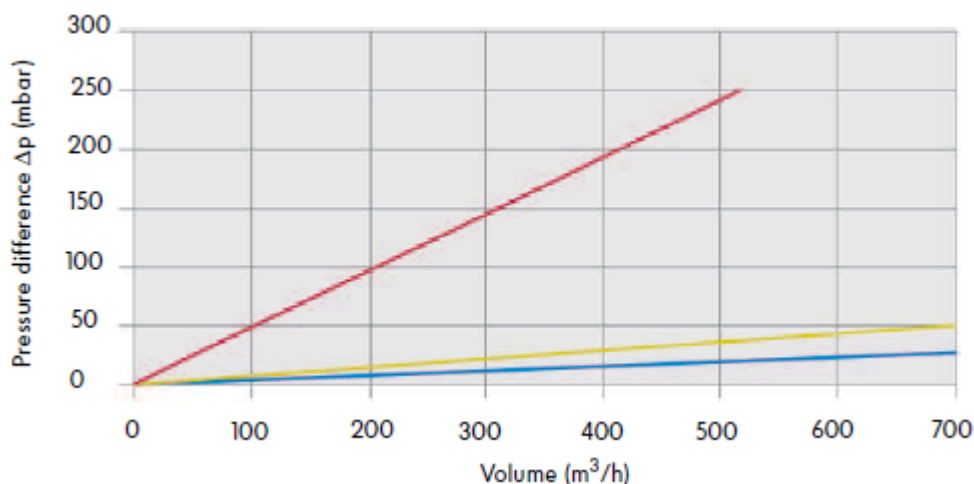
Moottorinohjainlaitteen on kuitenkin palattava normaaliin tilaansa, mikäli edellä mainitut pakokaasun lämpötilarajat ylittyvät. Mikäli näin ei tehtäisi, saattaisivat katalyysaattori tai hiukkasloukku ylikuumentua (7,9). Moottorin lämpötila vaikuttaa selkeästi dieselpolttoaineen palamisnopeuteen. Tämän takia regenerointia ei haluta tehdä moottorin ollessa kylmä, sillä vaadittava säätötyön määrä kasvaisi huomattavasti.

Suuret autovalmistajat ottavat myös huomioon loukkuun ajan kanssa kertyvän tuhkan määrän. Vaikkakaan tämän moottorin hiukkasloukun regeneroinnissa ei käytetä mitään erikseen hiukkasloukkuun ruiskutettavaa regenerointilämpötilaa laskevaa lisäainetta, kertyy loukkuun silti tuhkaa. Tämä tuhka tulee muun muassa sylinterissä palavasta moottoriöljystä. Tämän takia tässä moottorissa onkin käytettävä sellaista öljyä, joka tuhkaantuu mahdollisimman vähän. Loukkuun kertyessä ajan kanssa enemmän ja enemmän tuhkaa, sen tuottama vastapaine kasvaa. Suuret autovalmistajat huomioivat kertyneen tuhkan määrän sallimalla ikääntyneen loukun vastapaineen nousun suuremmaksi kuin uuden, ennen regeneroinnin aloittamista. Tuhkan aiheuttama vastapaine tiedetään vertaamalla juuri regeneroidun loukun vastapainetta uuden loukun tuottamaan vastapaineeseen.

Bioforen tätä tuhkan määrän huomioivaa säätölogiikka ei haluttu, sillä se vaatisi erittäin monimutkaisen säätölogiikan, eikä tällaisen säätämiseen ja luomiseen ole riittävästi aikaa käytettävissä. Koska Biofore on yksittäisvalmisteinen auto, on huomattavasti helpompaa ratkaista tuhkan kertymisongelma vaihtamalla hiukkasloukku tarvittaessa. Hiukkasloukun ikääntyminen tulee ilmenemään regenerointivälin lyhentymisenä. Kun regenerointiväli on lyhentynyt liian lyhyeksi, niin loukku vaihdetaan. Ei ole kuitenkaan odotettavaa, että tätä tarvitsi tehdä ainakaan ennen kuin autolla on ajettu noin 100 000 kilometriä.

6.5 Tarvittavat muutokset ohjainlaitteeseen

Jotta aiemmin käsitellyt asiat saadaan toteutumaan, tilattiin ohjainlaitteen valmistajalta seuraavat muutokset. Ohjainlaitteen täytyy pystyä vaihtaa tilaansa, jotta moottorin säätöarvoja voidaan muuttaa regenerointi tarpeen mukaan, mutta normaali tilassa moottorin tulisi toimia jo aiemmin säädettyjen arvojen mukaan. Kun ohjainlaite vaihtaa tilaansa, saadaan käyttöön uudet taulukot ruiskutusten ajoituksien ja määrien määrittämiseksi. EGR-venttiilin tulee sulkeutua ja ahtimen johdesiipien esiasetusarvotaulukko tulee vaihtaa. Moottorin anturointia täytyy lisätä, jotta pakokaasun lämpötilat saadaan tietoon ahtimen jälkeen, katalysaattorin jälkeen sekä hiukkasloukun jälkeen. Ohjainlaitteen pitää myös pystyä tulkitsemaan vastapaineanturin signaalia. Ruiskutuspainneiden lasku saattaa myös muodostua tarpeelliseksi, silloin kun jälkiruiskutus suoritetaan niin myöhään, ettei polttoaine enää syty palotilassa. Suorittaessa jälkiruiskutus erittäin myöhään, ei polttoaine enää päädy männän laessa olevaan kuoppaan, vaan se leviää koko sylinterin leveydelle. Tällöin polttoaineen pisaroitumista sylinterinseinämiin voidaan vähentää lasquemalla ruiskutuspainetta. Tämän takia myös ruiskutuspaineen määrittämiseen tarvitaan toinen taulukko regeneroinnin ajaksi.



Kuva 23. Hiukkasloukun kehittämät vastapaineet. Hiukkasloukun aiheuttama suurin sallittu vastapaine tilavuusvirran funktiona on piirretty kuvaan punaisella viivalla. Kun vastapaine on punaisella viivalla, niin loukkuun kertyneen noen massa on 40 grammaa. (9, s. 20.)

Ohjainlaitteessa tulee olla myös taulukko, johon voidaan verrata loukun vastapainetta kaikissa ajotilanteissa. Tämän taulukon arvot voidaan laskea pakokaasun lämpötilan perusteella ja imuilman massamittarin perusteella.

7 Yhteenveto

7.1 Tarvittavat muutokset jo tehtyyn työhön

Moottori ollessa alle normaalin käyntilämpötilan, se vaati enemmän happea palamisprosessiin, jotta edes jotakuinkin kaikki dieselpolttoaine saataisiin poltettua. Tästä syystä takaisinkierrätetyn pakokaasun määrän on oltava kylmällä moottorilla pienempi kuin lämpimällä. Takaisinvirtaavan pakokaasun määrän ollessa pienempi sitä päätyy enemmän ahtimen turbiinille. Tästä seuraa se, että moottorin ollessa alle normaalin käyntilämpötilan, pyrkii ahdin sakkaamaan, ennen kuin PID-säädin on ehtinyt avata johdesiipiä riittävästi. Tätä varten ahtimen johdesiipien esiasetusarvoon tarvitaan moottorin jäähdytysnesteen lämpötilan mukaan toimiva kompensointi. Kompensoinnin tarvetta ei osattu ottaa huomioon pakokaasun takaisinkierrätysjärjestelmää suunniteltaessa. Ahtimen johdesiipien esiasetusarvon jäähdytysnesteen lämpötilaan perustuva kompensoinnin mahdollistava taulukko tilattiinkin ohjainlaitteen valmistajalta. Samalla tilattiin myös regeneroinnin vaatimat muutokset sekä suuttimien ruiskutusmäärien tasauksen mahdollistavat kompensointitaulukot.

Kun ruiskutusmäärien kompensointitaulukot on saatu, on ruiskutusmäärät luonnollisesti kompensoitava tämän jälkeen. Kompensointi voidaan tehdä suuttimien tuottomittausten perusteella. Moottorin hyötysuhde, vääntömomentti- ja tehoarvot tulevat paranemaan etenkin tyhjäkäynnin läheisillä kierrosluvuilla ja rasiustasoilla, kaikkien sylintereiden saadessa yhtä suuret esiruiskutus- ja ruiskutusmäärät. Pakokaasun takaisinkierrätystä voidaan lisätä, ruiskutusmäärien tasaantuessa, sillä typenoksidimittausten aikana havaittiin, että moottorin hyötysuhde ei laskenut dramaattisesti ennen kuin lambda-arvo laski välille 1,5–1,7. Lisättäessä takaisinkierrätystä, sen sylinterin vääntömomentin tuotto alkoi tällöin laskea eniten, joka kävi kaikkein rikkaimmalla seoksella. Kun tämän sylinterin ruiskutusmäärää pienennetään ja kahden muun sylinterin ruiskutusmäärää kasvatetaan, niin pakokaasun takaisinkierrätystä voidaan lisätä.

Esiruiskutusmäärien ollessa kunnossa, voidaan alkaa kiinnittämään huomiota moottorin käynnistyksen jälkeisiin hetkiin. Moottorin ollessa reilusti alle normaalin käyntilämpötilansa, se ei siis pysty toimimaan yhtä suurella pakokaasun takaisinkierrätys määrällä. Tätä voidaan pyrkiä kompensoimaan vähentämällä ilman pyörteilyä palotilassa. Ilman pyörteily auttaa hyödyntämään palotilassa olevan hapen tehokkaasti, mutta pakokaasun

takaisinkierätystä rajoitettaessa, ei läheskään kaikkea happea tarvitse hyödyntää. Tällöin voimakkaasta pyörteilystä voi olla enemmän haittaa, sillä se myös jäähdyttää palavaa seosta, häiriten palotapahtumaa samalla tavalla, kuin puhaltaminen häiritsee kynttilän liekkiä.

7.2 Yhteenveto työntuloksista

Tässä opinnäytetyössä hankittiin ymmärrys dieselin palamisreaktion vaikuttavista asioista sekä perehdyttiin tämän aikana syntyvien pakokaasupäästöjen hallintaan. Typenoksidipäästöjen hallintaan perehdyttiin kaikkein tarkimmin, sillä niiden hallinnan tiedettiin olevan kaikkein hankalinta. Tämän takia työn aikana suoritettiin käytännön kokeita typenoksidipäästöihin vaikuttavien asioiden tutkimiseksi.

Työn aikana ei keksitty varmaa vastausta siihen, miksi koeajetun Volkswagenin moottori käytti niin suuria lambda-arvoja. Ajettaessa tasaisella nopeudella taajamassa, lambda-arvolle hyvin tyypillinen arvo oli 2,1. Suoritettujen typenoksidimittausten perusteella voidaan arvioida lambda-arvon 2,1 tarkoittavan noin kaksin kertaisia typenoksidipäästöjä verrattuna siihen tilanteeseen, jossa pakokaasun takaisinkierätystä olisi lisätty laskemaan lambda-arvo 1,5:teen.

Myöskään Volkswagenin tapaan tuottaa riittävä pakokaasun takaisinkierätys määrä, ei keksitty varmaa selitystä. Volkswagen avasi EGR-venttiiliään vain hieman ja kuristi imu- ja pakosarjojen virtausta kaasuläpällä tuottaen näin suuremman paine-eron imu- ja pakosarjojen välillä. Tämä tarkoittaa sitä, että sylinteriin saadun kaasun lämpökapasiteetti ei ollut suurin mahdollinen, sillä kaasuja ei ahdettu suurimmalla mahdollisella paineella sylinteriin. Yksi mahdollinen syy täytösasteen rajoittamiseen voi olla se, että tällöin selvittää pienemmillä ruiskutuspainella, sillä polttoaineen palotilassa kohtaama väliaineenvastus pienenee täytösasteen laskiessa. Ruiskutuspainoiden laskuun voidaan pyrkiä ruiskutus-pumpun pienemmän tehon tarpeen vuoksi.

Yksi mahdollinen syy molempiin askarruttaviin asioihin voi olla se, että Polo on pieni ja kevyt auto. Päästönormin mukaan henkilöauton massalla tai ajovastuksilla ei ole merkitystä sallittuihin maksimi päästömääriin. Kevyen auton kiihdyttämiseen tarvitaan vähemmän tehoa, jolloin myös pakokaasun määrä vähenee. Pakokaasun määrän ollessa vähäinen, sen saastepitoisuudet voivat olla suuremmat.

Työn alussa asetettuja tavoitteita ei saavutettu täysin. Bioforen moottori ei ole vielä säädetty riittävän tarkasti, jotta se läpäisisi pakokaasupäästöjen Euro 5 -päästönormin tyypin 1 testin. Ongelmat ja niiden ratkaisut ovat tiedossa ja työtä tullaan jatkamaan keväällä 2015. Bioforelle anottiin poikkeuslupa, jotta sen ei tarvitse alittaa syyskuussa 2014 voimaan tulleen pakokaasupäästöjen Euro 6 -päästönormin rajoja, vaan riittää että se läpäisee dieselautolle vaaditut pakokaasupäästöjen Euro 5 -normin mukaiset päästöttestit.

Regeneroinnin vaatimukseen perehdyttiin työn aikana. Regenerointilogiikan oikein suunnittelun varmistamiseksi tietoa hankittiin useista eri lähteistä. Haasteita tullaan kuitenkin kohtaamaan niissä kohdissa, joissa regenerointitapa vaihtuu. Moottorin tuottaman vääntömomentin tulisi pysyä kaikissa tilanteissa kuljettajalle halutunlaisena.

Moottorin ollessa reilusti alle normaalin käyntilämpötilansa, on päästöjen hallinta tasapainottelua typenoksidi- ja hiilivetypäästöjen välillä. Moottorin lämmitettyä päästöjen hallinta on vuorostaan tasapainottelua typenoksidien ja moottorin hyötysuhteen välillä. Voidaankin todeta, että lukuun ottamatta hiukkassuodatinta tämän moottorin päästöjen hallinta on vain hapen määrän ja ennen kaikkea lämpötilojen hallintaa. Palotilojen lämpötilojen tulee olla mahdollisimman matalia, jotta typenoksidipäästöjä syntyisi mahdollisimman vähän. Toisaalta lämpötilojen tulee olla riittävän korkeita palotilassa, jotta diesel-polttoaine saadaan syttymään ja palamaan kunnolla.

Lopuksi haluan kiittää Oona Nevasta avusta kemiallisten reaktioiden teoreettisessa tutkimisessa sekä Lauri Ehoa ja Heikki Parviaista avusta regenerointiin liittyvän tiedon hankinnassa.

Lähteet

- 1 Neuvoston direktiivin 70/220/ETY, annettu 20 päivänä maaliskuuta 1979, moottoriajoneuvojen päästöjen aiheuttaman ilman pilaantumisen estämiseksi toteutettavia toimenpiteitä koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön lähentämisestä, muutettu 20.12.2006.
- 2 Warnatz, J., Maas, U. & Dibble, R.W. 2000. Combustion 3rd edition. Heidelberg: Springer.
- 3 Mollenhauer, K., Tschoeke, H. 2007. Handbook of Diesel Engines. Heidelberg: Springer.
- 4 Majewski, W. A., Khair, M. K., 2006. Diesel Emissions and Their Control. Warrendale: SAE International.
- 5 Bell, C. 1997. Maximum Boost. Cambridge, USA: Bentley Publishers.
- 6 Turner, J., Eastwood, P., Swingler, J., Lin, Y., Sanchez F.J., Tudor M. J., Beeby S. P. 2009. Automotive Sensors. New York: Momentum Press.
- 7 Volkswagenin itseopiskeluohjema 403.
- 8 Majewski, W. A. 2005. Diesel Filter Regeneration. Verkkodokumentti. dieselnet.com.
- 9 Volkswagenin itseopiskeluohjelma 336.
- 10 Diesel-Engine Management 2006. Robert Bosch GmbH. 4th edition. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd.