

VAASAN YLIOPISTO

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

ENERGIATEKNIikka

Pekka Isola

RUISKUTUKSEN MITTAUSPENKIN SUUNNITTELU

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten
Vaasassa 6.4.2017.

Työn valvoja

Professori Seppo Niemi (TkT)

Työn ohjaaja

Jukka Kiijärvi (TkT)

ALKUSANAT

Tämä diplomityö oli osa Tekesin rahoittamaa FLEX^e-tutkimusohjelmaa. Ohjelman tavoitteena oli luoda uusia teknologisia ja liiketaloudellisia konsepteja, joilla voidaan parantaa siirtymistä nykyisistä energiajärjestelmistä kestäviin energiajärjestelmiin. Ohjelmaa koordinoi CLIC Innovation.

Kiitän diplomityöni valvojaa professori Seppo Niemeä mielenkiintoisesta diplomityön aiheesta. Työni ohjaajaa Jukka Kijärveä kiitän hyvästä opastuksesta diplomityön tekemisessä. Sain myös paljon apua yhteistyössä toimineista yrityksistä. Kiitän Wärtsilän Thomas Herliniä, Boschin Michael Klemtiä ja AGCO Powerin Vesa-Matti Luomaa hyvin sujuneesta yhteistyöstä.

Vaasa, 5.4.2017

Pekka Isola

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT.....	2
KUVAT	5
SYMBOLIT.....	7
TIIVISTELMÄ.....	9
ABSTRACT	10
1 JOHDANTO.....	11
2 RUISKUTUS.....	13
2.1 Polttoainesuihkun liike-energia	13
2.2 Suihkun hajoaminen	13
2.3 Syttymisjättämä	15
2.4 Ruiskutuksen vaikutus hiilivety päästöihin	16
2.5 Typen oksidipäästöt	17
3 VIRTAAUS RUISKUTUSVENTTIILIN REIÄSSÄ	18
4 YHTEISPAINERUISKUTUSJÄRJESTELMÄ	22
4.1 Korkeapainepumppu	23
4.2 Ruiskutusventtiili	24
4.3 Jakoputki.....	27
4.4 Paineenhallinta.....	28
5 TILAVUUSVIRRAN MITTAAMINEN	30
5.1 Boschin menetelmä.....	30
5.2 Zeuchin menetelmä.....	32
5.3 Liikemäärävuohon perustuva menetelmä	33
6 AIEMPIÄ TUTKIMUSTULOKSIA.....	35
6.1 Cederberg & Björk.....	35
6.2 Emberson	35
6.3 Ranta	37
6.4 Payri, Garcia, Salvador & Gimeno	39

7	SUUNNITTELU	40
7.1	Pöytä	40
7.2	Sähkömoottori.....	41
7.3	Voima-anturi.....	44
7.4	Jakoputket	46
7.5	Ruiskutusventtiili	48
7.6	Painekammio	51
7.7	Massavirran mittaaminen.....	55
8	POHDINTA.....	57
9	JOHTOPÄÄTÖKSET	58
10	YHTEENVETO	60
	LÄHDELUETTELO	61

KUVAT

Kuva 1. Polttoainesuihkun hajoaminen (McAllister, Chen & Fernandes-Pello (2011: 156).	14
Kuva 2. Virtaus suutinreiässä (Payri ym. 2004).	18
Kuva 3. Polttoainevirran tiheys- ja nopeusprofiilit suutinreiän ulostulossa (Payri ym. 2004).	19
Kuva 4. Kavitaatioluvun vaikutus purkautumiskertoimeen (Payri ym. 2004).	20
Kuva 5. Reynoldsin luvun vaikutus purkautumiskertoimeen (Payri ym. 2003).	21
Kuva 6. Yhteispaineruiskutusjärjestelmän korkeapaineekomponentit (Fromm 2013).	22
Kuva 7. Radiaalipumpun rakenne (Diesel-Engine Management 2005: 289).	24
Kuva 8. Solenoidiohjatun ruiskutusventtiilin rakenne (Diesel-Engine Management 2005: 278).	26
Kuva 9. Pietso-ohjatun ruiskutusventtiilin rakenne (Diesel-Engine Management 2005: 284).	27
Kuva 10. Jakoputken rakenne (Diesel-Engine Management 2005: 294).	28
Kuva 11. Boschin menetelmän laitteisto (Vass & Németh 2013: 78).	31
Kuva 12. Zeuchin menetelmän laitteisto (Vass & Németh 2013: 78).	33
Kuva 13. Voiman mittaaminen (Payri 2004).	34
Kuva 14. Tutkimuskammio (Emberson 2015: 75).	36
Kuva 15. Mittauskammio (Ranta 2010).	38
Kuva 16. Pöytä.	41
Kuva 17. Korkeapainepumppu CP4-20.	42
Kuva 18. Voima-anturi 9215 (Kistler 2013).	45
Kuva 19. Polttoainesuihkun osuminen voima-anturin levyyn.	46
Kuva 20. Jakoputki.	47
Kuva 21. Ruiskutusventtiilin sivusyöttöputki.	47
Kuva 22. Ruiskutusventtiili CRIN-20.	48
Kuva 23. Ruiskutusventtiilin piirroskuva (Klemt 2016).	49

Kuva 24. Paineammio.	51
Kuva 25. Adapteri ruiskutusventtiilille.	52
Kuva 26. Voima-anturin asennus.	53
Kuva 27. Paineenrajoitusventtiili R-sarja (Parker 2015).	54
Kuva 28. Takapaineenalennin (Swagelok 2013: 30).	55

SYMBOLIT

a	Äänen nopeus nesteessä
A	Putken poikkipinta-ala
A_o	Suutinreiän pinta-ala
C_c	Sisäinen aukkosuhde
C_d	Purkautumiskerroin
D_o	Suutinreiän halkaisija ulostulossa
k	Kokoonpuristumiskerroin
K	Nurickin kavitaatioluku
m_f	Polttoaineen massa
\dot{m}	Massavirta
\dot{M}	Liikemäärävuoto
η_p	Pumpun hyötysuhde
P	Paine
P_b	Vastapaine
P_{chamb}	Kammion paine
P_i	Ruiskutusaineen paine
P_v	Polttoaineen höyrynpaine
Q	Tilavuusvirta
Re	Reynoldsin luku
ρ	Nesteen tiheys
ρ_f	Polttoaineen tiheys
t	Aika
u	Virtausnopeus
u_{eff}	Tehollinen nopeus
u_o	Virtausnopeus suutinreiän ulostulossa
u_{th}	Polttoainesuihkun teoreettinen nopeus

V	Tilavuus
V_{chamb}	Kammion tilavuus
ν	Polttoaineen kinemaattinen viskositeetti
\dot{W}_{input}	Teho
Δp	Paine-ero
Δp_p	Pumpun paine-ero

VAASAN YLIOPISTO**Teknillinen tiedekunta**

Tekijä:	Pekka Isola
Diplomityön nimi:	Ruiskutuksen mittauspenkin suunnittelu
Valvoja:	Seppo Niemi
Ohjaaja:	Jukka Kiijärvi
Tutkinto:	Diplomi-insinööri
Koulutusohjelma:	Sähkö- ja energiatekniikan koulutusohjelma
Suunta:	Energiatekniikka
Opintojen aloitusvuosi:	2013
Diplomityön valmistumisvuosi:	2017

Sivumäärä: 63

TIIVISTELMÄ

Polttoaineen ruiskutus vaikuttaa merkittävästi puristussytytteisen polttomoottorin palamiseen. Tämän vuoksi moottorin hyötysuhde, teho ja päästöt riippuvat ruiskutuksesta. Ruiskutuksessa polttoainesuihku hajoaa pisaroiksi kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa suihku hajoaa turbulentin virtauksen ja kavitoinnin seurauksena. Toisessa vaiheessa suihku hajoaa aerodynaamisten voimien vaikutuksesta.

Tämän diplomityön tavoitteena oli suunnitella ruiskutustutkimuksessa käytettävä mittauspenkki. Ruiskutus on jatkuvaa virtausta ruiskutusventtiilin yhden suutinreiän kautta. Mitattavia asioita ovat massavirta ja polttoainesuihkun aiheuttama voima. Työ oli osa Tekesin rahoittamaa FLEX^c-ohjelmaa, joka oli käynnissä vuosina 2015 ja 2016.

Teoriaosuudessa esiteltiin ruiskutuksen teoriaa ja ruiskutuksen vaikutusta päästöihin. Virtauksesta ruiskutusventtiilin reiässä kerrottiin lyhyesti. Kolme tilavuusvirran mittaamisen menetelmää esiteltiin. Tutkimuslaitteistossa käytettävän ruiskutusjärjestelmän pääkomponentit esiteltiin. Aiempia tutkimustuloksia käytiin läpi.

Suunnitteluosuudessa mitoitettiin ja valittiin sopiva voima-anturi. Korkeapainepumppua käyttävän sähkömoottorin teho laskettiin. Ruiskutusventtiiliin ja suutinkärkeen tehtiin muutoksia, jotta polttoainevirtaus saadaan jatkuvaksi. Paineastia suunniteltiin pintapuolisesti. Sen päärakenne ja varustelu selviävät diplomityöstä. Mittauslaitteistossa polttoaine ruiskutetaan paineastiaan, joka paineistettu typpikaasulla. Typpeä käytetään, jotta polttoaine ei syty.

AVAINSANAT: Polttoaineen ruiskutus, ruiskutusjärjestelmä, mittauspenkki, suunnittelu, puristussytytteinen polttomoottori

UNIVERSITY OF VAASA**Faculty of technology**

Author: Pekka Isola
Topic of the Thesis: Design of injection test rig
Supervisor: Seppo Niemi
Instructor: Jukka Kijärvi
Degree: Master of Science in Technology
Degree Programme: Degree Programme in Electrical and Energy Engineering
Major: Energy Engineering
Year of Entering the University: 2013
Year of Completing the Thesis: 2017 **Pages:** 63

ABSTRACT

Fuel injection has significant effect on combustion of the compression ignition engine. As a result, efficiency, power and emissions of the engine depend on fuel injection. Fuel spray breaks into droplets in two stages. In the first stage the fuel spray breaks as a result of turbulent flow and cavitation. In the second stage the fuel spray is affected by aerodynamic forces.

The aim of this thesis was to design fuel injection test rig. Injection is a continuous flow through single-hole injector nozzle. The measured variables are the mass flow rate of the fuel and the force caused by the fuel spray. The thesis was part of FLEX^c-program. The program was funded by Tekes and it was running between 2015 and 2016.

Fuel injection and the fuel injection effect on emissions were presented in theoretical part. Flow in the injector nozzle hole was described briefly. Three volume flow measurement methods were presented. The main components of the common-rail injection system were reviewed.

In the design part the suitable force sensor was dimensioned and selected. Power of the electric motor was calculated. The electric motor runs a high pressure pump. The injector and the nozzle-tip were modified because fuel flow has to be continuous. The pressure vessel was designed roughly. Fuel is injected into the pressure vessel. The vessel is pressurised with nitrogen gas. Nitrogen is used because the fuel is not allowed to ignite.

KEYWORDS: Fuel injection, common-rail, test rig, design, compression ignition engine

1 JOHDANTO

Polttoaineen ruiskutuksella voidaan vaikuttaa merkittävästi puristus- ja sytytyksen moottorin tehoon, päästöihin ja hyötysuhteeseen. Viime vuosina on ollut nähtävissä, että siirrytään koko ajan korkeampiin ruiskutuspaineesiin. Sama kehitys tulee jatkumaan myös tulevaisuudessa. Tällä hetkellä kaupallisessa käytössä olevien ruiskutusjärjestelmien korkeimmat ruiskutuspainet ovat 2600 bar. Laboratorio-olosuhteissa on testattu jopa 3000 bar paineita. Mitä korkeampi ruiskutuspainet on sitä paremmin polttoainesuihku hajoaa.

Diplomityö oli osa Tekesin rahoittamaan FLEX^e-ohjelmaa, joka oli käynnissä vuosina 2015 ja 2016. Diplomityön tavoitteena oli suunnitella mittauspenkki, jolla voidaan mitata polttoaineen ruiskutusta jatkuvana virtauksena ruiskutusventtiilin yhden suutinreiän läpi. Polttoainesuihkusta pitää pystyä mittaamaan suihkun aiheuttama voima, sekä polttoaineen massavirta. AGCO Power toimitti ruiskutusjärjestelmän. Mittauspenkki sisältää painekammion, joka paineistetaan tyypellä 100 bar paineeseen. Paineistukseen käytetään typpeä, jotta polttoaine ei syty.

Ranta (2010) suunnitteli diplomityössään ruiskutustutkimuksessa käytettävän painekammion, jonka voi paineistaa 100 bar paineeseen. Kammiossa on kolme ikkunaa, joista näkee kammioon sisälle. Kammiota on käytetty esimerkiksi polttoainesuihkun kuvaamiseen. Cederberg ja Björk (2010) rakensivat diplomityössään mittauslaitteiston, jossa polttoaine ruiskutettiin normaaliin ilmanpaineeseen. He tutkivat onko polttoainesuihkun aiheuttaman voiman mittaamisessa käytettävän levyn muotoilulla vaikutusta mittaustuloksiin. Voima mitattiin paineanturilla, joka oli muutettu tähän tarkoitukseen.

Payri, Garcia, Salvador ja Gimeno (2004) selvittivät tutkimuksessaan suutinreiän muotoilun vaikutusta polttoainesuihkun aiheuttamaan voimaan. Vertailtavina olivat sylinterimäinen ja kartiomainen suutinreikä. Mittaus tehtiin kammiossa, joka voidaan paineistaa tyypellä 100 bar paineeseen. Ruiskutuspainet olivat alle 1300 bar. Voiman mitattiin muunnetulla paineanturilla. Emberson (2015) käytti väitöstutkimuksessaan voiman mit-

taamiseen voima-anturia. Mittaukset tehtiin painekammiossa, jossa paineet olivat 20 ja 30 bar. Ruiskutusaineet olivat suurimmillaan 1000 bar.

Diplomityön toisessa luvussa esitellään ruiskutusta ja ruiskutuksen vaikutus syttymisjättämään sekä päästöihin. Kolmannessa luvussa käsitellään virtausta suutinreiässä teoreettisella tasolla. Neljännessä luvussa esitellään ruiskutusjärjestelmän korkeapainepuolen pääkomponentit ja niiden toimintaperiaatteet. Luvussa viisi esitellään kolme tilavuusvirran mittaamenetelmää, jotka ovat Boschin menetelmä, Zeuchin menetelmä ja liikemäärävuohon perustuva menetelmä. Kuudennessa luvussa esitellään aiempia tutkimustuloksia.

Luvussa seitsemän käydään läpi mittauspenkin suunnittelu vaihe vaiheelta. Kerrotaan millaiselle pöydälle laitteisto kannattaa rakentaa. Apua saatiin Wärtsilästä, joka käyttää laboratoriossaan samanlaista pöytää. Lasketaan korkeapainepumpun tarvitsema teho sekä valitaan sähkömoottori ja taajuusmuuttaja. Mitoitetaan ja valitaan voima-anturi. Esitellään vaihtoehtoja jakoputkien asentamisesta. Ruiskutusventtiiliin ja suutinkärkeen tehtäviä muutoksia käydään läpi. Paineekammion mitoitus ja varustelu esitellään. Polttoaineen massavirran mittaamisen käytettävä järjestelmä esitellään.

2 RUISKUTUS

Tässä luvussa esitellään polttoainesuihkun hajoamiseen vaikuttavia tekijöitä sekä ruiskutuksen vaikutusta syttymisjättämään ja päästöihin.

2.1 Polttoainesuihkun liike-energia

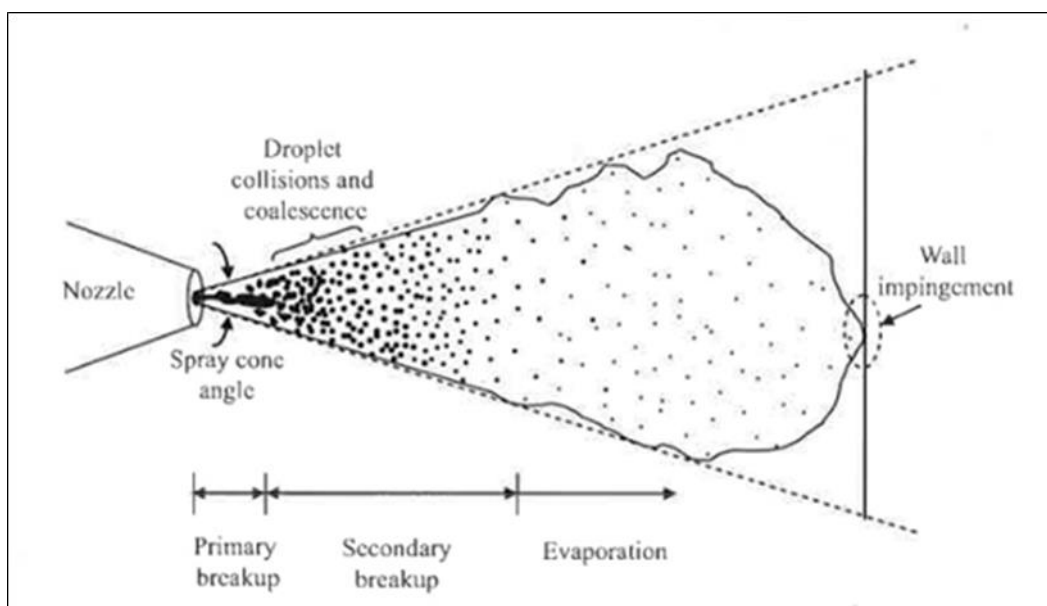
Polttoainesuihkun liike-energia on hallitseva parametri ilma-polttoaineseoksen muodostumisessa. Polttoaineen määrä suihkussa, painegradientti ruiskutusventtiilin reiässä ja suihkun kartiokulma vaikuttavat liike-energiaan. Liikemäärän vaihtelu sylinterin palotilan ilman ja polttoainesuihkun välillä sekä pisarakokojakauma riippuu edellä mainituista tekijöistä. Virtaus suuttimessa, paine-ero ja ilman tiheys vaikuttavat polttoainesuihkun kartiokulmaan. Kavitaation lisääntyminen suuttimen reiässä kasvattaa suihkun kartiokulmaa sekä suurentaa liikemäärän vaihtelua ilman ja suihkun välillä. Jakajaputken paine on kriittinen parametri yhteispaineruiskutusjärjestelmissä. (Binder 2010: 64.)

Jotta polttoainesuihku ulottuu palotilan uloimmille alueille, tulee ruiskutuspaineen olla suuri. Ruiskutuspainee on pidettävä lähes vakiona tai mieluiten nousevana. Mikäli paine alenee ruiskutuksen aikana, ei tapahdu vuorovaikutusta suihkussa olevien polttoainevyöhykkeiden välillä. Siksi tällaista tilannetta on vältettävä. Polttoainetta on saatava palotilan uloimmille alueille, jotta siellä sijaitseva ilma saadaan hyödynnettyä palamisessa. Tämä voidaan saavuttaa vain tietyllä määrällä suutinreikiä, kun paine on rajattu. Suurella paineella kyetään lisäämään reikien lukumäärää. Tämä parantaa polttoainekaumaa palotilassa ilman, että haitataan suihkun etenemistä. (Binder 2010: 64.)

2.2 Suihkun hajoaminen

Suoraruiskutuksessa polttoaine höyrystyy ja ilma-polttoaineseos muodostuu muutamassa millisekunnissa. Suihku hajoaa ja pisarat muodostuvat kahdessa vaiheessa (kuva 1).

Ensimmäisessä vaiheessa (primary breakup) suihku hajoaa heti suuttimen jälkeen suuttimen turbulentin virtauksen ja kavitoinnin seurauksena. Toisessa vaiheessa (secondary breakup) suihku hajoaa aerodynaamisten voimien vaikutuksesta. (Binder 2010: 64–65.)



Kuva 1. Polttoainesuihkun hajoaminen (McAllister, Chen & Fernandes-Pello (2011: 156).

Polttoaine ruiskutetaan palotilaan, jossa ilman paine on korkea. Näin ollen ilman viskositeetti on suuri. Ilma joutuu tekemisiin polttoainesuihkun kanssa, jonka hajoamiseen vaikuttavat suihkun nopeusprofiilin uudelleenjakautuminen, pintajännitys, turbulenssi ja kavitaatio. Reiästä poistuvat kavitaatiokuplat vaikuttavat suihkun hajoamiseen ja etenemiseen, pisaroiden muodostumiseen, suuttimen kestävyteen sekä epäpuhtauksien kertyvyyteen. Polttoaineen koostumus sekä lämpötila vaikuttavat haihtuvuuteen ja näin ollen suihkun hajoamiseen. (Binder 2010: 65.)

Toisessa vaiheessa suihku hajoaa aaltomaisesti karkeista jänteistä keskikokoisiksi pisaroiksi. Tämän jälkeen keskikokoiset pisarat hajoavat pieniksi pisaroiksi. Aerodynaamisilla voimilla on suuri vaikutus pisaroiden syntymiseen. Lisäksi pisaroiden muodostuminen riippuu ruiskutuspaineen suuruudesta, ruiskutuspainekäyrän muodosta, suihkun

kartiokulmasta ja palamisilman tiheydestä. Pienien pisaroiden muodostuminen on tärkeää, jotta polttoaine lämpenee ja höyrystyy nopeasti sekä fysikaalinen syttymisjättämä jää lyhyeksi. Suihkun liike-energia riippuu ruiskutuspainesta. Suihkun liike-energia puolestaan vaikuttaa lämmönsiirtoon polttoainepisaroiden palamisilman välillä. Korkea suhteellinen nopeus pisaroiden ja ympäristön välillä helpottaa aineen- ja lämmönsiirtoa sekä pisaroiden erottumista. Mitä pienempiä pisarat ovat ja mitä suurempi suhteellinen nopeus on sitä nopeammin höyrystyminen tapahtuu. (Binder 2010: 65–66.)

2.3 Syttymisjättämä

Syttymisjättämällä tarkoitetaan aikaa, joka kuluu ruiskutuksen aloittamisesta syttymisen alkamiseen. Jättämä ilmoitetaan joko aikana tai kammengkulma-asteina. Syttymisjättämä jaetaan fysikaaliseen ja kemialliseen komponenttiin. Fysikaalinen osa sisältää polttoainesuihkun hajoamisen ja höyrystymisen. Kemiallinen komponentti tarkoittaa aikaa, joka kuluu kemiallisiin reaktioihin ennen polttoaine-ilmaseoksen syttymistä. Syttymisjättämällä on merkittävä vaikutus hyötysuhteeseen, päästöihin, meluun ja moottorin osien kuormitukseen. Moderneilla turboahdetuilla dieselmootoreilla ruiskutuspaineen ollessa 2000 bar syttymisjättämä on 0,3–0,8 millisekuntia. (Binder 2010: 66–67.)

Ruiskutuksen ajoitus vaikuttaa syttymisjättämään. Lyhyin jättämä saavutetaan, kun polttoaineen ruiskutus aloitetaan 10–15 kammengkulma-astetta ennen yläkuolokohtaa. Aikainen tai myöhäinen ruiskutus kasvattavat syttymisjättämää, koska palamisilman lämpötila ja paine muuttuvat merkittävästi lähellä yläkuolokohtaa. Aikaisessa ruiskutuksessa ilman paine ja lämpötila ovat alhaisia, joten jättämä kasvaa. Myöhäisessä ruiskutuksessa paine ja lämpötila ovat hieman korkeammat kuin aikaisessa. Sekä lämpötila että paine laskee ennen syttymistä. Siksi myöhäisessä ruiskutuksessa syttymisjättämä kasvaa. Moottorin kuormitus vaikuttaa syttymisjättämään: mitä suurempi kuorma sitä lyhyempi jättämä. Kun kuorma suurenee, nousee sylinterin seinän ja jäännöskaasun lämpötila. Tämä johtaa ilma-polttoaineseoksen lämpötilan kasvamiseen.. (Heywood 1988: 546.)

Idealisessa tilanteessa palaminen tapahtuu yläkuolokohdassa, mutta käytännössä palaminen alkaa ennen yläkuolokohtaa ja jatkuu yläkuolokohdan jälkeen. Aikainen polttoaineen ruiskutus kasvattaa puristustahdin vaatimaa työtä. Toisaalta aikainen ruiskutus nostaa lämpötilaa ja painetta yläkuolokohdassa, jolloin työtahdin tekemä työ suurenee. Jos ruiskutus tapahtuu liian aikaisin, kasvaa puristustahdin vaatima työ suuremmaksi kuin työtahdin tekemä työ. Myöhäisessä ruiskutuksessa typen oksidipäästöt vähenevät, mutta polttoaineen kulutus kasvaa. Nopea ruiskutus nopeuttaa palamista. (Stone 1999: 259.)

Ruiskutetun polttoaineen määrällä ei ole merkittävää vaikutusta syttymisjättämään normaaleissa käyttöolosuhteissa. Kylmäkäynnistyksessä suuri ruiskutusmäärä kasvattaa jättämää, koska ilma-polttoaineseos lämpenee hitaasti. Ruiskutuspaineen lisäämisellä on vähäinen vaikutus syttymisjättämään. Kun ruiskutuspainetta pysyy vakiona, suutinreiän halkaisijan kasvattaminen suurentaa ruiskutusannosta ja pisarakokoa. Sitä vastoin syttymisjättämä ei tällöin muutu merkittävästi. Suutintyypillä, suutinreikien lukumäärällä tai reiän geometrialla ei ole mainittavaa vaikutusta jättämään. (Heywood 1988: 546–547.)

2.4 Ruiskutuksen vaikutus hiilivetyypäästöihin

Dieselmoottorin hiilivetyypäästöt koostuvat joko hajonneista polttoainemolekyyleistä tai uudelleen yhdistyneistä välituotteista. Kun ilma-polttoaineseos on liian rikas tai laiha, syntyvät hiilivetyypäästöt. Ruiskutuksen lopussa muodostuu suuria polttoainepisaroita, jotka lisäävät hiilivetyypäästöä. Ruiskutus syttymisjättämän aikana tuottaa ilma-polttoaineseoksen, jossa ilmakerroin vaihtelee: osa seoksesta on stökiometrinen ja valmis syttymään kun taas osa on liian laiha tai liian rikas. Palaminen jatkuu kunnes paikallinen ilma-polttoainesuhde laskee nopeasti ylisekoittumisen takia tai sammuu lämpötilarajakerrokseen. Liian laiha seos voi liittyä palamiseen, jos siihen sekoittuu riittävästi höyrystynyttä polttoainetta. Ruiskutuksen loppuvaiheen isot pisarat tarvitsevat syttyäkseen laihaan seoksen tai lisäilmaa ja korkean lämpötilan höyrystymiseen. Kaiken tämän

on tapahduttava nopeasti, jotta suurin osa polttoaineesta palaa ennen työtahdin merkittävää paineen alenemista ja jäähtymistä. Muutoin pakokaasussa on liikaa palamattomia hiilivetyjä. Syttymisen jälkeen ruiskutettu polttoaine palaa täydellisesti. Jos palaminen häiriintyy eli pyrolyysi ja hapettuminen hidastuvat, palamattomien hiilivetyjen päästöt kasvavat. (Majewski 2006: 105–106.)

Tavallisesti polttoaineen jälkiruiskutus lisää hiilivetypäästöjä. Tällöin polttoaine ruiskutetaan työtahdin aikana, jolloin lämpötila laskee ja polttoaine höyrystyy hitaasti. Pakokaasujen jälkikäsitteilylaitteet vaativat toimiakseen jälkiruiskutuksia saavuttaakseen halutun toimintalämpötilan. Vaikka ajoitus ja ruiskutettavan polttoaineen määrä suunnitellaan tarkasti, voivat hiilivety-, häkä-, ja pienhiukkaspäästöt kasvaa. (Majewski 2006: 107.)

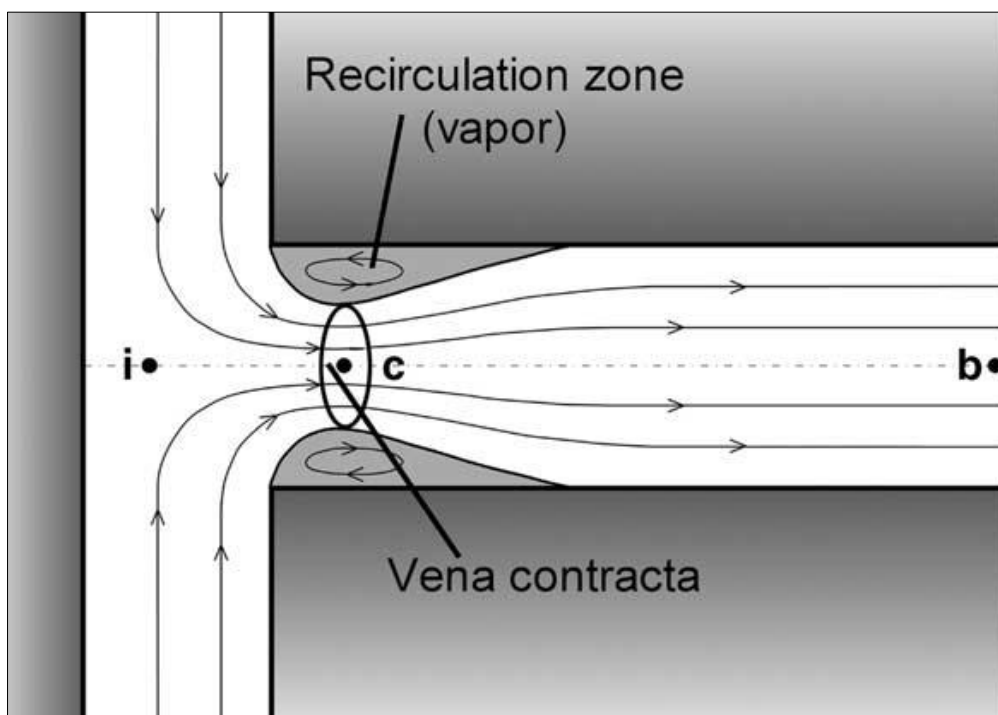
Suutinreiän suunnittelulla (halkaisija, pituus ja muoto) kyetään vaikuttamaan hiilivetypäästöihin. Suutinkärjen kärkisäiliön tilavuudella on merkittävä vaikutus hiilivetypäästöihin. Tällä tarkoitetaan tilavuutta, joka jää suutinneulan kärjen ja suutinreikien väliin. Mitä pienempi kärkisäiliö on sitä pienemmät hiilivetypäästöt saavutetaan. Kärkisäiliöön jäänyt polttoaine vuotaa palotilaan palamisen ja ruiskutuksen päätyttyä, minkä vuoksi polttoaine ei sumutu. (Majewski 2006: 109.)

2.5 Typen oksidipäästöt

Korkea palamislämpötila aiheuttaa suuret typen oksidipäästöt. Jos polttoaineen ruiskutusta aikaistetaan, kasvaa syttymisjättämä. Aikaisessa ruiskutuksessa paine ja lämpötila sylinterissä on alhainen. Kun syttymisjättämä pitenee, kasvaa esisekoittuneen polttoaineen määrä. Tämän palaminen johtaa korkeisiin typen oksidien päästöihin. Jos ruiskutus tehdään myöhään, tapahtuu päinvastainen reaktio: syttymisjättämä lyhenee ja esisekoittuneen polttoaineen määrä pienenee. Myöhäisellä ruiskutuksella voidaan kontrolloida tehokkaasti typen oksidipäästöjä. Haittana on kasvanut polttoaineenkulutus. (Majewski 2006: 111.)

3 VIRTAUS RUISKUTUSVENTTIILIN REIÄSSÄ

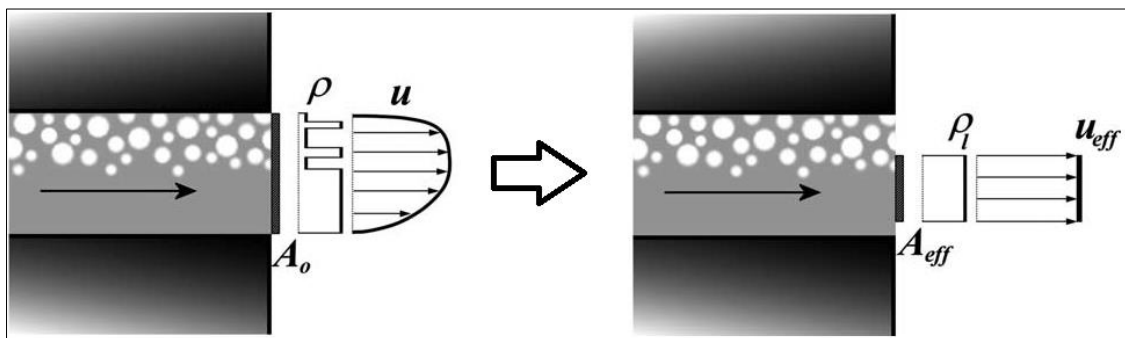
Suuttimen reiän sisäänvirtauksessa polttoaineen virtaus irtoaa seinästä (kuva 2). Tällöin virtaukseen muodostuu kohta, jossa virtauksen poikkipinta-ala on pienin. Kohtaa nimitetään vena contracta:ksi. Tämä pinta-ala on pienempi kuin reiän geometrinen poikkipinta-ala. Kun polttoaine virtaa suutinreikään, kasvaa virtausnopeus. Virtausnopeus on suurimmillaan pienimmän virtauspinta-alan kohdalla. Tässä kohdassa paine on alhaisimmillaan. Jos paine alittaa polttoaineen höyrynpaineen, alkaa virtaus kavitoida. Polttoainevirran ja seinämän väliin jää vyöhyke, jossa kavitaatiokuplat syntyvät. (Payri, García, Salvador & Gimeno 2004.)



Kuva 2. Virtaus suutinreiässä (Payri ym. 2004).

Kuvassa 3 vasemmalla on esitetty polttoainevirran tiheys- ja nopeusprofiilit, jotka ovat suutinreiän ulostulossa satunnaisia kavitoinnin takia. Kuvassa 3 oikealla esitystä on yk-

sinkertaistettu niin, että kaikki neste virtaa tehollisen pinta-alan läpi. Tehollinen pinta-ala on pienempi kuin suutinreiän todellinen poikkipinta-ala. (Payri ym. 2004.)



Kuva 3. Polttoainevirran tiheys- ja nopeusprofiilit suutinreiän ulostulossa (Payri ym. 2004).

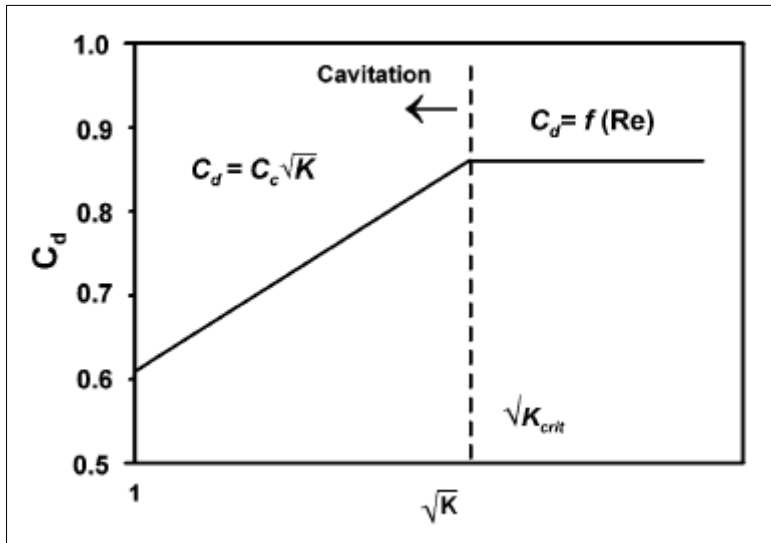
Kavitointia ennustetaan kavitaatioluvulla, joka on dimensioton parametri. Luku suurenee, kun ruiskutusaineen paine pienenee tai vastapaine kasvaa. Kun kavitaatioluku suurenee, saavutetaan kriittinen luku, jonka jälkeen kavitointia ei enää tapahdu (kuva 4). Kriittistä lukua suuremmilla arvoilla purkautumiskerroin oletetaan vakioksi. Virtaus on ainoastaan nestemäisessä muodossa, ja purkautumiskerroin riippuu Reynoldsin luvusta. Koska Nurick on johtanut yhtälön tähän tapaukseen sopivalle kavitaatioluvulle, kutsutaan kavitaatiolukua Nurickin kavitaatioluvuksi. Nurickin kavitaatioluku K lasketaan yhtälöllä

$$K = \frac{P_i - P_v}{P_i - P_b}, \quad (1)$$

jossa P_i on ruiskutusaineen paine, P_v polttoaineen höyrynpaine ja P_b vastapaine. Purkautumiskerroin C_d lasketaan kavitaatioluvun avulla lausekkeella

$$C_d = C_c \sqrt{K}, \quad (2)$$

jossa C_c on sisäinen aukkosuhde. (Payri ym. 2004.)



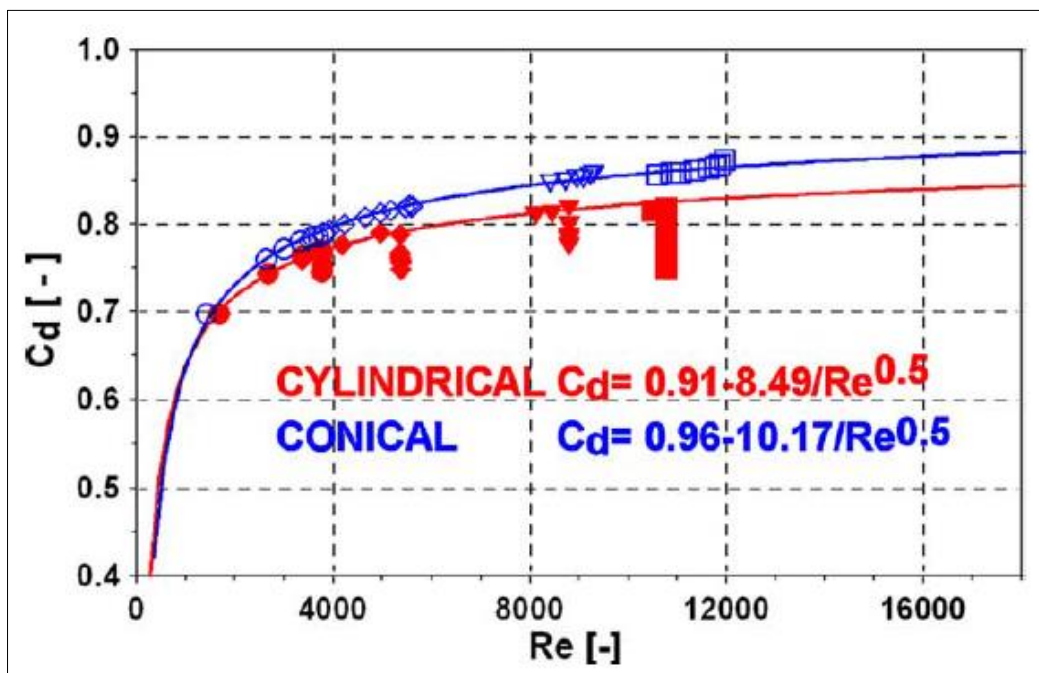
Kuva 4. Kavitaatioluvun vaikutus purkautumiskertoimeen (Payri ym. 2004).

Reynoldsin luku Re lasketaan yhtälöllä

$$Re = \frac{D_o u_o}{\nu}, \quad (3)$$

jossa D_o tarkoittaa suutinreiän halkaisijaa ulostulossa, u_o virtausnopeutta suutinreiän ulostulossa ja ν polttoaineen kinemaattista viskositeettia (Payri, Bermúdes, Payri & Salvador 2003).

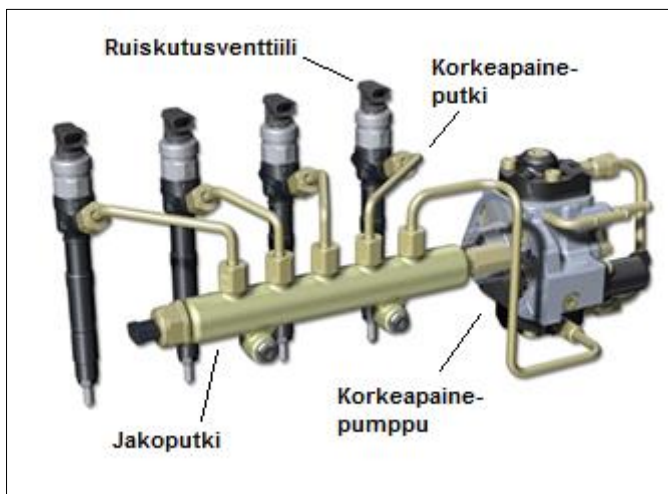
Kun purkautumiskerroin on riippuvainen Reynoldsin luvusta, voidaan virtaus olettaa laminaariksi. Virtaus on turbulenttinen, kun purkautumiskerroin muuttuu vakioksi Reynoldsin luvun kasvaessa. Kuvassa 5 on esitetty Reynoldsin luvun vaikutus purkautumiskertoimeen kahdella eri suutinreiän muotoilulla. Kartiomaisen suutinreiän purkautumiskerroin on suurempi kuin sylinterimäisen, koska kartiomainen muotoilu pienentää virtaushäviöitä. (Payri ym. 2003.)



Kuva 5. Reynoldsin luvun vaikutus purkautumiskertoimeen (Payri ym. 2003).

4 YHTEISPAINERUIKUTUSJÄRJESTELMÄ

Yhteispaineruiskutusjärjestelmä on pitkälle kehitetty ruiskutusjärjestelmä, jossa on mahdollista valita ruiskutusaine ja -hetki lähes vapaasti. Tämän mahdollistavat toisistaan riippumattomat paineen tuotto ja ruiskutus. Järjestelmä koostuu kolmesta pääryhmästä: matalapainepiiri, korkeapainepiiri ja elektroninen ohjausjärjestelmä. Korkeapainepumppu, jakoputki, korkeapaineputket ja ruiskutussuuttimet muodostavat korkeapainepiirin (kuva 6). Ruiskutusventtiilin neulaa ohjataan joko solenoidilla tai pietsoelementillä. Ruiskutus voidaan säätää sylinterikohtaisesti. Moduulimainen rakenne mahdollistaa järjestelmän asentamisen eri moottoreihin. (Dieselmoottorin ohjausjärjestelmät 2010: 86–88.)



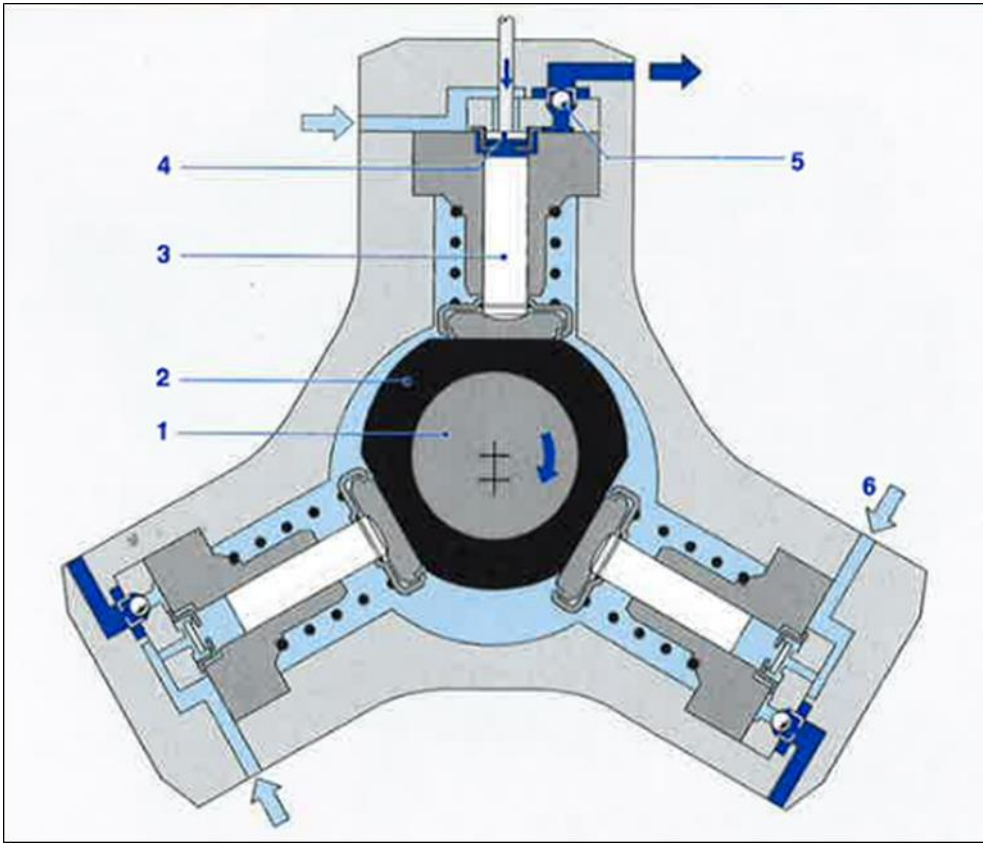
Kuva 6. Yhteispaineruiskutusjärjestelmän korkeapainekomponentit (Fromm 2013).

Henkilöautojärjestelmissä jakoputken painetta säädetään korkeapainepuolella olevalla paineensäätöventtiilillä, joka sijaitsee yleensä jakoputkessa tai joissakin tapauksissa korkeapainepumpussa. Polttoaine, jota ei ruiskuteta, palaa takaisin matalapainepiiriin. Säättötapo mahdollistaa paineen nopean muutoksen, kun esimerkiksi moottorin kuormitus kasvaa. Toinen vaihtoehto paineen säätämiseen on käyttää korkeapainepumppuun asennettua täytössäätöventtiiliä, joka päästää jakoputkeen vain sen verran polttoainetta,

että haluttu ruiskutusaine saavutetaan. Täytössäädön etuja ovat pienempi pumpun otama teho ja paluupiirin kautta tulevan polttoaineen alhaisempi lämpötila. Kahden säätimen järjestelmässä molemmat säätömenetelmät on yhdistetty. (Dieselmoottorin ohjausjärjestelmät 2010: 88–89.)

4.1 Korkeapainepumppu

Korkeapainepumpun tehtävänä on pumpata riittävästi polttoainetta kaikissa käyttöolosuhteissa koko moottorin käyttöä. Käynnistysvaiheessa pumpun on tuotettava riittävä paine nopeasti jakoputkeen. Radiaalimäntäpumppuja käytetään henkilöautoissa. Hyötyajoneuvoissa käytetään sekä radiaali- että rivimäntäpumppuja. Kuvassa 7 on esitetty kolmemäntäisen radiaalipumpun rakenne. (Diesel-Engine Management 2005: 288.)



Kuva 7. Radiaalipumpun rakenne: 1 käyttöakseli, 2 nokka, 3 pumppuelementti ja mäntä, 4 imuventtiili, 5 poistoventtiili ja 6 polttoaineen sisääntulo (Diesel-Engine Management 2005: 289).

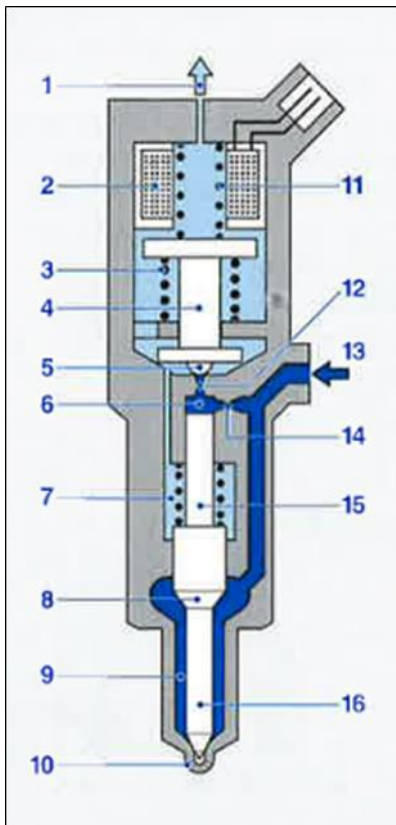
Pumppu saa käyttövoimansa moottorista kytkimen, vaihdepyörän, ketjun tai hammas-hihnan välityksellä, joten pumpun pyörimisnopeus riippuu moottorin pyörimisnopeudesta. Henkilöautokäytössä olevat pumput saavat voitelunsa polttoaineesta. Hyötyajoneuvoissa käytetään joko polttoaine- tai öljyvoideltuja pumppuja. Öljyvoitelu parantaa kestävyyttä, jos polttoaineen laatu on huono. (Diesel-Engine Management 2005: 288.)

4.2 Ruiskutusventtiili

Henkilö- ja hyötyajoneuvoissa käytettävät ruiskutusventtiilit ovat toimintaperiaatteiltaan samanlaisia. Ruiskutusventtiilin pääosat ovat runko, suutinkärki, ohjausventtiili, ohjauskammio. Ohjausventtiiliä ohjataan solenoidilla tai pietsoelementillä. Pietsoelementin

etuja ovat suuri ohjausvoima ja lyhyt kytkentäaika. Ruiskutusventtiilit kytketään jakoputkeen lyhyillä korkeapaineputkilla. Sylinterinkanteen ruiskutusventtiilit asennetaan kiinnityselementeillä ja tiivisteinä käytetään kuparitiivisteitä. (Egler, Giersch, Boecking, Hammer, Hlousek, Mattes, Projahn, Urner & Janetzky 2010: 156.)

Kuvassa 8 on esitetty solenoidiohjatun ruiskutusventtiilin rakenne. Ruiskutusventtiilin toiminta voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen: kiinni, avautuminen, auki ja sulkeutuminen. Kiinni-tilassa solenoidi on jännitteettömänä ja jousi pitää esiohjausventtiilin suljettuna. Ohjauskammiossa ja painekammiossa vallitsee yhtä suuri paine kuin jakoputkessa. Ohjauskammion paine ja neulan jousen voima pitävät suutinneulan suljettuna. Kun solenoidiin tuodaan ohjausjännite, esiohjausventtiilin kara nousee, polttoaine pääsee virtaamaan ohjauskammioista ja paine siellä laskee. Painekammiossa vaikuttavan paineen aiheuttama voima neulan olakkeeseen on suurempi kuin neulaa sulkevat voimat. Neula avautuu ja ruiskutus alkaa. (Egler ym. 2010: 156–157.)

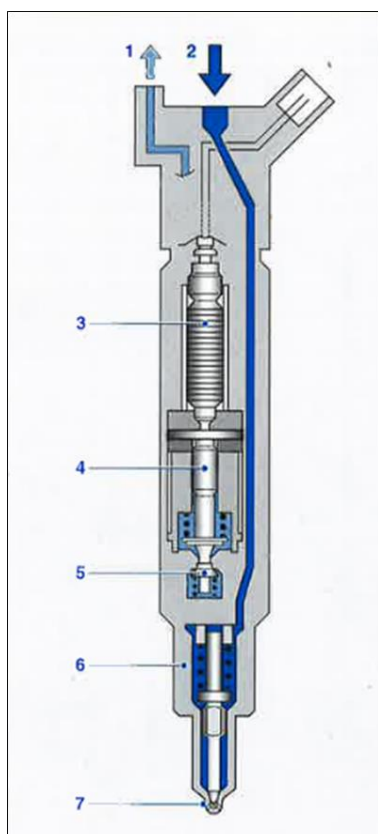


Kuva 8. Solenoidiohjatun ruiskutusventtiilin rakenne: 1 paluuvirtaus, 2 solenoidi, 3 jousi, 4 esiohjausventtiili, 5 kuula, 6 ohjauskammio, 7 neulan jousi, 8 neulan olake, 9 painekammio, 10 suutinreikä, 11 jousi, 12 poistokuristus, 13 tulovirtaus, 14 tulokuristus, 15 ohjausmäntä ja 16 neula (Diesel-Engine Management 2005: 278).

Avautumisnopeuteen vaikuttaa paine-ero ohjaus- ja painekammion välillä. Ohjausmäntä saavuttaa yläasentonsa ja pysyy siinä polttoainevirtauksen avulla. Neula on täysin auki ja paine on lähes sama kuin jakoputkessa. Kun solenoidin ohjausjännite poistetaan, tapahtuu päinvastoin kuin avautumisvaiheessa eli neula sulkeutuu ja ruiskutus loppuu. (Egler ym. 2010: 158.)

Pietso-ohjatun ruiskutusventtiilin rakenne on esitetty kuvassa 9. Tavoitteena on ollut suunnitella rakenne mahdollisimman kestäväksi, kevyeksi ja pienikitkaiseksi. Jättämä ohjausvirran ja neulan liikkeen välillä on lyhyt, noin 150 mikrosekuntia. Pietso-ohjaus mahdollistaa ruiskutusjakson jakamisen jopa seitsemään osaan. Suuttimessa ei ole suo-

raa ohivirtausta korkeapainepuolelta matalapainepuolelle, mikä parantaa koko järjestelmän hydraulista hyötysuhdetta. (Egler ym. 2010: 158–159.)

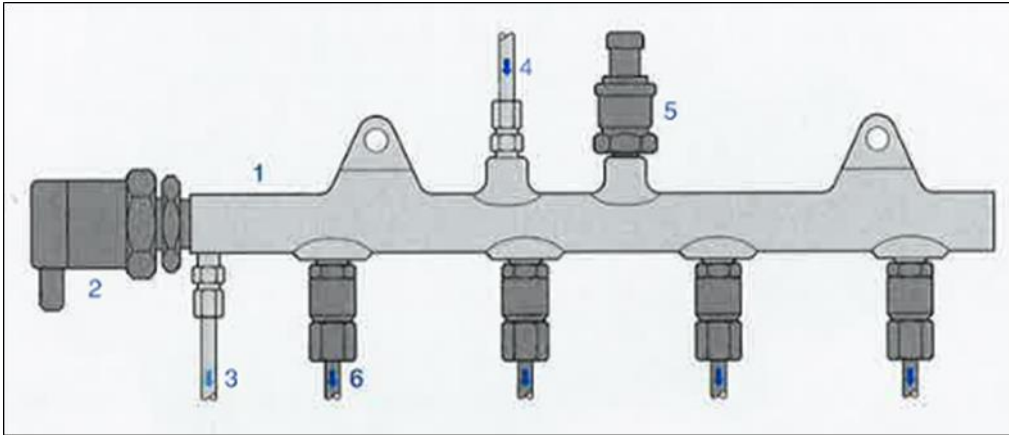


Kuva 9. Pietso-ohjatun ruiskutusventtiilin rakenne: 1 paluuvirtaus, 2 tulovirtaus, 3 pietsoelementti, 4 hydraulinen kytkin, 5 servoventtiili, 6 suutinmoduuli ja 7 suutinreikä (Diesel-Engine Management 2005: 284).

4.3 Jakoputki

Jakoputken tehtävänä on pitää polttoaine korkeassa paineessa ja vaimentaa paineen vaihteluita, joita korkeapainepumppu ja ruiskutus aiheuttavat. Jotta näin tapahtuu, on jakoputken tilavuuden oltava riittävän suuri. Toisaalta tilavuus ei saa olla liian suuri, koska paineen on nouseva riittävän nopeasti moottoria käynnistettäessä. Jakoputki jakaa polttoaineen ruiskutusventtiileille. Kuvassa 10 on esitetty jakoputken perusrakenne.

Todellinen rakenne ja tarvittavat lisälaitteet vaihtelevat moottorikohtaisesti. (Diesel-Engine Management 2005: 294.)



Kuva 10. Jakoputken rakenne: 1 jakoputki, 2 paineensäätöventtiili, 3 paluuputki, 4 syöttöputki, 5 paineanturi ja 6 putki ruiskutussuuttimelle (Diesel-Engine Management 2005: 294).

Korkeapainepumpulta polttoaine virtaa korkeapaineputkea pitkin jakoputkeen, joka jakaa polttoaineen ruiskutusventtiileille. Painetta mitataan paineanturilla. Painetta hallitaan paineensäätöventtiilillä tai vaihtoehtoisesti paineenrajoitusventtiilillä. Jakoputken tilavuus on täytetty polttoaineella, jonka kokoonpuristuvuutta korkeassa paineessa hyödynnetään. Vaikka polttoainetta ruiskutetaan suuri annos, pysyy paine käytännöllisesti katsoen vakiona. (Diesel-Engine Management 2005: 294.)

4.4 Paineenhallinta

Paineensäätöventtiilin tehtävänä on säätää ja pitää paine haluttuna. Se avautuu, kun paine jakoputkessa kasvaa liian suureksi. Silloin osa polttoaineesta palaa takaisin polttoainesäiliöön. Paineensäätöventtiili voidaan asentaa korkeapainepumppuun tai jakoputkeen. Venttiilillä on kaksi säätöpiiriä. Hitaalla sähköisellä piirillä ohjataan muuttuva,

keskimääräinen painetaso jakoputkessa. Nopealla hydromekaanisella piirillä tasapainotetaan korkeataajuisia paineaaltoja. (Diesel-Engine Management 2005: 296.)

Paineensäätöventtiilin pääosat ovat mäntä, jousi, kuula ja solenoidi. Mäntä painaa kuulaa venttiilin istukkaa vasten, mikä säätelee polttoaineen virtaamista korkeapainepuolelta matalapainepuolelle. Mäntä saa voimansa sekä jousesta että solenoidista. Kun solenoidi on virrattomana, jousi sallii paineen, joka on noin 100 bar. Paineen kasvattamiseksi solenoidiin kytketään virta ja venttiili sulkeutuu, kunnes haluttu paine saavutetaan. Solenoidin aiheuttama voima on riippuvainen ohjausvirrasta. (Diesel-Engine Management 2005: 296.)

Paineenrajoitusventtiili rajoittaa painetta jakoputkessa aukaisemalla vuotoreiän, josta polttoainetta pääsee matalapainepuolelle. Venttiili on mekaaninen komponentti, joka rakentuu liikkuvasta männästä ja palautusjousesta. Venttiili asennetaan jakoputken päähän. Normaalitylanteessa jousi painaa mäntää ja venttiili on suljettu. Jos paine jakoputkessa kasvaa liian suureksi, jousivoima ei riitä pitämään mäntää paikallaan ja venttiili avautuu. Polttoaine pääsee virtaamaan venttiilissä matalapainepuolelle ja edelleen polttoainesäiliöön. Tämän seurauksena paine jakoputkessa laskee sallitulle tasolle. (Diesel-Engine Management 2005: 297.)

Täytössäätöventtiilillä, joka on asennettu korkeapainepumppuun, voidaan säätää pumppun imupuolen ottamaa polttoainemäärää. Jakoputkeen syötetään vain sen verran paineistettua polttoainetta kuin on tarpeen. Pumppu tarvitsee vähemmän tehoa ja polttoaineen kulutus pienenee. Etuna on myös paluuvirtauksessa kulkevan polttoaineen alhaisempi lämpötila kuin jakoputkessa tapahtuvassa säädössä. Vikatilanteessa paineenrajoitusventtiili estää paineen nousun yli sallitun. Kahden säätimen järjestelmässä käytetään sekä paineensäätöventtiiliä jakoputkessa että täytössäätöventtiiliä korkeapainepumpussa. Näin voidaan yhdistää molempien säätömenetelmien edut. (Dieselmoottorin ohjausjärjestelmät 2010: 88.)

5 TILAVUUSVIRRRAN MITTAAMINEN

Tässä luvussa esitellään kolme yleistä tutkimusmenetelmää.

5.1 Boschin menetelmä

Boschin menetelmä perustuu ruiskutuksen aikana syntyviin paineaaltoihin. Paineaalto syntyy, kun polttoainetta ruiskutetaan putkeen, joka sisältää kokoonpuristuvaa nestettä. Menetelmä perustuu paine-nopeus-yhtälöön, joka pätee yksittäiselle paineaallolle ajasta riippuvassa virtauksessa. Paine P voidaan laskea yhtälöllä

$$P = a\rho u, \quad (4)$$

missä a on äänen nopeus nesteessä, ρ nesteen tiheys ja u virtausnopeus. (Emberson 2015: 55.)

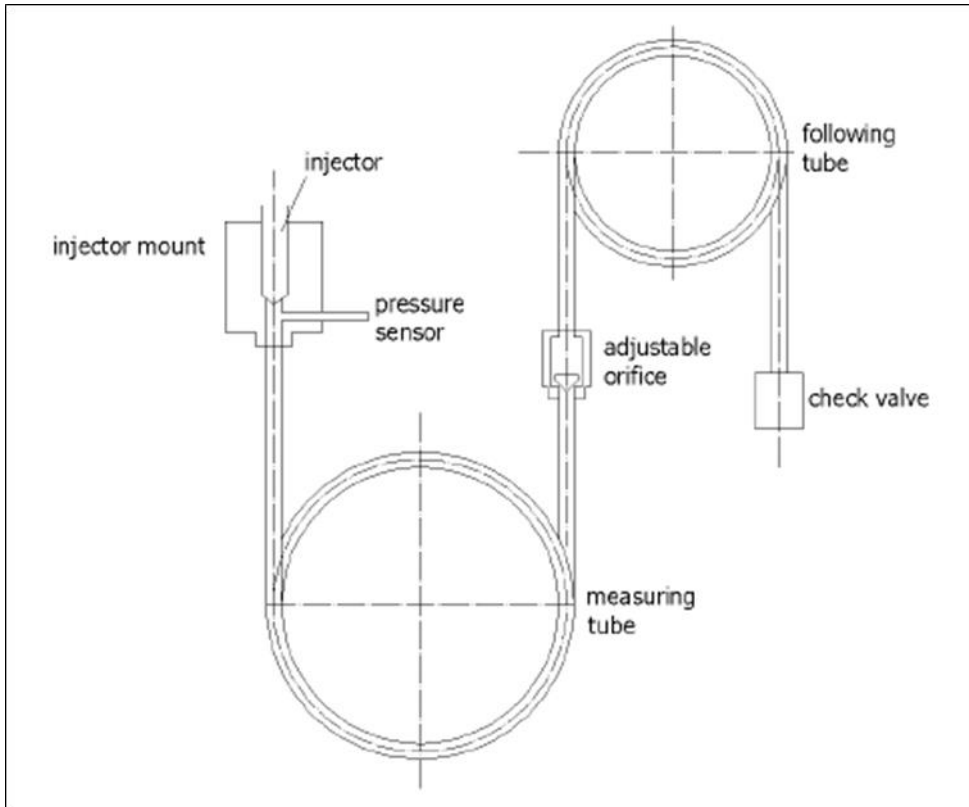
Saadaan yhtälö Boschin menetelmälle muotoon

$$\frac{dV}{dt} = \frac{AP}{a\rho}, \quad (5)$$

missä V on tilavuus, t aika ja A putken poikkipinta-ala (Emberson 2015: 55).

Mittausjärjestelmä koostuu tutkittavasta ruiskutusventtiilistä, ruiskutusventtiilinpitimestä, mittaputkesta, kuristimesta, toisesta putkesta ja sulkuventtiilistä (kuva 11). Painetta mittaava anturi on sijoitettu ruiskutusventtiilinpitimeen. Mittaputken pituus ja halkaisija riippuvat tutkittavasta ruiskutussuuttimesta. Mittaputken pituus on noin 20 metriä ja sisähalkaisija suunnilleen viisi millimetriä (Emberson 2015: 56). Putken on oltava riittävän pitkä, jotta takaisin heijastuva paineaalto ei haittaa mittausta. Mittaputken sisähal-

kaisijan suuruus vaikuttaa ruiskutuksen aiheuttaman paineen suuruuteen. (Vass & Németh 2012: 77–78.)



Kuva 11. Boschin menetelmän laitteisto (Vass & Németh 2013: 78).

Säädettävän kuristimen koko määrittää palaavan paineaallon osuuden, joka voi myös vaihdella ruiskutettavan polttoaineen määrästä riippuen. Yleensä kuristimena käytetään pallo- tai kuristusventtiiliä, jotka mahdollistavat nopean säätämisen. Jos kuristimen halkaisija on liian suuri, pääsee suurin osa paineaallosta toiseen putkeen ja aiheuttaa negatiivisen paineaallon. Toisen putken päässä on säädettävä sulkuventtiili, jotta vastapaine saadaan halutuksi. (Vass & Németh 2013: 78.)

5.2 Zeuchin menetelmä

Zeuchin menetelmä perustuu paineen mittaamiseen. Polttoainetta ruiskutetaan suljettuun kammioon, joka on täytetty tutkittavalla polttoaineella. Kammion tilavuus on vakio. Ennen ruiskutusta paine kammiossa pidetään vakaana. Ruiskutuksen aikana paine kammiossa nousee, josta voidaan määrittää ruiskutetun polttoaineen määrä ajan funktiona. Polttoaineen kokoonpuristumiskertoimeen vaikuttavat paine ja lämpötila. (Ember-son 2015: 56.)

Ruiskutetun polttoaineen määrä voidaan määrittää polttoaineen kokoonpuristumiskertoimen k avulla

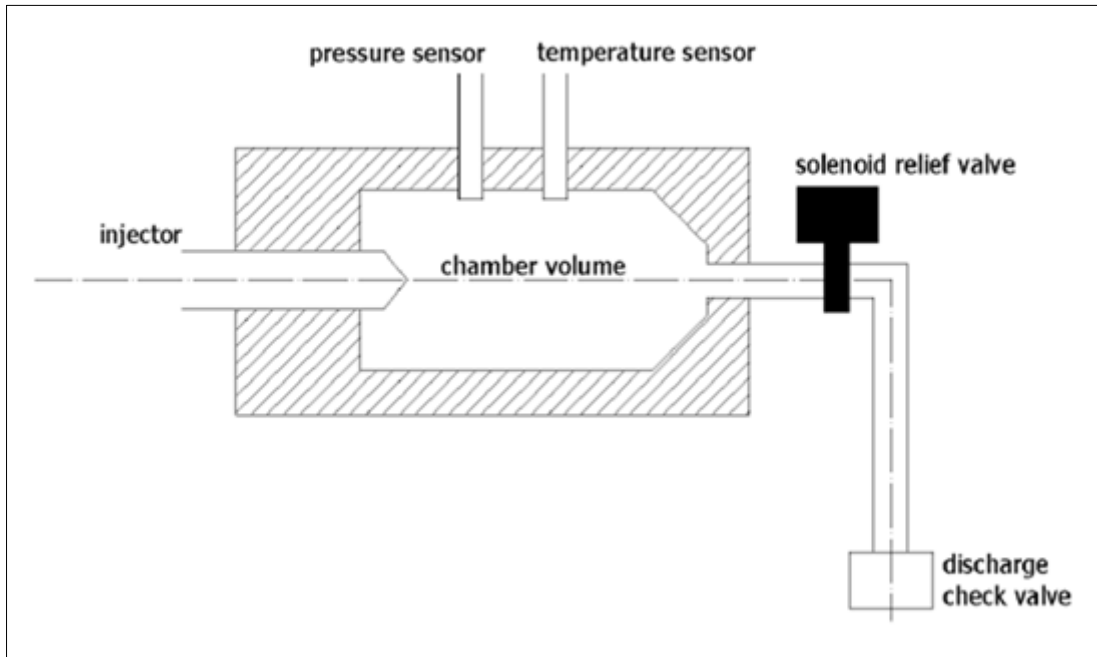
$$k = \frac{dP_{\text{chamb}}}{dV_{\text{chamb}}} V_{\text{chamb}}, \quad (6)$$

missä P_{chamb} on kammion paine ja V_{chamb} kammion tilavuus. Muokkaamalla yhtälöä ja ottamalla massa huomioon saadaan Zeuchin menetelmälle yhtälö

$$\frac{dm_f}{dt} = \rho \frac{V_{\text{chamb}}}{k} \frac{dP_{\text{chamb}}}{dt}, \quad (7)$$

missä m_f on polttoaineen massa. (Vass & Németh 2013: 78.)

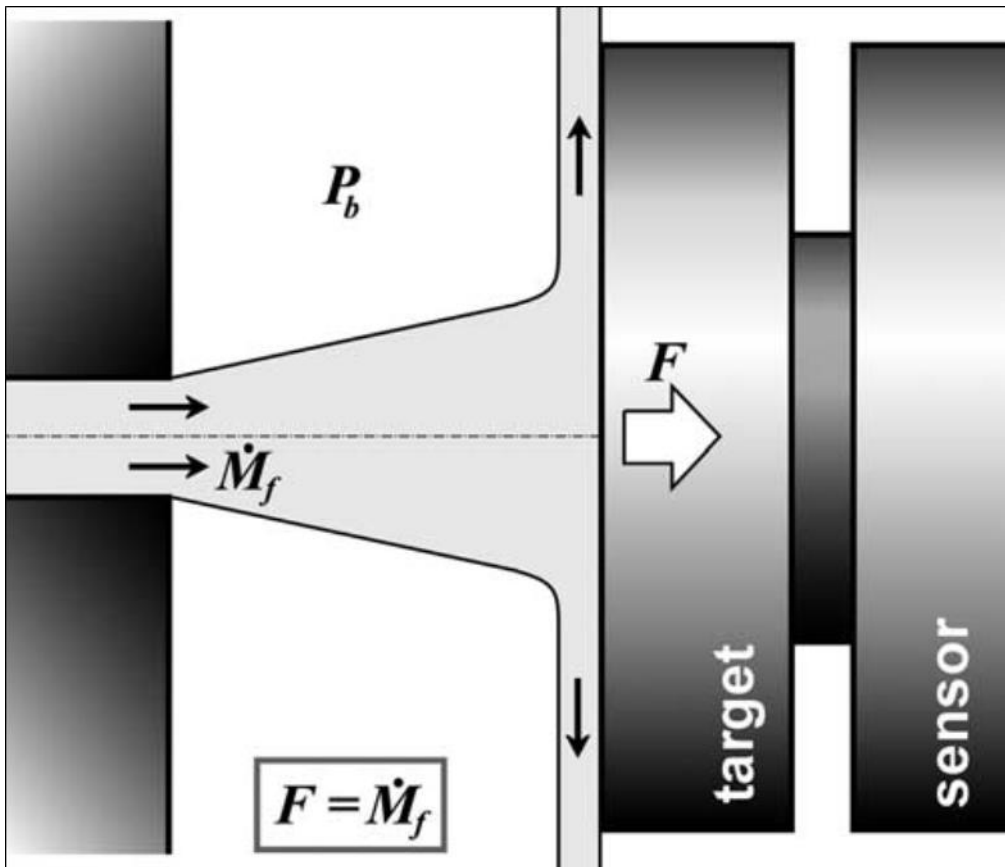
Mittauslaitteiston rakenne on esitetty kuvassa 12. Laitteisto koostuu ruiskutuskammios- ta, johon on asennettu anturit lämpötilan ja paineen mittaamiseen. Kammio on sylinterinmuotoinen, jonka pääty on kartiomainen. Kartiomaisella muotoilulla pyritään estämään heijastuneiden paineaaltojen aiheuttama häiriö. Kammion jälkeen on solenoidioh- jattu paineenalennusventtiili ja sen jälkeen paineensäätöventtiili. Paineenalennusventtiili on kiinni ruiskutuksen aikana ja heti ruiskutuksen päätyttyä venttiili avataan. Tällöin paine kammiossa laskee halutulle tasolle, joka on asetettu paineensäätöventtiilillä. Ennen seuraavaa ruiskutusta paineenalennusventtiili jälleen suljetaan. (Vass & Németh 2013: 78–79.)



Kuva 12. Zeuchin menetelmän laitteisto (Vass & Németh 2013: 78).

5.3 Liikemäärävuohon perustuva menetelmä

Liikemäärävuoto on merkittävä tekijä, kun ennustetaan polttoainesuihkun sekoittumista. Suihkun kartiokulma, eteneminen ja sekoittuminen riippuvat paljon liikemäärävuosta. Kuvassa 13 on esitetty periaate, jolla liikemäärävuoto mitataan. Mittaamiseen käytetään voima-anturia tai vaihtoehtoisesti paineanturia, joka on kalibroitu mittamaan voimaa. Voima on yhtä suuri kuin liikemäärävuoto, kunhan paine mittauskammiossa on vakio ja polttoainesuihku osuu kohtisuorasti anturin levyyn. (Payri ym. 2004.)



Kuva 13. Voiman mittaaminen (Payri 2004).

Anturiin asennettavan levyn koosta, johon polttoainesuihku osuu, on esitetty vaihtelevia mielipiteitä. Payri ym. (2004) käyttivät tutkimuksessaan levyä, jonka pinta-ala oli huomattavasti suurempi kuin suihkun osuapinta-ala. Emberson (2015: 61) esittää väitöskirjassaan, että levyn ja suihkun halkaisijoiden on oltava yhtä suuret, jotta saavutetaan hyvä mittaustarkkuus.

6 AIEMPIA TUTKIMUSTULOKSIA

Tässä luvussa esitellään aiempia tutkimustuloksia liittyen ruiskutuksen aiheuttaman voimaan mittaamiseen ja tutkimuskammion suunnitteluun.

6.1 Cederberg & Björk

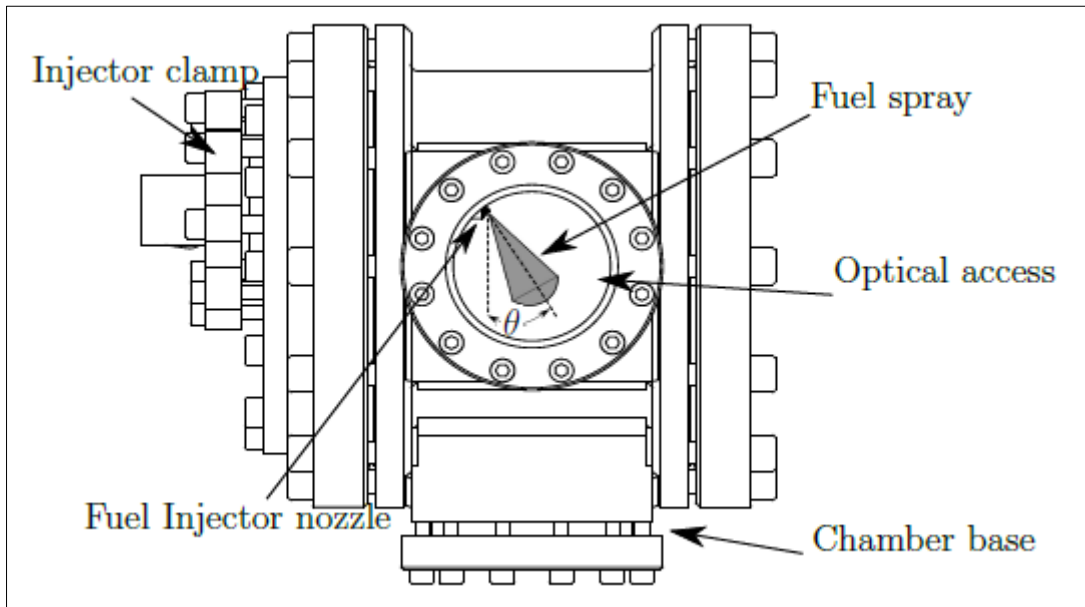
Cederberg ja Björk (2010: 18, 21–23) suunnittelivat diplomityössään testauslaitteiston ruiskutusventtiilille. Laitteistossa ei ole painekammiota eli se toimii normaalissa ilmanpaineessa. Voiman mittaamiseen käytetään paineanturia, johon on laskettu kerroin paineen muuttamiseksi voimaksi. Anturi asennetaan telineeseen, jota liikutetaan askelmoottorilla hammaspyörien välityksellä. Tällaisella ratkaisulla voidaan mitata polttoainesuihkun voima jokaisesta suutinreiästä kerrallaan. Voima mitataan neljän ja puolen millimetrin etäisyydeltä suutinreiästä. Telineeseen on mahdollista kiinnittää neljä anturia mittausten nopeuttamiseksi.

Järjestelmä koekäytettiin 2500 bar paineessa, eikä vuotoja havaittu. Varsinaisissa mittauksissa ruiskutusaineena käytettiin 1500 bar. Vertailtavana oli kaksi erilaista paineanturiin asennettavaa levyä: tasainen ja teräväkärkinen. Tutkimuksessa käytettiin kolmea erilaista ruiskutusventtiiliä, joista jokaisesta mittaukset tehtiin yhdestä suutinreiästä. Havaittiin, että anturista saatava signaali oli noin kaksi kertaa suurempi tasaisella levyllä kuin teräväkärkisellä levyllä. Selvää syytä, joka eron aiheuttaa, ei löydetty. (Cederberg & Björk: 66–69.)

6.2 Emberson

Väitöstutkimuksessaan Emberson (2015: 70, 73–74) suunnitteli sylinterinmuotoisen mittauskammion, joka on sisähalkaisijaltaan 138 ja sisäpituudeltaan 131 millimetriä (kuva 14). Kammiossa on kolme ikkunaa, jotka mahdollistavat polttoainesuihkun ku-

vaamisen. Kammio mitoitettiin 40 bar sisäiselle paineelle. Ruiskutusventtiilin kiinnitys suunniteltiin sellaiseksi, että ruiskutusventtiiliä on mahdollista kääntää.



Kuva 14. Tutkimuskammio (Emberson 2015: 75).

Polttoainesuihkun voiman mittaamiseen käytetään pietsosähköistä voima-anturia, joka mittausalue on -20–200 Newtonia. Anturiin kiinnitetään halkaisijaltaan neljä millimetriä oleva tasainen levy, joka ottaa polttoainesuihkun vastaan. Anturi asennetaan kannattimeen, joka on kiinnitetty kammioon asennettuun tukitankoon. Näin mahdollistetaan anturin liikuttaminen haluttuun kohtaan. Polttoainesuihkun on osuttava kohtisuoraan anturiin. Anturi asennetaan puolen millimetrin etäisyydelle suutinreiästä. (Emberson 2015: 85–86.)

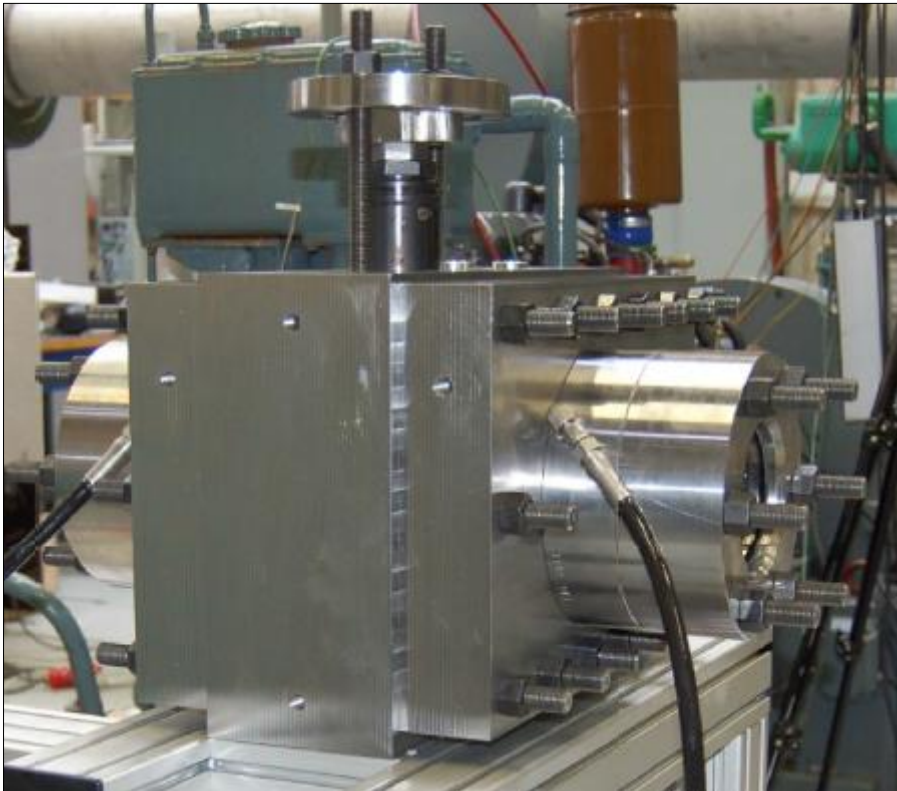
Mittauksissa käytettiin seitsemänreikäistä ruiskutusventtiiliä, jossa suutinreiän halkaisija on 120 mikrometriä. Voima mitattiin yhdestä suutinreiästä, minkä vuoksi kuusi muuta reikää tukittiin laserhitaamalla. Mittaukset suoritettiin kahdella vastapaineella, jotka olivat 20 ja 30 bar. Kammio paineistettiin tyypellä. Tutkittavia ruiskutusaineita oli kolme: 500, 700 ja 1000 bar. Tutkittavina polttoaineina olivat diesel ja diesel-vesi-

emulsiot, joissa vesipitoisuudet olivat 10 ja 20 massaprosenttia. Ruiskutuksen kesto oli puoli sekuntia. Kymmenen ruiskutuskerran jälkeen kammio tyhjennettiin kahden sekunnin ajan solenoidiohjatulla venttiilillä. Tämä toistettiin 10 kertaa jokaisella polttoaineella kaikissa olosuhteissa. (Emberson 2015: 71, 109–111.)

Polttoainesuihkun voima 1000 bar ruiskutusaineella, vastapaineen ollessa 20 bar, oli noin 1,7 Newtonia. Vastapaineella 30 bar voima pieneni noin 0,1 Newtonia. Kaikilla kolmella tutkittavalla polttoaineella päästiin lähes samoihin tuloksiin, joten emulsion vesipitoisuudella ei ole merkittävää vaikutusta polttoainesuihkun voimaan. (Emberson 2015: 163, 196.)

6.3 Ranta

Ranta (2010: 7, 35–36) on suunnitellut diplomityössään testauslaitteiston, jonka painekammio voidaan paineistaa tyypellä 100 bar paineeseen. Kammion tilavuus on 3,8 litraa. Kammio rakentuu kolmesta osasta: keskiosasta, johon kammion tilavuus, ikkuna ja läpiviennit on koneistettu, ja kahdesta sivulevystä (kuva 15). Myös sivulevyihin on asennettu ikkunat polttoainesuihkun kuvaamista varten. Testauslaitteisto on käytössä Aalto-yliopiston Polttomoottoritekniikan tutkimusryhmän laboratoriossa.



Kuva 15. Mittauskammio (Ranta 2010).

Ruiskutusventtiili kiinnitetään kammioon väliholkin avulla. Holkki mahdollistaa erilaisten ruiskutusventtiilien asentamisen kammioon. Polttoainelinjan korkeapainepuolella suurin paine on 2000 bar, joka voidaan tuottaa sähkömoottorikäyttöisellä tai vaihtoehtoisesti paineilmakäyttöisellä korkeapainepumpulla. Jälkimmäisen etuna on hiljaisuus mutta huonona puolena on pumpun alhainen tuotto, jos tarvitaan suuria tilavuusvirtoja. (Sarjovaara 2015.)

Diplomityössä tehdyissä mittauksissa tutkittiin ruiskutusviipeen vaihtelua, kammion kaasun tiheyden vaikutusta polttoainesuihkun muotoon, ruiskutuksen loppua ja neulan sulkeutumista. Ruiskutusviipeellä tarkoitetaan aikaa, joka kuluu ruiskutussignaalin antamisesta siihen, että polttoainesuihkun kärki tulee esiin suutinreiästä. Palamisen alkuketken hallinta muuttuu mahdottomaksi, jos viive vaihtelee paljon. Kammion kaasun tiheyden vaikutusta polttoainesuihkun muotoon tutkittiin kuvaamalla polttoainesuihkua samalla ajan hetkellä kammion paineen ollessa 50 bar ja 100 bar. Mittauksissa käytettiin

kahdeksanreikäistä suutinkärkeä, josta oli laserhitsattu umpeen seitsemän reikää. Ruiskutusaineina olivat 800 bar ja 1200 bar. (Ranta 2010: 54–56.)

6.4 Payri, Garcia, Salvador & Gimeno

Payri ym. (2004) käyttivät tutkimuksessaan mittauskammiota, jonka voi paineistaa tyypellä 100 bar paineeseen. Polttoainesuihkun voimaa mitattiin pietsosähköisellä paineanturilla, joka oli kalibroitu voiman mittaamiseen. Anturi oli asennettu viiden millimetrin etäisyydelle suutinreiästä. Levy, joka ottaa vastaan suihkun, on pinta-alaltaan huomattavasti suurempi kuin suihkun pinta-ala. Tutkimuksessa vertailtiin sylinterimäistä ja kartiomaista reiän muotoilua. Suutinkärjet olivat kaksireikäisiä, ja reiät sijaitsivat toisiinsa nähden vastakkain. Suutinreiän halkaisija sylinterimäisessä reiässä oli 131 mikrometriä. Kartiomaaisessa reiässä sisäänmenon halkaisija oli 142,5 mikrometriä ja ulostulon halkaisija oli 126 mikrometriä. Polttoainejärjestelmänä käytettiin perinteistä yhteispaine-ruiskutusta, jolla voidaan saavuttaa 1300 bar paine.

Tutkimus tehtiin viidellä ruiskutusaineella välillä 300–1300 bar ja viidellä ruiskutus-kammion paineella välillä 20–100 bar. Havaittiin, että molemmilla suutinreikämuotoiluilla polttoainesuihkun aiheuttama voima on lähes yhtä suuri. Kun polttoainetta ruiskutettiin 1300 bar paineella kammioon, joka oli paineistettu tyypellä 100 bar paineeseen, voimaksi mitattiin 2,1 Newtonia. (Payri ym. 2004.)

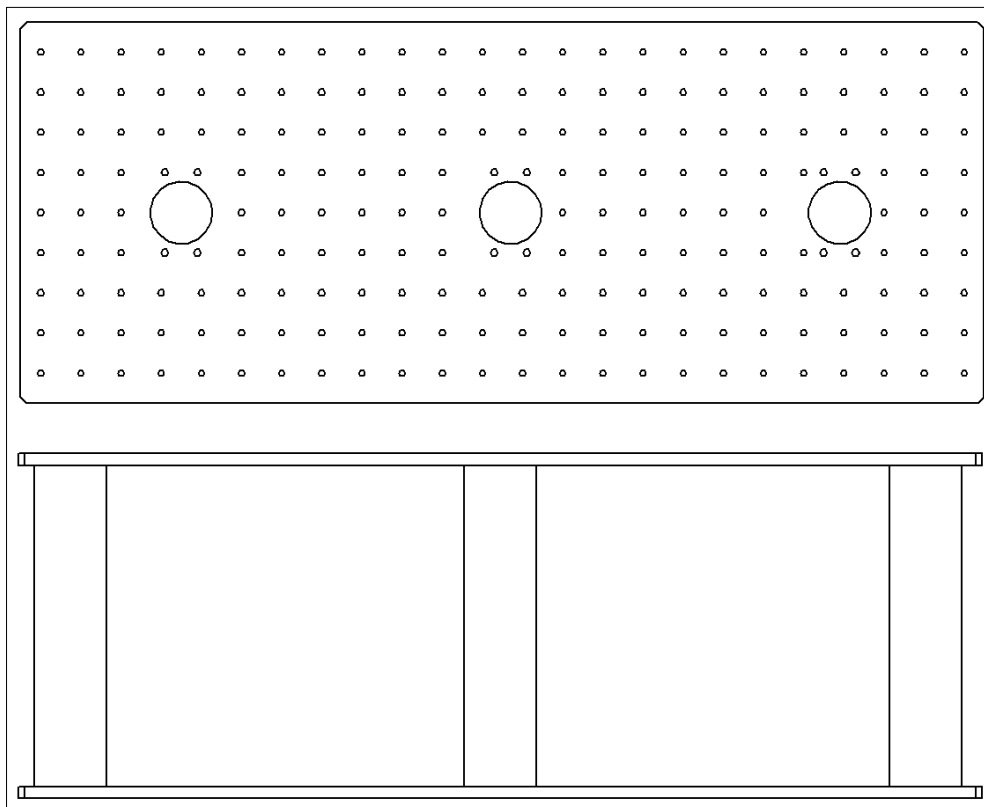
7 SUUNNITTELU

Tässä luvussa kerrotaan mittauspenkin suunnittelusta ja mitoituksista.

7.1 Pöytä

Pöytä rakennetaan samanlaiseksi kuin Wärtsilän Vaskiluodon tutkimuslaboratoriossa käytössä olevat pöydät. Pöytälevy on vahvuudeltaan kolme senttimetriä, pituudeltaan 240 senttimetriä ja leveydeltään 95 senttimetriä. Levyn teräsmateriaali on S235JR. Levy on koneistettu tasaiseksi molemmin puolin. Levyyn on koneistettu M16-kierteiset reiät 10 senttimetrin välein (kuva 16). Lisäksi keskilinjalla on kolme reikää, joiden halkaisijat ovat 155 millimetriä. Näihin reikiin Vaskiluodon laboratoriossa on asennettu ruiskutusventtiilit mittauslaitteineen.

Pöydän jalat on rakennettu vahvasta 200 millimetrin u-palkista, joita on kuusi kappaletta. Jalkojen alla on teräslevy, johon on koneistettu M16-kierteiset reiät. Jalat on kiinnitetty aluslevyyn ja pöytälevyyn pulttaamalla. Vaskiluodossa pöytä on asennettu värinävaimentimien päälle. Yliopistokäytössä riittää, että pöydän alle laitetaan kumimatto.

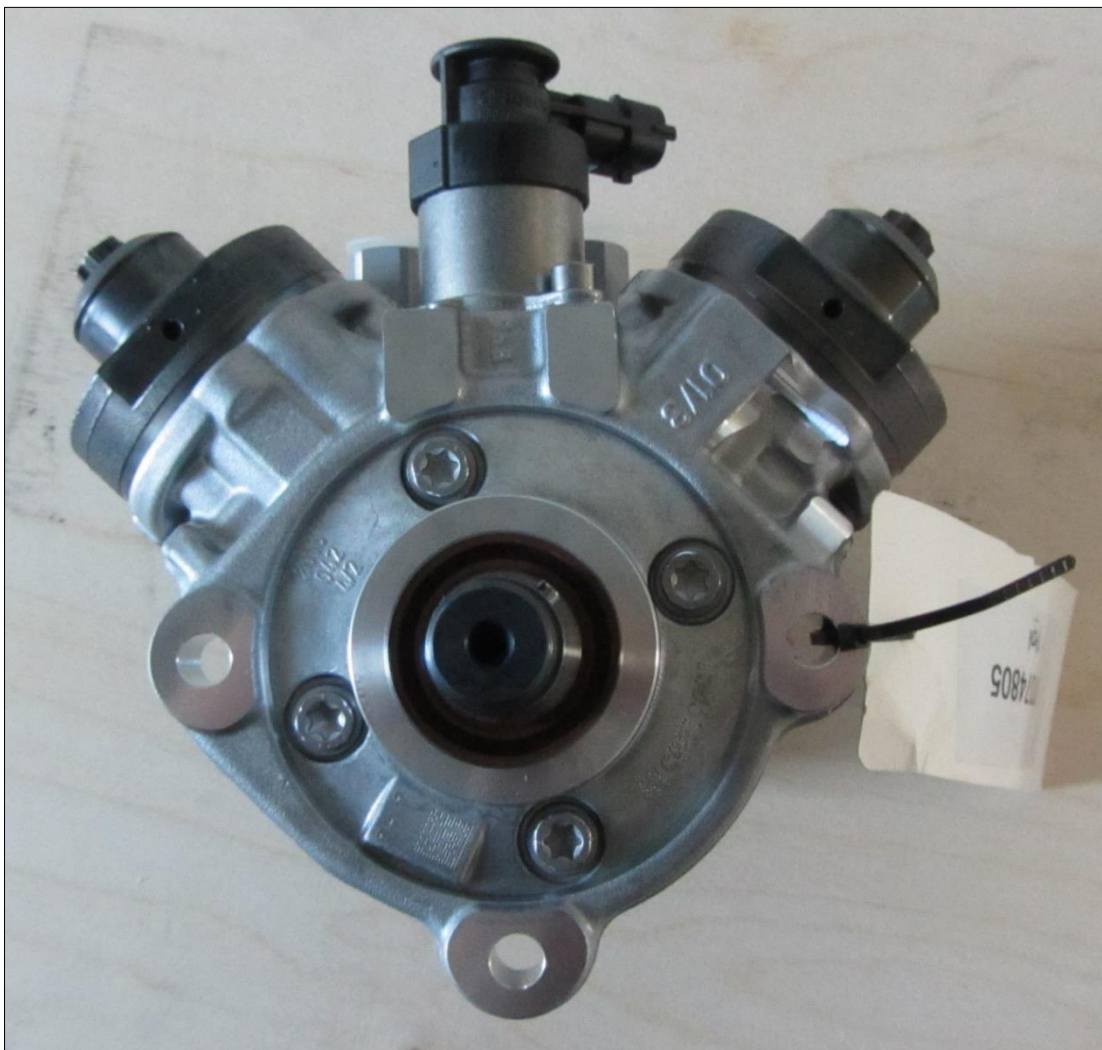


Kuva 16. Pöytä. Ylhäällä on kuvattu pöytä päältä. Alhaalla on kuvattu pöytä sivulta.

Koska käytetään korkeita ruiskutus- ja vastapaineita, on turvallisuus otettava huomioon. Wärtsilän laboratoriossa testauslaitteisto on rakennettu tilavaan, ikkunalliseen turvakoppiin. Yliopiston laboratoriossa voidaan pöydän sivuille asentaa polykarbonaatista valmistettua turvalasia, jota myy erikokoisina levyinä esimerkiksi Etra Oy.

7.2 Sähkömoottori

Sähkömoottorilla käytetään Boschin korkeapainepumppua CP4-20 (kuva 17), jonka toimittaa AGCO Power. Oikean tehosen sähkömoottorin valitsemiseksi lasketaan polttoaineen tilavuusvirta yhden suutinreiän läpi massavirran avulla. Laskelmassa purkautumiskertoimeksi on oletettu 0,9, suutinreiän halkaisijaksi 0,2 millimetriä, polttoaineen tiheydeksi 840 kg/m^3 , ruiskutuspaineksi 2500 bar ja vastapaineksi 100 bar.



Kuva 17. Korkeapainepumppu CP4-20.

Massavirta \dot{m} lasketaan muokkaamalla purkautumiskertoimen yhtälöä C_d

$$C_d = \frac{\dot{m}}{A_o \sqrt{2\rho_f \Delta p}}, \quad (8)$$

missä A_o on suutinreiän pinta-ala, ρ_f polttoaineen tiheys ja Δp paine-ero (Payri ym. 2004). Yhtälö saadaan muotoon

$$\dot{m} = C_d A_o \sqrt{2\rho_f \Delta p} \quad (9)$$

Massavirraksi saadaan 0,018 kg/s, joka vastaa tilavuusvirtaa 1,3 l/min.

Sähkömoottorilta vaadittavan tehon laskemiseksi oletetaan tilavuusvirraksi 2 l/min, pumpun paine-eroaksi 2500 bar ja hyötysuhteeksi 85 %. Korkeapainepumpun tarvitsema teho \dot{W}_{input} lasketaan yhtälöllä

$$\dot{W}_{\text{input}} = \frac{Q\Delta p_p}{\eta_p}, \quad (10)$$

missä Q on tilavuusvirta, Δp_p pumpun paine-ero ja η_p pumpun hyötysuhde (Fox, McDonald & Pritchard 2012). Tehoksi saadaan 9,8 kilowattia.

Yliopiston laboratoriosta löytyi pitkään käyttämättömänä ollut ABB:n valmistama sähkömoottori, jonka teho on 11 kilowattia. Moottorin pyörimisnopeus on 1500 kierrosta minuutissa. Moottoria on aiemmin käytetty hydraulikkapumpun pyörittämiseen. Moottorissa on asennettuna laippa, johon pumppu on kiinnitetty. Laippa on otettava pois ja tilalle on asennettava kiilahihnapyörä.

Voimansiirtoon sähkömoottorista korkeapainepumppuun käytetään hammas- tai kiilahihnaa. Moottorin pyörimisnopeuden säätöön tarvitaan taajuusmuuttaja. Vaasan ammattikorkeakoulusta saatiin apua sopivan taajuusmuuttajan valintaan, ja päädyttiin malliin Vacon 100.

Toinen vaihtoehto on hankkia korkeapainepumpuksi Boschin malli CP3.3NH, joka on kolmimäntäinen radiaalipumppu. Pumpulla saavutetaan 1800 bar maksimipaine. Boschin edustaja suositteli tätä mallia, koska pumppu tuottaa tasaisemman paineen kuin CP4-20-malli.

7.3 Voima-anturi

Lasketaan polttoainesuihkun aiheuttama voima, jotta voidaan valita sopiva voima-anturi. Lasketaan polttoainesuihkun teoreettinen nopeus u_{th} yhtälöllä

$$u_{th} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_f}} \quad (11)$$

(Payri ym. 2004). Oletetaan paine-eroksi 2400 bar ja polttoaineentiheydeksi 840 kg/m^3 . Teoreettiseksi nopeudeksi saadaan 750 m/s.

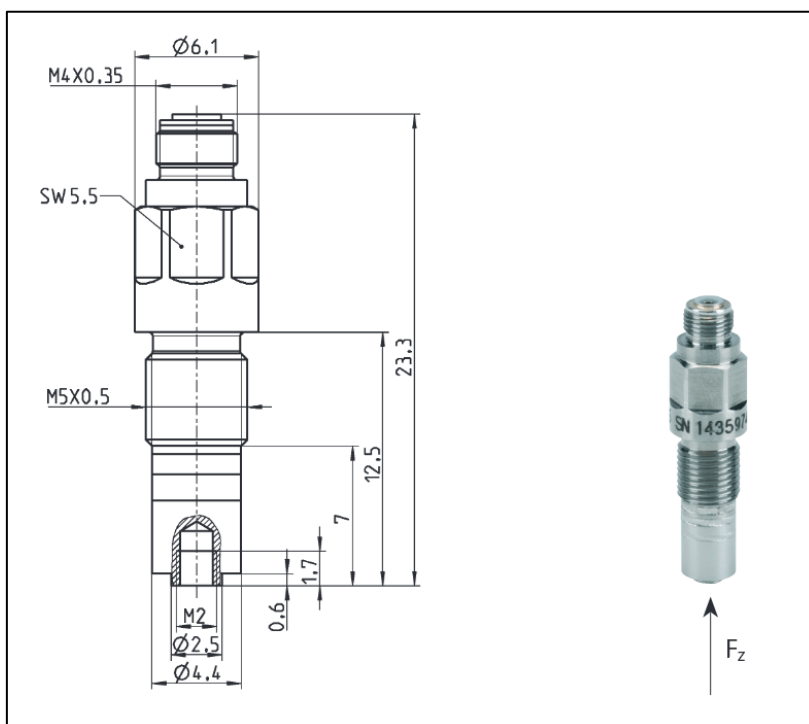
Polttoainesuihkun liikemäärävuoto \dot{M} lasketaan muokkaamalla tehollisen nopeuden yhtälöä u_{eff}

$$u_{eff} = \frac{\dot{M}}{\dot{m}}, \quad (12)$$

joka saadaan muotoon

$$\dot{M} = \dot{m}u_{eff} \quad (13)$$

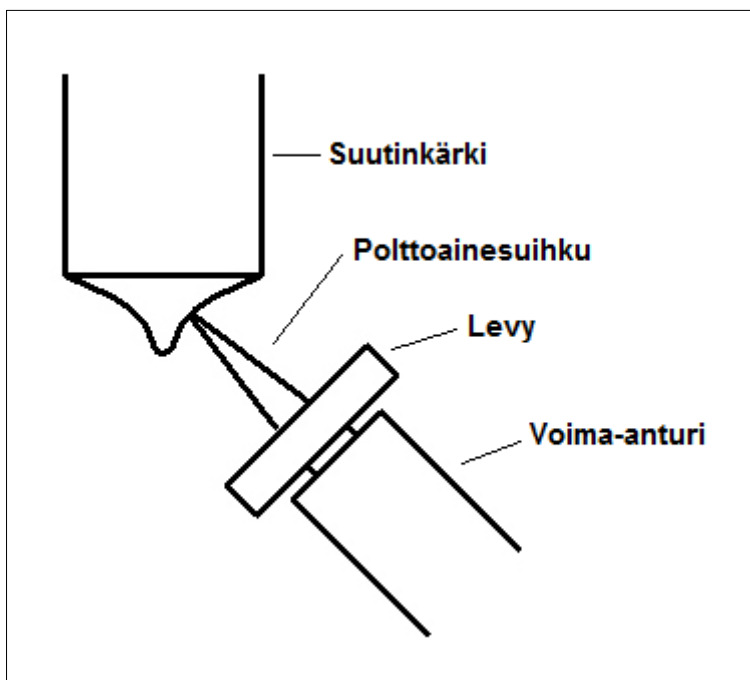
(Payri ym. 2004). Sijoitetaan yhtälöön polttoaineen massavirraksi yhtälön yhdeksän tulos $0,018 \text{ kg/s}$. Oletetaan teoreettinen nopeus ja tehollinen nopeus yhtä suuriksi ja sijoitetaan yhtälöön tulos yhtälöstä 11, 750 m/s . Liikemäärävuoksi saadaan 14 Newtonia. Valitaan voima-anturiksi Kistlerin malli 9215, jonka mittausalue on $-20\text{--}200$ Newtonia (kuva 18). Toinen vaihtoehto voisi olla saman valmistajan malli 9217, jonka mittausalue on $-500\text{--}500$ Newtonia.



Kuva 18. Voima-anturi 9215 (Kistler 2013).

Voima-anturin mukana toimitetaan M2-kierteinen kärki, jolla mitattava voima välitetään anturiin. Kärkeä voidaan muokata hiomalla siten, että siitä saadaan tasainen levy, jonka halkaisija on neljä millimetriä ja paksuus kaksi millimetriä. Tähän levyyn polttoainesuhku osuu ja siitä aiheutuva voima mitataan.

Kelloseppäkoulussa Espoossa koulutetaan mikromekaanikkoja ja siellä on mahdollista teettää oppilastöitä. Koulussa voidaan valmistaa halutun kokoinen levy M2-kierteellä. Päätettiin tilata levy, jonka halkaisija on seitsemän millimetriä ja paksuus kaksi millimetriä. Kuvassa 19 havainnollistetaan kuinka polttoainesuihkun on osuttava kohtisuorasti levyyn.



Kuva 19. Polttoainesuihkun osuminen voima-anturin levyyn.

7.4 Jakoputket

Boschilta ehdotettiin, että kannattaa käyttää yhden jakoputken sijaan kahta yhteen asennettua jakoputkea. Kahden jakoputken avulla painevärähtely saadaan pienemmäksi. Erilaisia asennusvaihtoehtoja on useita. AGCO:n toimittamassa korkeapainepumpussa on kaksi korkeapainelähtöä, joista letkut tai putket asennetaan normaalisti ensimmäiseen jakoputken tuloliitäntöihin. Toinen jakoputki voidaan asentaa yhdellä tai kahdella putkella tai letkulla. Tarpeettomat lähdöt jakoputkissa tulpataan. Kuvassa 20 on esitetty jakoputki ja sen liitännät.



Kuva 20. Jakoputki.

Mikäli käytetään Boschilta ostettua korkeapainepumppua, tulee erilaisia asennusvaihtoehtoja lisää, koska pumpussa on yksi korkeapainelähtö. Esimerkiksi ensimmäisen jakoputken tulopuoli asennetaan pumppuun normaalisti ja toinen tulopuoli kytketään jälkimmäiseen jakoputken tulopuoleen. Tarpeettomat lähdöt jakoputkissa tulpataan.

Korkeapainepumppu kannattaa asentaa korkeapaineletkulla (tai -letkuilla) jakoputkeen, koska letku joustaa ja mahdollistaa vapaan sijoittelun. Jakoputket voi asentaa toisiinsa korkeapaineputkilla. Kannattaa kokeilla onko mahdollista hyödyntää AGCO:n toimittaman ruiskutusjärjestelmän korkeapaineputkia. Jälkimmäisen jakoputken ruiskutusventtiilin välinen asennus kannattaa tehdä letkulla. Ruiskutusventtiilin sivusyöttöputken (kuva 21) ja korkeapaineletkun väliin pitää kuitenkin asentaa pätkä korkeapaineputkea, jotta Kistlerin paineanturin adapteri saadaan asennettua.



Kuva 21. Ruiskutusventtiilin sivusyöttöputki.

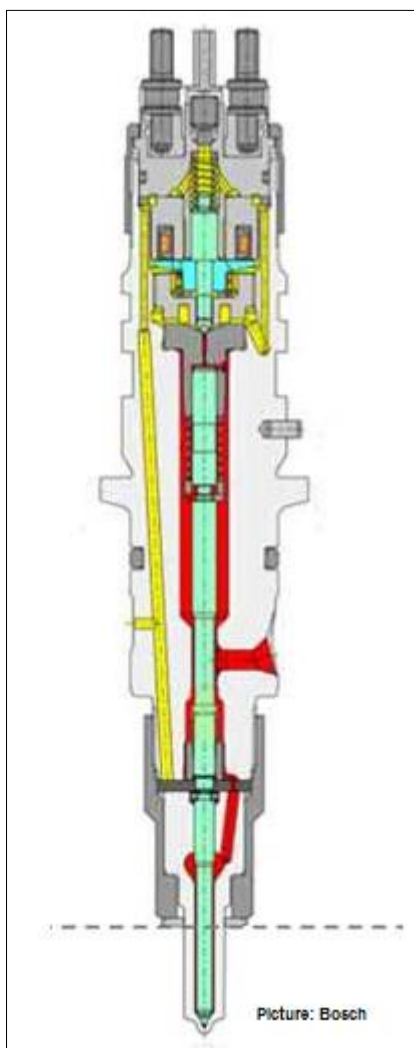
7.5 Ruiskutusventtiili

Kuvassa 22 esitettävää ruiskutusventtiiliä on muokattava, jotta saadaan mitattua jatkuva virtaus suutinreiästä. Mittaukseen kuluu aikaa noin minuutti ja lisäksi täytyy varata aikaa siihen, että virtaus saadaan tasaiseksi ennen mittauksen aloittamista. Venttiiliä ei voida ohjata solenoidilla, koska näin pitkä aika jännitteellisenä vahingoittaa solenoidia (Boström 2015). Ruiskutusventtiiliin on tehtävä mekaanisia muutoksia, jotta jatkuva virtaus saadaan toteutettua.



Kuva 22. Ruiskutusventtiili CRIN3-20.

Pohdittiin erilaisia mahdollisuuksia tehdä muutoksia ruiskutusventtiiliin. Kaksi parasta ratkaisua esiteltiin Boschille. Ensimmäisessä vaihtoehdossa poistetaan ruiskutusventtiilistä ylin jousi (kuva 23). Jousen tehtävänä on painaa esiohjausventtiilin avulla kuula kiinni, jolloin virtausta ei tapahdu korkeapainepuolelta matalapainepuolelle. Jos jousi poistetaan, on kuula aina auki ja polttoaine virtaa matalapainepuolelle ja neula pysyy auki. Tämän ratkaisu aiheuttaa jatkuvan paluuvirtauksen, joka on otettava huomioon, kun määritetään ruiskutuksen massavirtaa.



Kuva 23. Ruiskutusventtiilin piirroskuva (Klemt 2016).

Toisessa vaihtoehdossa poistetaan neula, jolloin polttoaine pääsee vapaasti virtaamaan suutinkärkeen ja -reikään. Tässä vaihtoehdossa paluuvirtaus on luultavasti pienempi kuin ensimmäisessä vaihtoehdossa. Paluuvirtaus on myös mahdollista tukkia kokonaan, jolloin kaikki polttoaine virtaa suutinreiän läpi. Jos paluuvirtaus tukitaan kannessa, johon ruiskutusventtiili on asennettu, voi paineen nousu kannen ja venttiilin välissä aiheuttaa ongelmia. Ratkaisuna voisi olla venttiilin paluuvirtausreiän tukkiminen esimerkiksi hitsaamalla. Tällöin polttoainetta ei pääse ruiskutusventtiilin ja kannen väliin.

Boschilla pidettiin toteuttamiskelpoisena vaihtoehtoa, jossa poistetaan neula. Selvisi, että paluuvirtausta ei saa tukkia. Kuula erottaa korkea- ja matalapainepuolen toisistaan. Jos paine korkeapainepuolella nousee liian suureksi, kuula nousee ylös ja polttoainetta virtaa matalapainepuolelle. Näin tapahtuu mahdollisissa häiriötilanteissa ja kuula toimii varoventtiilin tavoin.

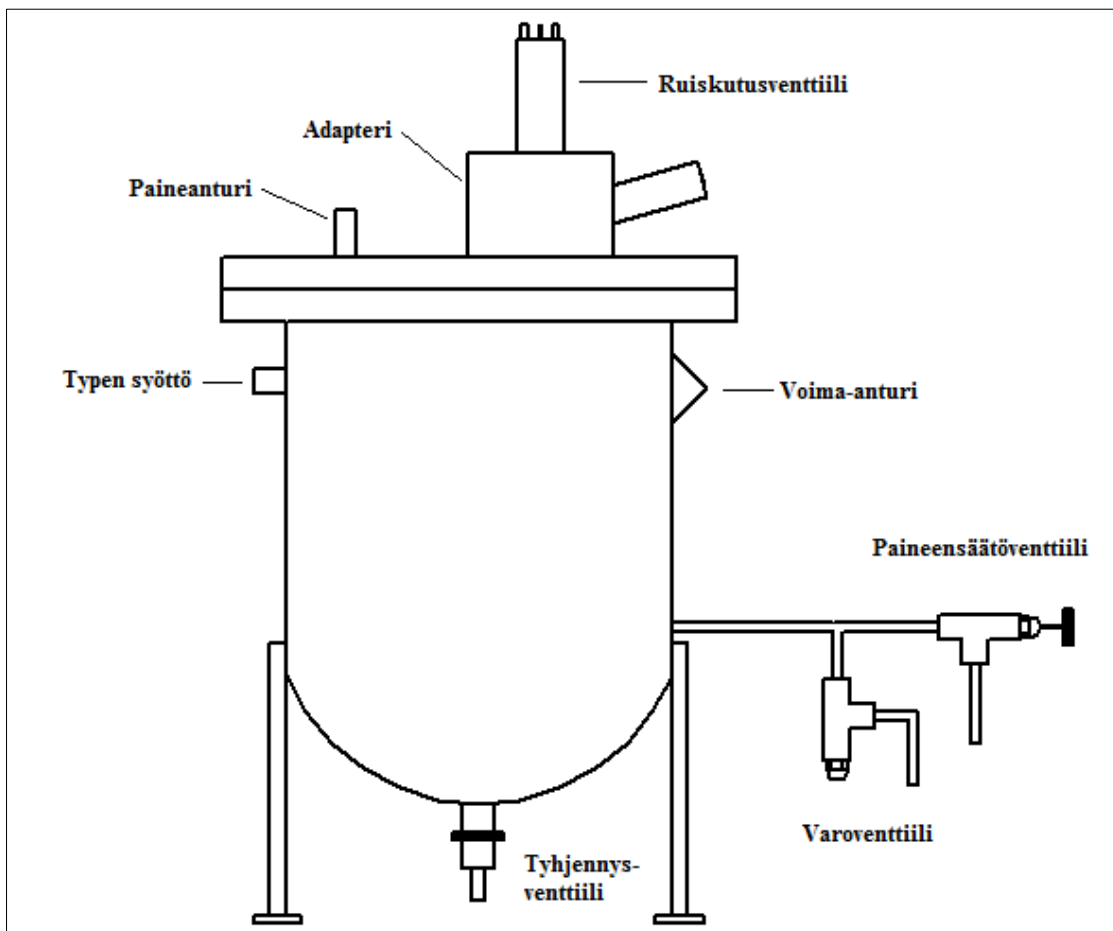
Neulan poistamisen takia pääsee typpikaasua polttoainejärjestelmään, jos painekammioita paineistetaan ennen ruiskutuksen aloittamista. Ruiskutusventtiilin ja jakoputken väliin voidaan asentaa takaiskuventtiili. Takaiskuventtiileitä valmistavat esimerkiksi Butech ja Swagelok. Toisena vaihtoehtona on, että aloitetaan typen syöttäminen ja polttoaineen ruiskutus painekammioon kammion tyhjennysventtiilin ollessa auki. Tällöin kammiossa vallitsee normaali ilmanpaine eikä syttymisvaaraa ole. Annetaan tyhjennysventtiilin olla hetken aikaa auki, jotta kammiossa oleva ilma poistuu, jonka jälkeen venttiili suljetaan. Paine nousee kammiossa halutulle tasolle ja mittaus voidaan aloittaa. Jälkimmäinen vaihtoehto on parempi.

Ruiskutusventtiilin suutinkärjessä on yhdeksän reikää. Mittauksessa tutkitaan virtausta yhden reiän läpi, joten kaikki reiät yhtä lukuun ottamatta tukitaan laser-hitsaamalla. Se reikä, joka jätetään avoimeksi, täytyy valita huolellisesti, jotta painekammion suunnittelu olisi mahdollisimman helppoa. Polttoainesuihku on saatava osumaan kohtisuorasti voima-anturin levyyn.

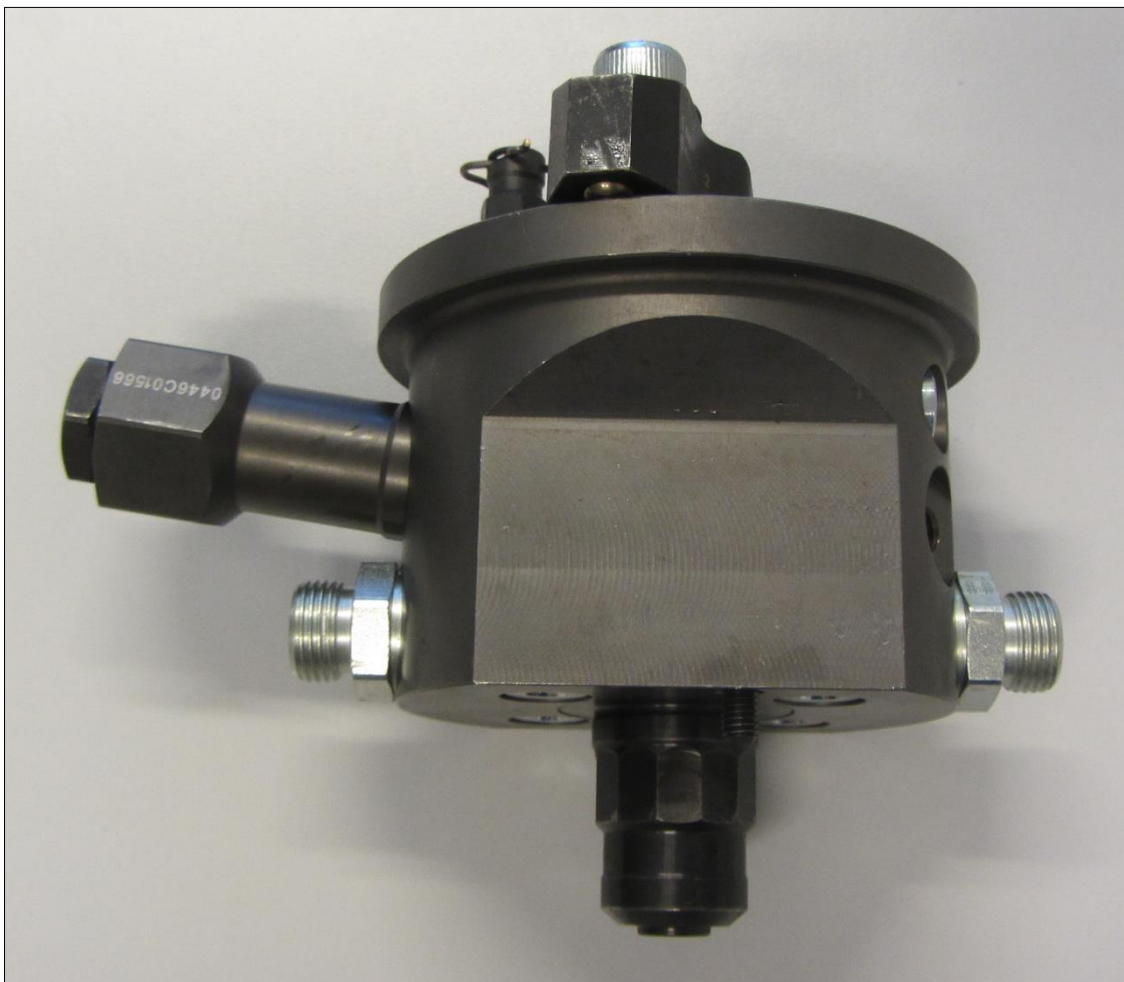
Koska kahdeksan reiän tukkiminen on haastavaa, päätettiin tilata Boschilta mittatilauksena yksireikäinen suutinkärki. Tämä helpottaa huomattavasti polttoainesuihkun kohdistamista paineastiaa suunniteltaessa, koska voidaan määrittää polttoainesuihkulle halutut lähtökulmat. Valittiin kulmat siten, että polttoainesuihku lähtee 45 asteen kulmassa alaviistoon vaakatasoon nähden ja suunta on sama kuin ruiskutusventtiilin sivusyöttöputkella.

7.6 Paineammio

Paineammio on muodoltaan lieriö, jonka pohja on puolipallo tai muu kaareva pohjamalli (kuva 24). Kammion tilavuudeksi päätettiin 6–8 litraa. Kansi on tasainen levy ja se kiinnitetään runkoon pulttiliitoksella. Kanteen asennetaan Boschilta ostettu adapteri (kuva 25), johon ruiskutusventtiili kiinnitetään. Kammion paineen mittaamiseen käytetään Kistlerin pietsoresistiivistä paineanturia 4075A, jonka mittausalue on 0–500 bar. Anturi asennetaan kanteen. Paineammion kylkeen tehdään tasku, johon voima-anturi asennetaan. Kammion pohjaan asennetaan palloventtiili, joka toimii tyhjennysventtiilinä. Painemittari (manometri) voidaan sijoittaa joko paineammion kanteen tai poistoputkeen.

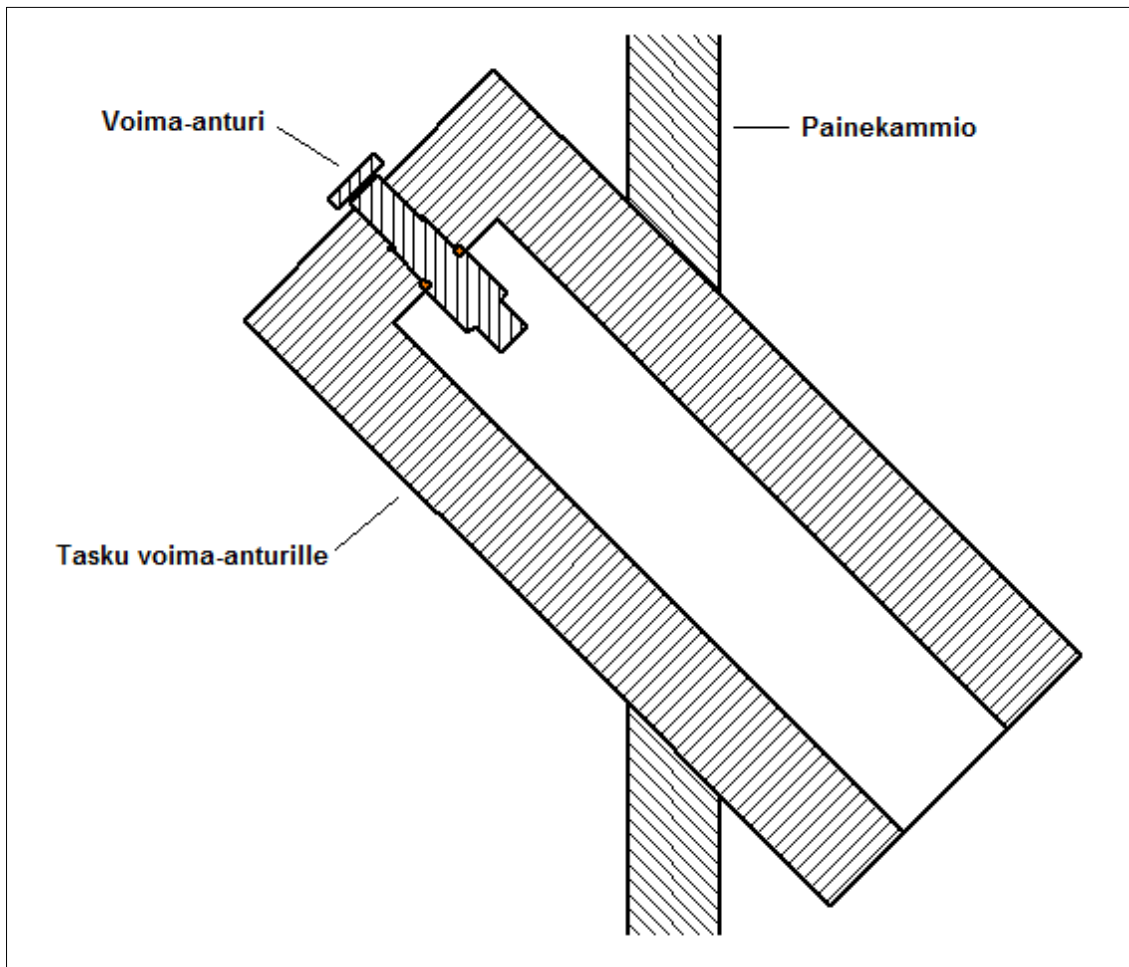


Kuva 24. Paineammio.



Kuva 25. Adapteri ruiskutusventtilille.

Kuvassa 26 on esitetty painekammion kyljessä oleva tasku, johon voima-anturi asennetaan. Anturi on kooltaan niin pieni, että asentaminen suoraan kammion kylkeen on vaikeaa. Taskun avulla anturi saadaan lähelle ruiskutusventtiilin suutinkärkeä. Tasku hitsataan kiinni painekammioon. Anturin tiivistämiseen käytetään kupariprikkaa.



Kuva 26. Voima-anturin asennus.

Täydessä typpikaasupullossa paine on joko 200 tai 300 bar mallista riippuen, joten painetta on alennettava, jotta painekammioon saadaan haluttu paine. Paineenalennusventtiilinä voidaan käyttää esimerkiksi AGAn mallia R21.

Painekammion paineenhallintaan voidaan käyttää R-sarjan paineenrajoitusventtiileitä (kuva 27). Kammiosta tulee yksi putki, joka haaroitetaan kahdeksi. Toiseen haaraan asennetaan paineenrajoitusventtiili varoventtiiliksi, joka on sinetöity aukeamaan tietyssä paineessa. Toiseen haaraan asennetulla venttiilillä säädetään haluttu paine kammiossa. Venttiiliksi, jolla säädetään paine kammiossa, on syytä valita sellainen malli, jossa on vipu, joka mahdollistaa venttiilin avaamisen ilman venttiilin säätämistä. Varoventtiiliksi

valitaan vivuton venttiili. Paineenrajoitusventtiileitä valmistavat esimerkiksi Parker ja Swagelok.



Kuva 27. Paineenrajoitusventtiili R-sarja (Parker 2015).

Toinen vaihtoehto paineensäätöventtiiliksi on takapaineenalennin, joita Swagelok valmistaa (kuva 28). Täytyy huomioida, että valmistaja tekee takapaineenalentimia ainoastaan tuumamitoituksella. Paineenrajoitusventtiileitä on saatavissa sekä metri- että tuumamitoituksella. Tämä on otettava huomioon painekammiosta lähtevän putkiston suunnittelussa ja rakentamisessa.



Kuva 28. Takapaineenalennin (Swagelok 2013: 30).

Painekammioista on mittauksen aikana polttoainetta ja typpeä, jotta paine pysyy tasaisena. Paineensäätöventtiilin jälkeen seos johdetaan putkea tai letkua pitkin keräyssäiliöön, jossa typpi ja polttoaine erotetaan toisistaan. Säiliössä on polttoainetta, jonka pinnan alapuolelle typen ja polttoaineen seos syötetään. Säiliöstä johdetaan letku ulkoilmaan, jonne typpi poistuu. Polttoaine jää säiliöön.

7.7 Massavirran mittaaminen

Massavirran määrittämiseen voidaan käyttää vaakaa polttoainetankin alla. Kun sekä polttoaineen ruiskutus että paine painekammiossa saadaan stabiiliksi, otetaan vaakaa näyttävä lukema ylös. Mittauksen lopussa saatava lukema vähennetään aloituksen lukemasta ja näin saadaan massavirta laskettua. Tilattiin vaaka KERN DS30K0.1L.

Toinen vaihtoehto olisi käyttää coriolis-ilmiöön perustuvaa massavirtamittaria. Sellainen on käytössä yliopiston moottorilaboratoriossa ja kokemukset mittarista ovat hyviä. Laboratoriokäytössä mittarilla on mitattu moottorin polttoainenkulutusta. Mittari on asennettu polttoainetankin ja -pumpun väliin. Moottorin polttoainejärjestelmään on tehty muutoksia siten, että polttoaineen paluuvirtausta ei mene polttoainetankkiin. Paluuvirtaukset kootaan keräimeen, jäähdytetään vesijohtovedellä toimivalla jäähdyttimellä ja kierrätetään takaisin polttoainepumpulle. Näin saadaan todellinen polttoaineen kulutus selville.

8 POHDINTA

Tässä diplomityössä on suunniteltu ruiskutuksen testauspenkki. Paineammion suunnittelu ja mitoitus on esitetty varsin pintapuolisesti. Kammion lujuuslaskennat on mitoitettava ja hyväksyttävä painelaitestandardin SFS-13445 mukaisesti. On myös kiinnitettävä huomiota siihen, että kammio suunnitellaan huolellisesti, jotta polttoainesuihku osuu voima-anturin levyyn. Kammioon on mahdollista suunnitella ikkunoita, joista pääsee näkemään ja kuvaamaan ruiskutuksen. Ikkunoiden lisääminen nostaa suunnittelun ja valmistuksen hintaa, mutta monipuolistaa kammion käyttömahdollisuuksia.

Turvallisuuteen on syytä kiinnittää erityistä huomiota, koska paineammiossa paine on 100 bar ja ruiskutusaineet voivat olla jopa yli 2000 bar. On huolehdittava, että käytetään oikeanlaisia putkia ja letkuja, jotka kestävät kyseisiä paineita. Laitteiston ympärille on syytä asentaa polykarbonaattilevyjä suojaiksi, jotka pysäyttävät mahdolliset korkeapaineiset polttoainevuodot. Paineammion paineistamisessa on noudatettava äärimmäistä varovaisuutta. Typpikaasuvuotojen varalta on huolehdittava riittävästä ilmanvaihdosta. On myös syytä hankkia happitunnistin, joka ilmaisee, jos huoneen happipitoisuus laskee liian alhaiseksi. Typpi on hajuton, väritön, mauton ja ilmaa kevyempi kaasu.

Riippuen käytettävästä korkeapainepumpusta jakoputkien asentamiseen on useita erilaisia mahdollisuuksia, joista muutamia on esitetty luvussa 7.4. Tavoitteena on saada ruiskutusaine mahdollisimman tasaiseksi. On todennäköistä, että toimivin ratkaisu löytyy kokeilemalla, joten kannattaa vertailla muutamaa erilaista asennusta. Ensimmäiset kokeilut kannattaa tehdä alhaisilla ruiskutusaineilla.

Tulevaisuudessa olisi mielenkiintoista verrata nyt suunnitellulla testauspenkillä saatavia tuloksia Boschin ja Zeuchin menetelmillä saataviin tuloksiin. Zeuchin menetelmässä polttoaine ruiskutetaan kammioon joka on täytetty samalla polttoaineella. Boschin menetelmässä polttoaine ruiskutetaan noin 20 metriä pitkään putkeen.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Suunnittelu voidaan jakaa useaan eri vaiheeseen, jotka lopussa yhdistetään kokonaiseksi laitteistoksi. Voima-anturin valinnassa laskettiin, kuinka suuren voiman polttoainesuihku voi aiheuttaa, ja valittiin käyttötarkoitukseen sopiva anturi. Sähkömoottorin mitoituksessa laskettiin kuinka suuren tehon korkeapainepumppu vaatii, jotta saavutetaan haluttu paine ja tilavuusvirta. Yliopiston laboratoriosta löytyi sopiva, kauan aikaa käyttämättömänä ollut, sähkömoottori. Lisäksi hankittiin moottorille sopiva taajuusmuuttaja.

Vaihtoehtoja korkeapainepumpuiksi oli kaksi. Yksi pumppu tuli AGCO Powerin toimitaman ruiskutusjärjestelmän mukana, mutta toisena vaihtoehtona on hankkia Boschilta geometrialtaan erilainen pumppu, joka tuottaa painetta tasaisemmin. Päätettiin, että asennetaan kaksi jakoputkea peräkkäin. Tällä ratkaisulla pyritään saamaan painevaihtelua pienemmäksi. Millä tavalla jakoputket asennetaan? Mahdollisia ratkaisuja on useita, joista paras todennäköisesti löytyy vain kokeilemalla useita erilaisia vaihtoehtoja.

Ruiskutusventtiiliin suunniteltiin muutoksia, jotta saadaan aikaiseksi jatkuva virtaus yhdestä suutinreiästä. Pohdittiin ylimääräisten reikien laserhitsaamista umpeen, mikä on kuitenkin erittäin haastavaa. Päätettiin, että on järkevintä hankkia räätälöity suutinkärki, jossa on vain yksi reikä. Ruiskutusventtiilin asentamiseksi painekammioon pohdittiin erilaisia ratkaisuja. Päädyttiin ratkaisuun, että hankitaan ruiskutusventtiilille valmis adapteri, joka voidaan asentaa kammioon.

Painekammion suunnittelu oli diplomityön aikaa vievin osuus, koska erilaisia vaihtoehtoja oli paljon. Päädyttiin mahdollisimman yksinkertaiseen malliin, joka olisi edullinen suunnitella ja valmistaa. Varsinaista painelaitestandardin vaatimaa suunnittelua ei tässä diplomityössä tehty, vaan suunnitelma on yksinkertaistettu. Siitä kuitenkin selviää millainen rakenne on tavoitteena, mitä varusteita kammioon tulee ja mitä lopullisessa suunnittelussa tulee ottaa huomioon.

Diplomityön hankintoihin käytettävä budjetti oli rajallinen, joten läheskään kaikkia mitauspenkin rakentamiseksi tarvittavia hankintoja ei voitu tehdä. Jouduttiin pohtimaan, mitä tarvikkeita kannattaisi sisällyttää kyseiseen budjettiin. Loput hankinnat jäävät tulevaisuuden haasteeksi. Tärkeimmät hankinnat tulevaisuudessa ovat painekammion suunnittelu ja valmistaminen sekä pöytä, jonka päälle laitteisto rakennetaan. Oman haasteensa hankintojen tekemiseen toi eräiden komponenttien pitkät toimitusajat.

10 YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoitteena oli suunnitella ruiskutuksen mittauspenkki. Työ oli osa FLEX^c-ohjelmaa, joka oli käynnissä vuosina 2015 ja 2016. Teoriaosuudessa esiteltiin, kuinka polttoainesuihku hajoaa ruiskutuksessa, ja miten polttoaineen ruiskutus vaikuttaa päästöihin ja syttymisjättämään puristussytytteisessä moottorissa. Virtausta reiässä esiteltiin lyhyesti. Yhteispaineruiskutusjärjestelmän tärkeimmät komponentit ja niiden toimintaperiaatteet kerrottiin. Tilavuusvirran mittaamisen kolme menetelmää esiteltiin. Aiempia tutkimustuloksia, joissa on mitattu polttoainesuihkun tuottamaa voimaa tai suunniteltu mittauslaitteisto, käytiin läpi.

Työn käytännön osuudessa suunniteltiin mittauspenkki, jolla voidaan tutkia jatkuvaa polttoainevirtausta yhden suutinreiän läpi. Virtauksesta halutaan selvittää massavirta ja polttoainesuihkun tuottama voima. Massavirta mitataan vaa'an avulla, ja voima mitataan voima-anturilla. Mittauslaitteiston tärkeimmät osat ovat yhteispaineruiskutusjärjestelmä ja mittauskammio.

Ruiskutusjärjestelmä rakentuu korkeapainepumpusta ja -putkista, jakoputkesta ja ruiskutusventtiilistä. Mittauslaitteistossa päätettiin käyttää kahta jakoputkea, jotta ruiskutusaine saadaan mahdollisimman tasaiseksi. Ruiskutusventtiiliin ja suutinkärkeen suunniteltiin muutokset, jotka mahdollistavat jatkuvan virtauksen.

Mittauskammio paineistetaan 100 bar paineeseen tyypellä. Typeä käytetään, koska se on inertti kaasu. Polttoaine ei saa syttyä. Kammion suunnittelussa lähtökohdaksi otettiin mahdollisimman yksinkertainen rakenne, joka on edullinen suunnitella ja valmistaa. Mittauskammion varusteluun kuuluvat paineenhallintalaitteet, paineanturi, painemittari, typen syöttöliitin, tyhjennysventtiili ja voima-anturi. Ruiskutusventtiili kiinnitetään kammioon adapterin avulla.

LÄHDELUETTELO

- Binder, K. B. (2010). Diesel engine combustion. Teoksessa: *Handbook of Diesel Engines*, 61–75. Toim. K. Mollenhauer & H. Tschöke. Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN 978-3-540-89082-9.
- Boström, B. (2015), insinööri. Vantaa. Haastattelu, Robert Bosch Oy, 23.10.2015.
- Cederberg, C. - J. & J. Hörner Björk (2010). *Development of test rig for flow measurements in common rail injector nozzles* [online]. The Royal Institute of Technology Stockholm. Master of Science Thesis. [Viitattu 9.12.2015]. Saatavilla: <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:460086/FULLTEXT01.pdf>.
- Dieselmoottorin ohjausjärjestelmät* (2010). Suomentanut B. Boström. Helsinki: Autoalan Koulutuskeskus. 135 s. ISBN 978-951-9155-26-5.
- Diesel-Engine Management* (2005). 4th ed. Plochingen: Robert Bosch. 501 p. ISBN 0-470-02689-8.
- Egler, W., R. J. Giersch, F. Boecking, J. Hammer, J. Hlousek, P. Mattes, U. Projahn, W. Urner & B. Janetzky (2010). Fuel injection systems. Teoksessa: *Handbook of Diesel Engines*, 127–174. Toim. K. Mollenhauer & H. Tschöke. Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN 978-3-540-89082-9.
- Emberson, D. (2015). *Diesel fuel and Diesel fuel with Water Emulsions Spray and Combustion Characterization* [online]. Queen Mary University of London. School of Engineering and Material Sciences. Dissertation. [Viitattu 4.2.2016]. Saatavilla: <https://qmro.qmul.ac.uk/xmlui/handle/123456789/9851>.
- Fox, R. W., A. T. McDonald & P. J. Pritchard (2012). *Fluid Mechanics*. 8th ed. John Wiley & Sons. 873 p. ISBN 978-1-118-02641-0.

- Fromm, A. (2013). Raising the bar on diesel common rail [online]. [Viitattu 3.2.2016]. Saatavilla: <http://www.densodynamics.com/2013/07/?cat=8>.
- Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engines Fundamentals*. New York: McGraw-Hill Inc. 930 p. ISBN 0-07-028637-X.
- Kistler (2013). Low Level Force Sensors [online]. [Viitattu 16.5.2016]. Saatavilla: https://kistler-embedded.partcommunity.com/FileService/File/kistler/02_force/01_single_component_force_sensors_compression/01_sensors/9215_english.pdf.
- Klemt, M. (2016). Diplomityö, testauslaitteisto. Sähköpostiviesti Pekka Isolalle 7.9.2016.
- Majewski, W. A. & M. K. Khair (2006). *Diesel Emissions and Their Control*. Warrendale: SAE International. 561 p. ISBN 978-0-7680-0674-2.
- McAllister, S., J. - Y. Chen & A. C. Fernandes-Pello (2011). *Fundamentals of Combustion Processes*. New York: Springer Science+Business Media. 302 p. ISBN 978-1-4419-7943-8.
- Parker (2015). 6,000 PSI Relief Valve - R Series [online]. [Viitattu 4.7.2016]. Saatavilla: <http://ph.parker.com/us/17554/en/6000-psi-relief-valve-r-series>.
- Payri, F., V. Bermúdez, R. Payri & F. J. Salvador (2003). The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles [online]. [Viitattu 20.1.2016]. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236103003193>.
- Payri, R., J. M. García, F. J. Salvador & J. Gimeno (2004). Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray

characteristics [online]. [Viitattu 11.2.2016]. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236104003060>.

Ranta, O. (2010). *Polttoainesuihkumittauskammion suunnittelu suurille paineille (100 bar) ja tiheyksille, kammion valmistaminen sekä koekäyttö*. Aalto-yliopisto. Koneenrakennustekniikan laitos. Diplomityö.

Sarjovaara, T. (2015), TkL. Espoo. Haastattelu, Aalto-yliopisto, 30.9.2015.

Stone, R (1999). *Introduction to Internal Combustion Engines*. 3. painos. Basingstoke: Palgrave Macmillan. 646 p. ISBN 0-333-74013-0.

Swagelok (2013). Pressure Regulators K Series [online]. [Viitattu 4.7.2016]. Saatavilla: <http://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/EN/MS-02-230.PDF>

Vass, S. & H. Németh (2013). Sensitivity analysis of instantaneous fuel injection rate determination for detailed diesel combustion models. *Transportation Engineering* [Online] 41/1 [Viitattu 21.1.2016], 77–85. Saatavilla: <http://search.proquest.com/openview/312820f387e30870491b6a51e4a5e99e/1?pq-origsite=gscholar>.