

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS**  
**TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

**Vilius Brunius**

**PJEZO KERAMINIŲ PURKŠTUKŲ KOKYBĖS GERINIMAS**  
**AUTOMOBILIŲ VARIKLIUOSE**

Magistro baigiamasis darbas

**Šiauliai, 2013**

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS**  
**TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

**PJEZO KERAMINIŲ PURKŠTUKŲ KOKYBĖS GERINIMAS**  
**AUTOMOBILIŲ VARIKLIUOSE**

Magistro baigiamasis darbas

**Autorius – Vilius Brunius (MM-11 gr.)**

**Vadovas – Doc. dr. D. Čikotienė**

**Konsultantas – Dr. A. Bubulis**

**Recenzentas – Doc. S. Rimovskis**

**Katedros vedėjas – Doc. dr. A. Sabaliauskas**

**Šiauliai, 2013**

## TURINYS

<b>SANTRAUKA .....</b>	<b>4</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>5</b>
<b>LENTELIŲ SĄRAŠAS.....</b>	<b>6</b>
<b>PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....</b>	<b>7</b>
<b>ĮVADAS .....</b>	<b>8</b>
<b>1. PJEZOKERAMINIŲ PURKŠTUKŲ KOKYBĖS GERINIMO DYZELINIUOSE VARIKLIUOSE LITERATŪROS APŽVALGA .....</b>	<b>10</b>
1.1. Pjezokeraminių purkštukų dyzeliniuose varikliuose tyrimai ir metodų pritaikymas .....	10
2.1. Pjezokeraminių purkštukų funkcionavimo trikdžiai ir pasekmės.....	13
<b>2. PJEZOKERAMINIŲ PURKŠTUKŲ KOKYBĖS GERINIMO TYRIMAS .....</b>	<b>15</b>
2.1. Bendrosios magistralės ir kuro purkštuko veikimo principas.....	15
2.1.1. Bendrosios magistralės privalumai ir nauda .....	24
2.2. Pjezokeraminių purkštukų medžiagų veikimo principas .....	23
2.3. Pjezokeraminių purkštukų kokybės gerinimo problematika .....	26
2.4. Dyzelinio kuro purkštuko išpurškimo charakteristikos ir skaičiavimo metodai.....	26
2.5. CR kuro sistemų purkštukų tikrinimo stendo techninės charakteristikos.....	38
<b>3. PJEZOKERAMINIŲ PURKŠTUKŲ KURO IŠPURŠKIMO CHARAKTERISTIKŲ ANALITINIS TYRIMAS, REZULTATAI IR VERTINIMAS .....</b>	<b>39</b>
3.1. Pjezokeraminių purkštukų išpurškiamo lašelio dydžio, fakelo ilgio išpurškiamo kuro kiekio apskaičiavimas .....	39
3.2. Pjezokeraminių purkštukų tyrimo rezultatai ir vertinimas .....	46
3.3. Pjezokeraminių purkštukų išpurškiamo kuro kiekio nustatymas ir įvertinimas .....	48
<b>IŠVADOS IR PASIŪLYMAI.....</b>	<b>51</b>
<b>LITERATŪRA.....</b>	<b>52</b>

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS**  
**TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

Vilius Brunius. **PJEZO KERAMINIŲ PURKŠTUKŲ KOKYBĖS GERINIMAS**  
**AUTOMOBILIŲ VARIKLIUOSE. Magistro baigimasis darbas / vadovas doc.dr. D. Čikotienė**

**SANTRAUKA**

Tobulėjant automobilių varikliams reikalingas ir kuro įpurškimo sistemų, o kartu ir pjezokeraminių purkštukų tobulėjimas. Iš purkštuko išpurškiamo kuro kokybė turi atitikti tam tikrus reikalavimus, tokius kaip: išpurkštų lašelių dydis, fakelo ilgis, išpurkšto kuro kiekis. Taikant mokslinės literatūros šaltinių analizės ir sintezės metodą, darbe apskaičiuojami pagrindiniai purkštukų parametrai. Jiems palyginti purkštukai išbandomi bandymų stende. Gauti rezultatai sulyginami, pateikiamos išvados ir tolimesnės pjezokeraminių purkštukų tobulinimo kryptys.

*Reikšminiai žodžiai:* Pjezokeraminis purkštukas, lašelių dydis, fakelo ilgis, išpurkšto kuro kiekis.

**ŠIAULIAI UNIVERSITY**  
**FACULTY OF TECHNOLOGY**  
**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**Vilius Brunius. QUALITY DEVELOPMENT OF THE PIEZO CERAMIC NOZZLE AT THE AUTOMOBILE ENGINE.** Master final work / research advisor. Doc.dr. D. Čikotienė

**SUMMARY**

Advances in automotive engines require fuel and injection systems, and thus the piezoelectric injectors development. The nozzle sprayed fuel quality must meet certain requirements, such as sprayed droplet size, flare length, sprayed fuel. For the purposes of scientific literature analysis and synthesis methods, the calculated parameters of the main nozzle. Piezoceramic nozzle is tested on experimental stand, and results compared with calculated parameters. Conclusions are formulated and given further improvement directions of piezoceramic injectors.

*Keywords.* Piezo ceramic nozzle, droplet size, spray length, mass flow rate.

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

<b>1 lentelė.</b> Mokslinių tyrimų metodai ir jų rezultatai.....	<b>10-11</b>
<b>2 lentelė.</b> Maksimalaus kuro slėgio vystymasis pagal gamintojus.....	<b>20</b>
<b>3 lentelė.</b> CR sistemos privalumai ir nauda.....	<b>22</b>
<b>4 lentelė.</b> Kintamieji įtakoiantys purkštuko veikimą .....	<b>28</b>
<b>5 lentelė.</b> Bandymo stendo charakteristikos .....	<b>38</b>
<b>6 lentelė.</b> Standarto EN 590 dyzelinių degalų kokybės rodikliai .....	<b>41</b>
<b>7 lentelė.</b> Atlikto tyrimo gautų rezultatų bendra lentelė.....	<b>47</b>
<b>8 lentelė.</b> Eksperimentinio tyrimo metu gauti kuro purkštukų rezultatai.....	<b>50</b>

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

<b>1 pav.</b> Tyrimo schema.....	12
<b>2 pav.</b> Geras ir blogas kuro purkštukas .....	13
<b>3 pav.</b> Abrazyvinių dalelių būvimas prieš ir po valymo.....	14
<b>4 pav.</b> Hidraulinis purkštukas.....	15
<b>5 pav.</b> CR sistema iš kairės į dešinę CR purkštukas, CR purkštukas įmontuotas variklyje, CR purkštuko pjūvis .....	16
<b>6 pav.</b> Degų akumulatorius .....	17
<b>7 pav.</b> CR purkštuko sudedamosios dalys .....	18
<b>8 pav.</b> Dyzelinė CR sistema .....	19
<b>9 pav.</b> Bosch EDC16 ir DensoECD42P CR sistemos iš kairės į dešinę.....	19
<b>10 pav.</b> Dyzelinio variklio elektroninio reguliavimo blokinė sistema .....	23
<b>11 pav.</b> Kvarco kristalai.....	24
<b>12 pav.</b> Pjezoelektrikų struktūra.....	24
<b>13 pav.</b> Pjezo element charakteristika, jėga- poslinkis.....	25
<b>14 pav.</b> Svarbiausi kintamieji apibūdinantys išpurškimo procesą .....	27
<b>15 pav.</b> Fizikiniai išpurškimo parametrai.....	29
<b>16 pav.</b> Kuro išpurškimo kampo kitimas priklausomai nuo kuro slėgio .....	32
<b>17 pav.</b> Užbaigto ir neužbaigto kuro fakelo išpurškimo struktūra .....	34
<b>18 pav.</b> Išpurškiamo kuro kiekio priklausomybė nuo kuro slėgio.....	48
<b>19 pav.</b> Purkštukų tikrinimo stendas .....	49

## IVADAS

Keičiantis pasaulio supratimui bei kintant technologijoms, vis daugiau dėmesio skiriama inovacijoms ir naujovėms. Šių dalykų dėka sukuriamos pažangios priemonės padedančios tausoti energijos išteklius bei didinti jau esamų išteklių naudingumą. Ekologinės pasaulio problemos taip pat susijusios ir su automobilių variklių gaminimo technologijomis. Automobilių kuro ekonomija, tylesnis ir mažiau vibracijų išgaunantis variklio darbas, galios ir sukimo momento didėjimas kiekvieno gamintojo iššūkis ir siekimas ateities kartoms suteikti ergonomišką, ekonomišką ir komfortišką automobilio variklį.

**Temos aktualumas.** Šiandieniniame pasaulyje pastebime dyzelinių ir benzininių variklių gamintojų didėjančią konkurencingumą. Dauguma jų norėdami kuo mažesnėmis degalų sąnaudomis išgauti didesnę variklių naudingumo koeficientą ieško variklio gerinimo technologijų. Viena iš svarbiausių tyrimų kryptių yra variklio sudedamoji dalis, kuri padėjo dyzelinių variklių gamintojams pasiekti puikių rezultatų kuro ekonomijoje bei galios santykyje – pjezokeraminiai purkštukai bendrosios magistralės tiesioginio įpurškimo sistemoje (angl. Common rail). Pjezokeraminių purkštukų veikimo modernizavimas siekiant sumažinti sunaudojamo kuro kiekį tampa vis aktualesnis. Dėl šios priežasties yra atliekami tyrimai susiję su kuro išpurškimo kokybės tobulinimu. Kuo smulkesniais lašeliais išpurškiamas kuras, tuo jis geriau susimaišo su oru ir sudaro tinkamesnį degimui mišinį.

**Darbo objektas** – pjezokeraminiai kuro purkštukai bendrosios magistralės tiesioginio įpurškimo sistemoje

**Darbo tikslas** – ištirti dyzelinio kuro purkštuko išpurškiamų lašelių ir kuro kiekio dydį dyzeliniuose varikliuose esant skirtingiems slėgio parametrams.

**Problema** – Lietuvoje nėra arba beveik nėra darytų tyrimų susijusių su pjezokeraminių purkštukų kokybės gerinimu. Taip pat nėra parašytų lietuvių autorių mokslinių straipsnių šia tema. Šioms problemoms spręsti tyriamajame darbe yra naudojami mokslinės analizės ir sintezės metodai, grafinio vaizdavimo bei kuro purkštukų bandymo stendas.

### **Tyrimo uždaviniai:**

1. Apžvelgti bendrosios magistralės sistemoje naudojamų pjezokeraminių purkštukų kokybės gerinimo metodus ir išnagrinti pjezokeraminių purkštukų charakteristikas;
2. Išanalizuoti pjezokeraminio purkštuko konstrukciją;



3. Ištirti pjezokeraminių purkštukų makroskopinių ir mikroskopinių charakteristikų įtaką išpurškimo kokybei taikant statistinį skaičiavimo metodą bei pasinaudojant bandymų stendu;
4. Pateikti pjezokeraminių purkštukų išpurkšto kuro kiekio neatitikimus ir jų priežastis,
5. Pasiūlyti pjezokeraminių purkštukų tobulinimą, atsižvelgiant į išpurkšto kuro lašelių dydį, fakelo ilgį ir išpurkšto kuro kiekį, didinant jo skylučių skaičių ir kuro slėgį bei mažinant purkštuko skylučių diametrą.

# 1. PJEZOKERAMINIŲ PURKŠTUKŲ KOKYBĖS GERINIMO DYZELINIUOSE VARIKLIUOSE LITERATŪROS APŽVALGA

## 1.1. Pjezokeraminių purkštukų dyzeliniuose varikliuose tyrimai ir metodų pritaikymas

Pasaulyje vis kuriamos naujesnės ir energetinius resursus tausojančios kuro išpurškimo į variklių cilindrus sistemos, kitaip vadinamos bendrosios magistralės tiesioginio įpurškimo sistema (toliau darbe trumpinama CR). Šių sistemų pagrindinė darbinė dalis - pjezokeraminis purkštukas. Pjezo keraminiai purkštukai skirstomi į tris pagrindines kategorijas, kurios apsprendžia purkštukų techninius parametrus, t.y., darbinį kuro slėgį, kuro išpurškimo skylių skaičių. [23] Pagrindinės užsienio autorių nagrinėjamos pjezo keraminių purkštukų charakteristikos - darbinis kuro slėgis, išpurškiamų lašelių dydis, išpurškimo kampas bei skylių diametras ir jų skaičius.

Siekiant išsiaiškinti, kokie pjezokeraminių purkštukų parametrai yra nagrinėjami, siekiant pagerinti jų kokybę, autorius išanalizavo įvairių mokslininkų atliktus tyrimus. Atliktų mokslinių tyrimų analizė parodė, kurie veiksniai lemia pjezokeraminio purkštuko veikimą, o kurie neturi įtakos. Tačiau mokslininkų, kurie tirtų pjezokeraminių purkštukų kokybės gerinimą Lietuvoje nėra arba beveik nėra. Randami straipsniai tik teoriškai supažindina su bendros magistralės veikimo principu.

Toliau pateiktoje lentelėje galima matyti užsienio autorių atliktus empirinius tyrimus [12, 14, 31, 26, 32], kurie nagrinėjo bendrosios magistralės kuro išpurškimo technologijas dyzeliniuose varikliuose.

**1 lentelė.** Mokslinių tyrimų metodai ir jų rezultatai

Autorius	Tyrimas	Tyrimų kryptis	Tyrimo rezultatai	Tyrimo metodas
E. Eisen, B. Ofner, F.Mayingner (2003)	CR sistemos kuro išpurškimo technologija dyzeliniuose varikliuose	CR purkštuko , skylių diametrai, darbinio skysčio slėgis, skylių skaičius	Dideli išpurkštų degalų greičiai turi puikias maišymosi ir skalidos cilindre charakteristikas, to rezultatas mažėja CO emisijos dydžiai, didėja variklio galia	Pasinaudojant aukštos kokybės holografinėmis tyrimų priemonėmis ir formulėmis tokiomis kaip Seuterio vidutinis diametras, išpurškiamo skysčio greitis ir išpurškimo kampa.
A.Ghurri, K. Jeaduk, S.Kyu Keun et.al. (2005)	CR sistemų kokybinių ir kokybinių parametru analizė naudojant biodyzelino ir dyzelino degalų mišinį	Purkštukų išpurškiamo fakelo ilgis, išpurškiamų degalų greitis, skirtingi darbinio skysčio slėgiai.	Maksimalus išpurškiamo kuro greitis priklauso nuo kuro slėgio ir kuro tankio. Išpurškiamo fakelo ilgis priklauso nuo darbinio kuro tankio ir kuro slėgio. Biodyzelino ir dyzelino degalų mišinio maksimalus greitis didesnis nei dyzelino.	Kokybinė ir kiekybinė analizė, bandymų stendas su vaizdo kamera

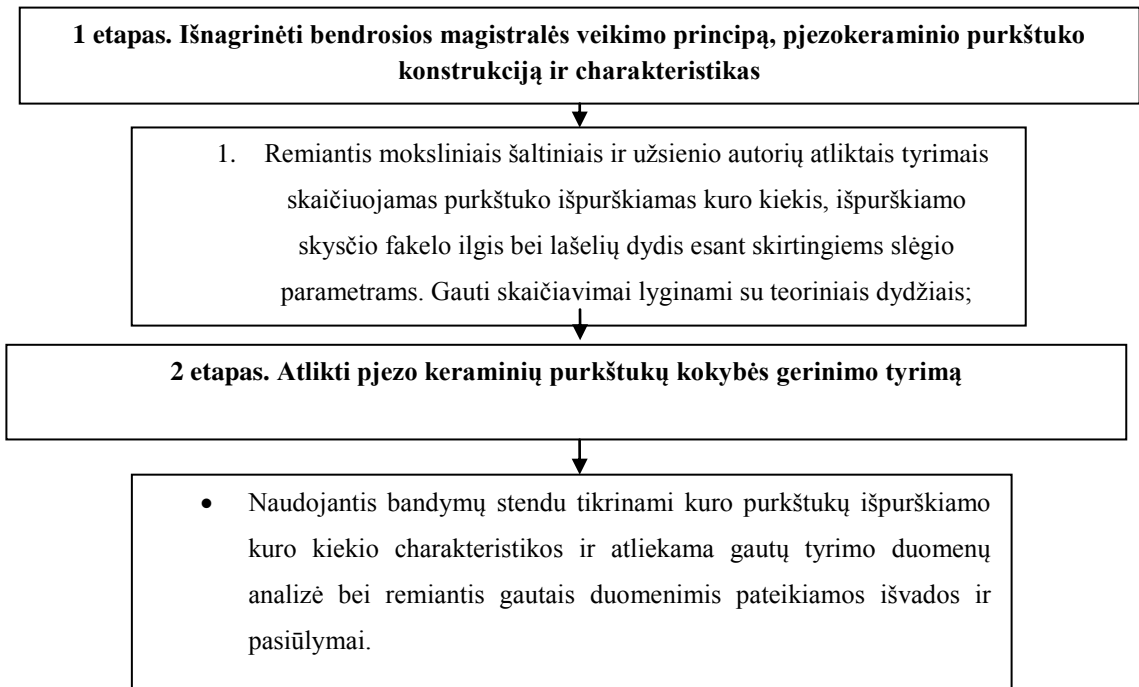
## 1 lentelės tęsinys. Mokslinių tyrimų metodai ir jų rezultatai

Autorius	Tyrimas	Tyrimų kryptis	Tyrimo rezultatai	Tyrimo metodas
Dr.J.Kech,Dr.M. Willmann, Dr. P. Gorse, Dr. M.Boog (2011)	CR sistemos kuro įpurškimas: švari ir ekonomiška technologija	Kuro slėgio didinimas, įpurškimo greitis, CO emisijų mažinimas, kuro parametrų keitimas	Kuro slėgio didinimas padėdėda sumažinti CO emisijas. Pakeitus kuro parametrus pasidaro permažas purkštuko tepimas, jis stringa. Kuo didesniu greičiu įpurškiami degalai tuo jie smulkiau susiskaido į lašelius	Kokybinė analizė
Kallkvist K. (2011)	Kuro slėgio modeliavimas CR tiesioginio kuro įpurškimo sistemoje	Kuro slėgio įtaka variklio darbui ir emisijoms	Apskaičiuotos ir pateiktos kuro kiekio, išpurškimo ilgio priklausomybių reikšmės. Pateikti modelių skaičiavimai su programa MatLab, ivertinant aerodinamines jėgas.	Mokslinių literatūros šaltinių analizė ir sintezė, statistinis tyrimas
Seykens X.L.J.,Somers L.N.T., Baert A.S.G. (2005)	Detalus CR sistemos kuro įpurškimo procesų modeliavimas	Įpurškimo sistemos aukšto slėgio dalių tokių kaip: aukšto slėgiosiurblys, purkštukai tyrimas, naudojantis AMESim programa ir rezultatų palyginimas su atliktais skaičiavimais	Išpurškimo koeficientas yra stipriai veikiamas kavitacijos, kuri mažina išpurškimo koeficiento vertę. Nustatyt purkštuko skylės išpurškiamo koeficiento reikšmė, palyginti didelė bet sutampanti su išmatuotomis vertėmis.	Lyginamoji analizė, modeliavimas AMESim programa
Willigh A. (2004)	Dyzelinių purkštukų gedimai ir jų priežastys priklausančios nuo kuro kokybės	Prastos kokybės kuro naudojamas kuro išpurškimo sistemoje	CR purkštukuose tarpeliai ir tolerancijos yra labai maži, todėl turi būti išlaikomas geras tepimas ir tiekiamas gerai išvalytas kuras	Mokslinės literatūros šaltinių analiė ir teorijų taikymas praktiniame tyrime

Taip pat pateikiami tyrimo metodai bei jų rezultatai. Atliekame tyrime remiamasi autorių atliktų tyrimų rezultatais ir tyrimo objektui analizuoti galinčiais pritaikyti metodais.

Šie autoriai tyrimuose naudojo mokslinės literatūros analizę ir sintezę, kokybinę analizę ir bandymų standus, modeliavimo ir skaičiavimų programas. Šiuos modelius galima pritaikyti pjezokeraminių purkštukų kokybės gerinimo tyrimui atlikti.

Toliau pateikiama atliekamo tyrimo etapais schema:



**1 pav.** Tyrimo schema

Atlikus teorinės dalies literatūros analizę, buvo prieita prie išvados, kad dyzelinių variklių kuro purkštukų tobulinimo tyrimui toliau darbe bus naudojama mokslinė techninė analizė ir kitų mokslinių šaltinių analizė bei atliekami skaičiavimai (pjezokeraminių purkštukų fakelo ilgio, išpurkštų lašelių dydžio ir išpurkšto kuro kiekio), kurie lyginimi su bandymo rezultatais gautais su konkrečios konstrukcijos pjezo purkštukų tikrinimo įrenginiu.

Šiuo tyrimu siekiama išsiaiškinti skysčio, paduodamo į purkštuką, slėgio įtaką kuro išpurškimo parametrams bei skysčio skaidymo smulkiadispersiais lašeliais priklausomybę nuo slėgio esant įvairiems režimams.

#### **Uždaviniai:**

1. Nustatyti kuro išpurškimo charakteristikas.
2. Pateikti skysčio dozės priklausomybę nuo paduodamo skysčio slėgio;
3. Pateikti lašelių skersmens priklausomybę nuo paduodamo skysčio slėgio;
4. Pateikti skysčio lašelių fakelio ilgio priklausomybę nuo paduodamo skysčio slėgio;
5. Ištirti prie kokios skysčio slėgio priklausomybės gaunami optimalūs rezultatai siekiant patobulinti purkštukų išpurškiamo kuro parametrus.

## 2.1. Pjezokeraminių purkštukų funkcionavimo trikdžiai ir pasekmės

Dyzelinių kuro sistemų agregatų darbas priklauso nuo kuro kokybės. Jei naudojamas prastos kokybės dyzelinis kuras, kuro purkštukas gali netinkamai įpurkšti kurą, pasikeisti įpurškiamo kuro fakelo ilgis. Kiti trikdžiai dažniausiai, kaip jau buvo minėta anksčiau, atsiranda dėl blogų kuro savybių arba prastų kuro filtravimo įrengimų.

Pasėkmės, kurias šie trikdžiai sukelia gali būti labai įvairios, tačiau dažniausiai pasitaikančios kaip savo tyrime teigia autorius [18] yra pjezo keraminio purkštuko adatos strygimas, skylučių užsikimšimas, purkštuko darbinės dalies sudylimas. Reikia paminėti, kad pjezo keraminių kuro purkštukų tarpeliai tarp adatos ir korpuso būna tik nuo  $1\ \mu$  iki  $1.5\ \mu$ .

Taip pat, kaip teigia autorius [31], keičiasi purkštuko kuro išpurškimo kiekis, lašelių sklaida, lašelių dydis ir išpurškiamo kuro kampas, kuriam pasikeitus kuras išpurškiamas klaidinga trajektorija. Tokio prasto kuro išpurškimo pasekmė gali būti:

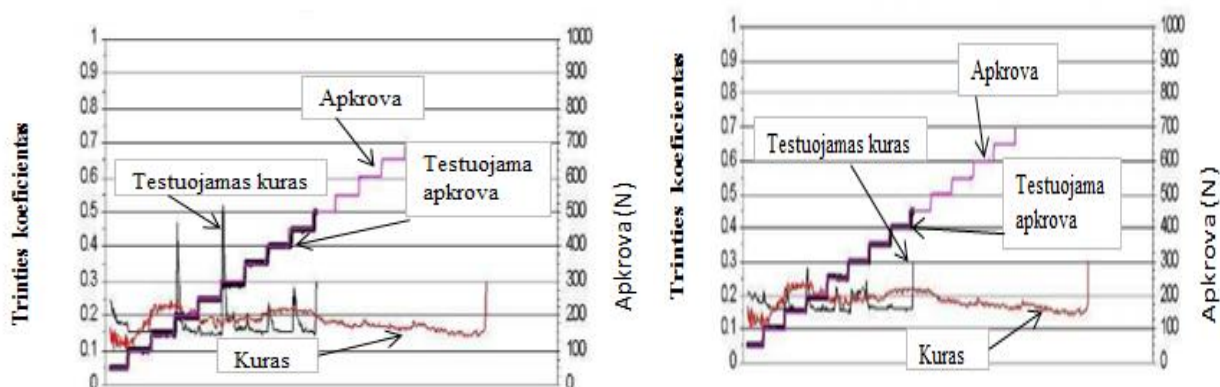
- Sugadintas variklis;
- Didelės kuro sąnaudos;
- Padidėjusi CO<sub>2</sub> emisija.



**2pav.** Geras ir blogas kuro išpurškimas iš purkštuko (iš kairės į dešinę) [19]

Kaip buvo minėta anksčiau, dar vienas iš dažniausiai pasitaikančių kuro purkštukų sudilimo priežasčių – prastas kuro valymas kitaip tariant, mažomis abrazyvinėmis dalelėmis ir kitomis priemaišomis užterštas kuras. Kuro nešvarumo lygis gali būti sąlygojamas filtravimo proceso.

Užsienio autoriai [31, 18] tirdami šį reiškinį naudoja smulkių dalelių valymo filtrus. Iš toliau pateiktų grafikų matome pateiktus du pavyzdžius.



**3pav.** Abrazyvinių dalelių kure būvimas prieš ir po valymo

Šie pavyzdžiai parodo mažas abrazyvines daleles, likusias po kuro išvalymo. Autorius [31] naudojo filtrą, kuris išvalo iki 0,4 mikronų dydžio daleles prieš atlikdamas testą. Tačiau kaip matome iš pateiktų pavyzdžių, kure vistiek dar liko neišvalytų dalelių. Abrazyvinių dalelių, kurias rodo paveikslo dešinėje esantis grafikas (juodos spalvos grafiko linijos šokinėjimas). Šios abrazyvinės dalelės, likusios kure gali sugadinti net ir naujausius pjezokeraminius purkštukus.

Norint išsaugoti gerą kuro purkštukų kokybę turi būti naudojami pagal Europos sąjungos standartą EN 590 gaminamas ir švarus kuras.[31]

## 2. PJEZOKERAMINIŲ PURKŠTUKŲ KOKYBĖS GERINIMO TYRIMAS

### 2.1. Bendrosios magistralės ir kuro purkštuko veikimo principas

Visų pirma, šiuolaikiniuose dyzeliniuose varikliuose pjezokeraminių purkštukų naudojimas masinei gamybai pradėtas tik apie 1997 metus autobomiliuose. Tuo metu ši nauja technologija pralenkė laiką. Anksčiau šių purkštukų panaudojimas nebuvo toks populiarus dėl didelės gaminio savikainos bei elektros prietaisų galinčių valdyti pjezokeraminių purkštukų įpurškimo procesą. [10]

Pirmąjį CR prototipą sukūrė šveicarų mokslininkai 1960 m. Vėliau, 1990 – 1995 m., didelį įdirbį atliko Magneti Marelli ir Fiat kompanijų inžinieriai. 1995 metais Denso Corporation pagamino krovinį automobilį „Hino Raising Ranger“ su CR sistema, pavadinta ECD-U2. [8,19, 30]

CR sistema suprantama kaip degalų įpurškimo sistema, kurioje degalai tiekiami į skirstymo vamzdį, o iš jo pjezokeramika valdomais purkštukais įpurškiami į cilindrus. CR sistemoje degalų įpurškimo slėgis nepriklauso nuo variklio sukimosi dažnio ir įpurškiamų degalų kiekio.

Kalbant apie purkštukų veikimo procesą, degalų įpurškimo slėgį galima rinktis priklausomai nuo duotų ribų kurios dažnai būna skirtingos kiekvienam variklio tipui. Tai dar vienas privalumas, kuris automobilių variklių konstrutoriams suteikia daugiau laisvės optimizuojant degimo procesą. [10]

Reikia atkreipti dėmesį, kad analizuojant literatūrą pastebėta, jog naujųjų kuro purkštukų įpurškimo principas panašus į senųjų. Pirmame paveiksle parodytas hidraulinis purkštukas:

Kaip matome iš 4 paveikslo, purkštukais degalai įpurškiami į variklio cilindrus. Numeriu 1 pažymėta išpurškimo vieta, iš kurios įpurškiami reikiamo dydžio lašeliais degalai ir paskirstomi degimo kameroje bei galutinai formuojama įpurškimo charakteristika.



**4 pav.** Hidraulinis purkštukas

Be to, automobilių varikliuose naudojami uždarieji purkštukai. Pastarieji purkštukai turi adatas, kurios pasibaigus degalų įpurškimui į cilindrą sandariai atskiria įpurškimo sistemą nuo degimo kameros.

Įpurškimo siurblio tiekiami degalai purkštuko kanalais patenka į slėgio kamerą, kurioje yra sumontuotos adatos kreipiančiosios. Jų skersmuo yra didesnis už lizdo skersmenį. Taip degalų slėgis veikdamas į plotą lygų adatos skerspjuvio plotui ir ploto, kurį uždengia lizdas, skirtumui. Degalų slėgio jėgai viršijus spyruoklės suspaudimo jėgą adata pakyla ir purkštukas atsidaro. Pakilus adatai degalų slėgis staigiai mažėja, o degalai pro skylutes išpurškiami į cilindrą. Purškimo metu atsiranda slėgio svyravai dėl kurių adata dideliu dažniu juda aukštyn ir žemyn taip pagerindama degalų išpurškimo kokybę, kol degalų slėgis pasiekia tokią pat jėgą kaip spyruoklės suspaudimo jėga. Degalų slėgiui ir toliau mažėjant spyruoklės jėga viršija degalų slėgio jėgą. Tuomet adata leidžiasi žemyn ir purkštuko ertmės yra uždaromos. Tokie purkštukai yra vadinami hidrauliškai valdomais. Šie senieji purkštukai variklio vieno takto darbo metu kurą sugebėdavo įpuršti tik vieną kartą. [10]

Tobulėjant CR sistemai, pirmieji pjezokerminiai purkštukai vieno takto metu sugebėdavo įpuršti 3 kartus. Šiuolaikiniai pjezokeraminiai purkštukai geba įpuršti vieno takto metu iki 7 kartų. CR sistemos purkštukas ir veikimo principas parodytas atitinkamai 5 paveiksle.



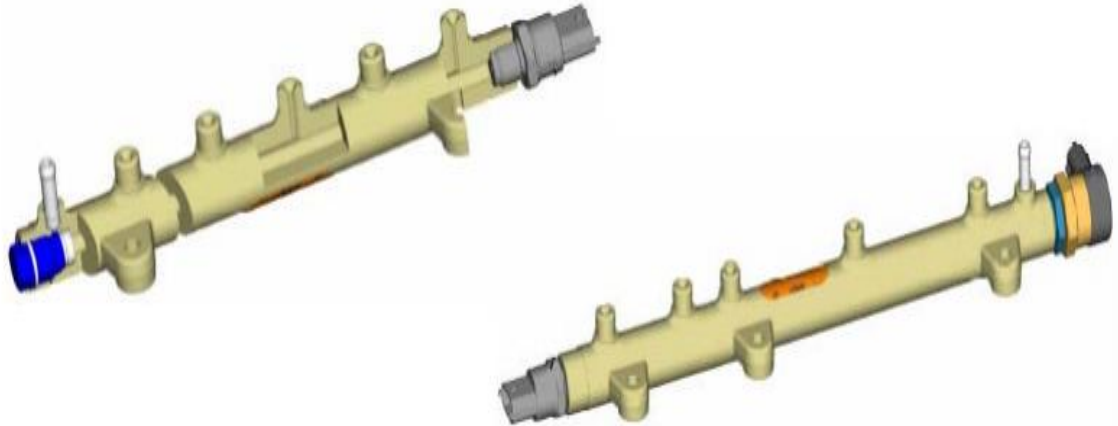
**5 pav.** CR sistema (iš kairės į dešinę): CR purkštukai, CR purkštukai įmontuoti variklyje, CR purkštuko pjūvis [17]

Kaip matome iš 7 paveikslo, į purkštuką patenkantys degalai iš aukšto slėgio magistralės (degalų akumulatoriaus (6 paveikslas) patenka į nupylimo ir tiekimo antvamzdžius. Iš jų degalai toliau keliauja degalų tiekimo kanalais iki adatos, kurią valdo pjezokeraminiai elementai. Kai reikia įpuršti



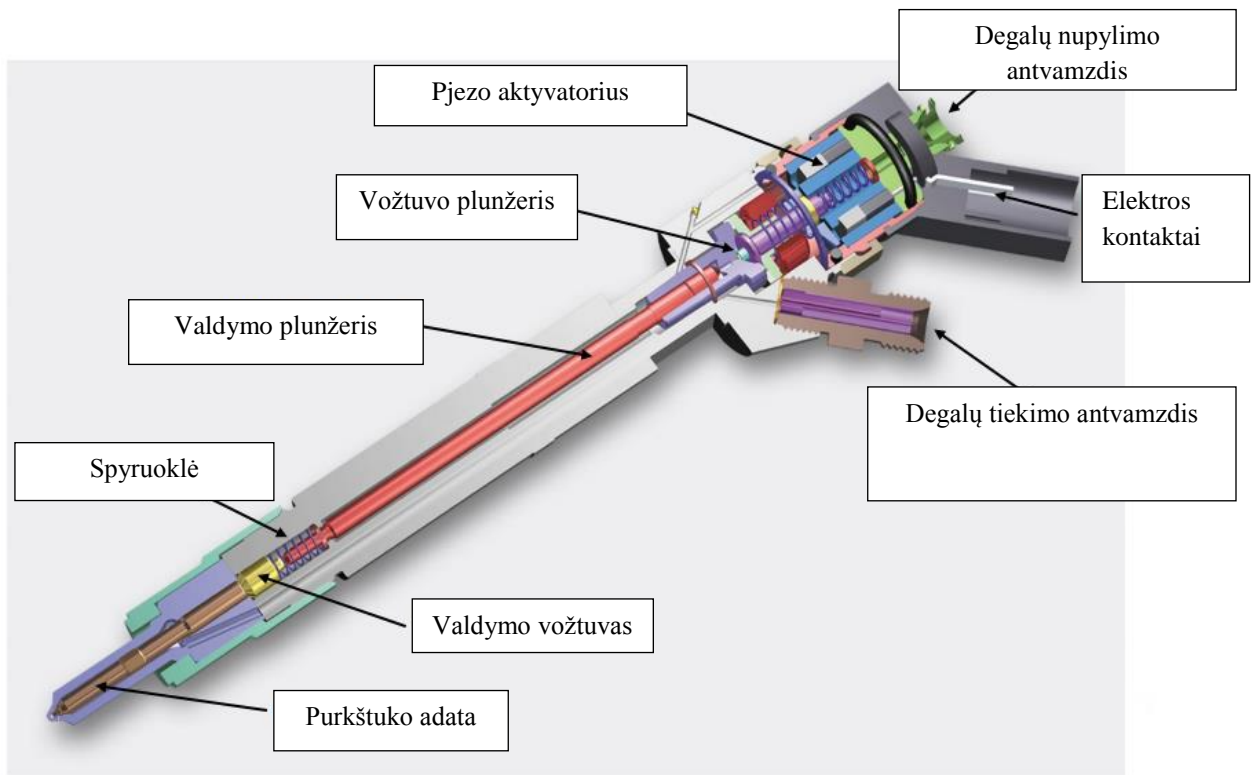
degalus į pjezo keraminį elementą, yra paduodama elektros srovė, kuri lygi dvidešimčiai amperų. Vėliau srovė sumažinama iki palaikymo srovės – 12 amperų. Susitraukdami pjezokeraminiai elementai pakelia adatą ir atidaroma ertmė per kurią degalai išpurškiami į variklio cilindrą. [10, 31]

Purkštuko adatos atidarymo laikas priklauso ir nuo degalų debitų skirtumo tekančių pro droselius. Nutraukus srovės tiekimą purkštuve esanti spyruoklė spaudžia inkarą ir uždaro nupylimo vožtuvą. Šiam užsidarius valdymo erdvėje greitai padidėja slėgis ir purkštuko adatą prispaudžiama prie lizdo.



**6 pav.** Degalų akumulatorius [17]

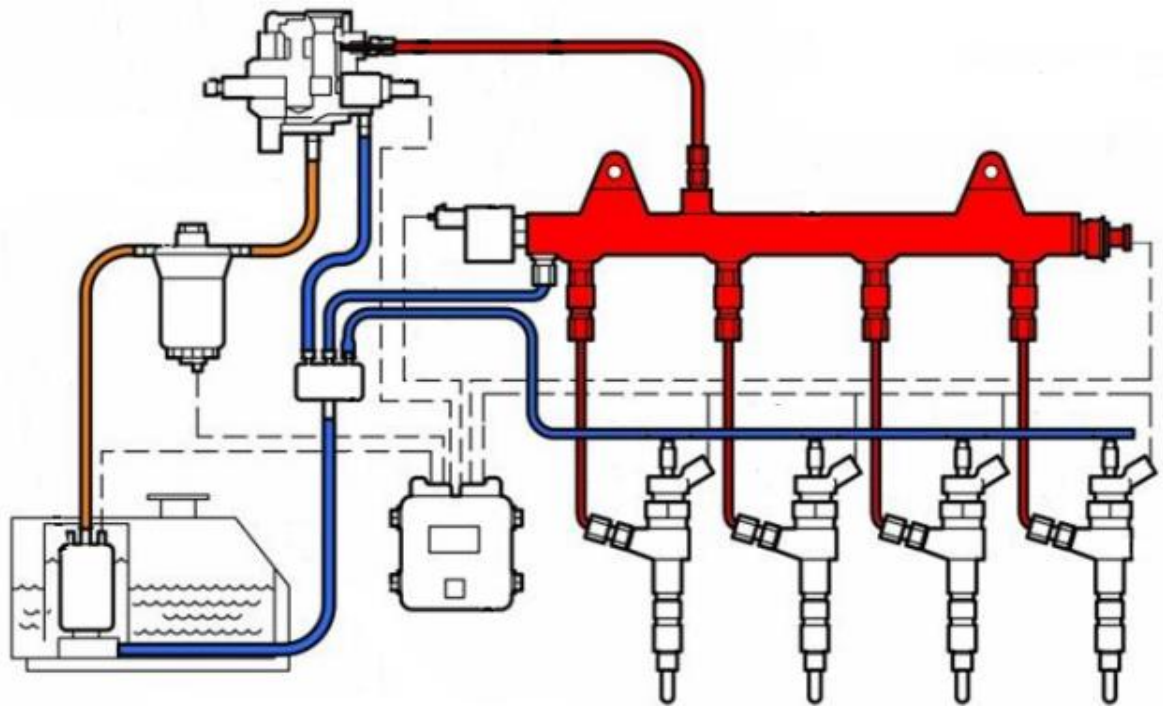
Tokiais purkštukais įpurškiamų degalų kiekis keičiamas valdant elektros impulso trukmę. Kuo ilgesnė impulso trukmė tuo ilgiau purkštukas yra atidarytas ir to pasėkoje yra įpurškiama daugiau degalų bei atvirškčiai, purkštukui esant uždarytam, degalai į cilindrą nėra įpurškiami (7 pav.).



**7 pav.** CR purkštukų sudedamosios dalys [17]

Kalbant apie degalų akumuliatorių (6 pav.), šis prietaisas reikalingas tam, kad palaikytų degalų slėgį tiekimo sistemoje. Kaip matome pateiktame 7 paveiksle, raudonai yra pažymėtas degalų akumuliatorius bei aukšto kuro slėgio tiekimo magistralė. Mėlyna spalva pažymėta perteklinio kuro gražinimo magistralės schema, o geltona spalva – žemo kuro slėgio padavimo sistema. Šios trys sistemos yra pagrindinės sudedamosios CR sistemos dalys.

Be to degalų akumuliatorius yra naudojamas norint palengvinti variklio užvedimą - akumuliatoriuje lieka suslėgtas kuras kuris padeda variklį užkurti antrą kartą po jo užgesinimo.



**8 pav.** Dizelinė CR sistema [17]

Tobulėjant pjezokeraminiams purkštukams buvo sukurti vadinamieji „in-line“ purkštukai, kuriuose nebeliko valdymo plundžerio, o pjezokeraminis akvytavatorius įtvirtintas šalia valdymo vožtuvo. Dėl mažesnės judančių detalių masės nei senesniuose purkštukų modeliuose, dar labiau padidėjo purkštuvo atidarymo ir uždarymo greitis. Šiais purkštukais, vieną įpurškimo ciklą galima padalinti net į penkias dalis, t.y. leidžiantis stumokliui per tą laiką kuras įpurškiamas penkis kartus į cilindrą. Šį ciklą galima padalyti į du pagalbinius įpurškimus ir du pagrindinius bei vieną įpuršimą išsiplėtimo fazėje. Toks įpurškiamų degalų dalinimas į keletą dalių cilindre leidžia tiksliau valdyti degimo procesą ir padidinti galią bei sumažinti degalų sąnaudas. [10]

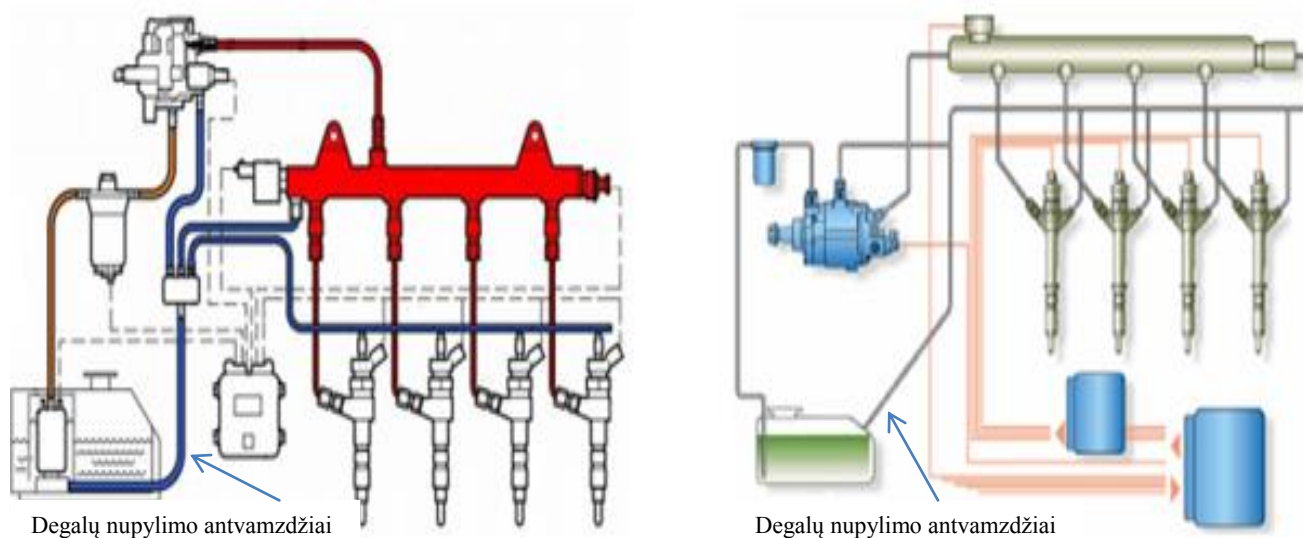
Kalbant apie kuro slėgius, daugelis automobilių gamintojų naudojo skirtingus slėgius ir laikui bėgant bei keičiantis automobilio variklio veikimo principams slėgiui išliko skirtingi, tačiau kuro purkštukai tapo unifikuoti. Maksimalūs kuro slėgiai tipinėje CR sistemoje pavyzdžiai pateikiami 2 lentelėje.

**2 lentelė.** Maksimalaus kuro slėgio vystymasis pagal gamintojus [5,8]

Gamintojas	Gamybos generacija	Slėgis	Pavyzdys
Bosch	1 karta	Iki 1350 Bar (19845 psi)	Unijet
	2 karta	Iki 1600 Bar (23520 psi)	EDC 16
	3 karta	Iki 2000 Bar + (29400 psi)	-
Denso	1 karta	Iki 1450 Bar (21315 psi)	ECD-U2P
	2 karta	1800 Bar + (26460 psi)	HP3/HP4
Delphi	Multec	Iki 2000 Bar	-
	Tiesioginio veikimo dyzelinė CR sistema	Iki 2000 Bar	-

Kaip galima pastebėti iš pateiktos lentelės, gamintojai siekė konkuruoti tarpusavyje kurdami didesnius slėgius CR sistemose ir tobulindami senesnius variklius. Be to, įvairios sistemos yra skirtingų dizainų, skiriasi komponentų pavyzdžiais ir funkcijų specifikacijomis. Tačiau, visos veikia analogišku principu. [8]

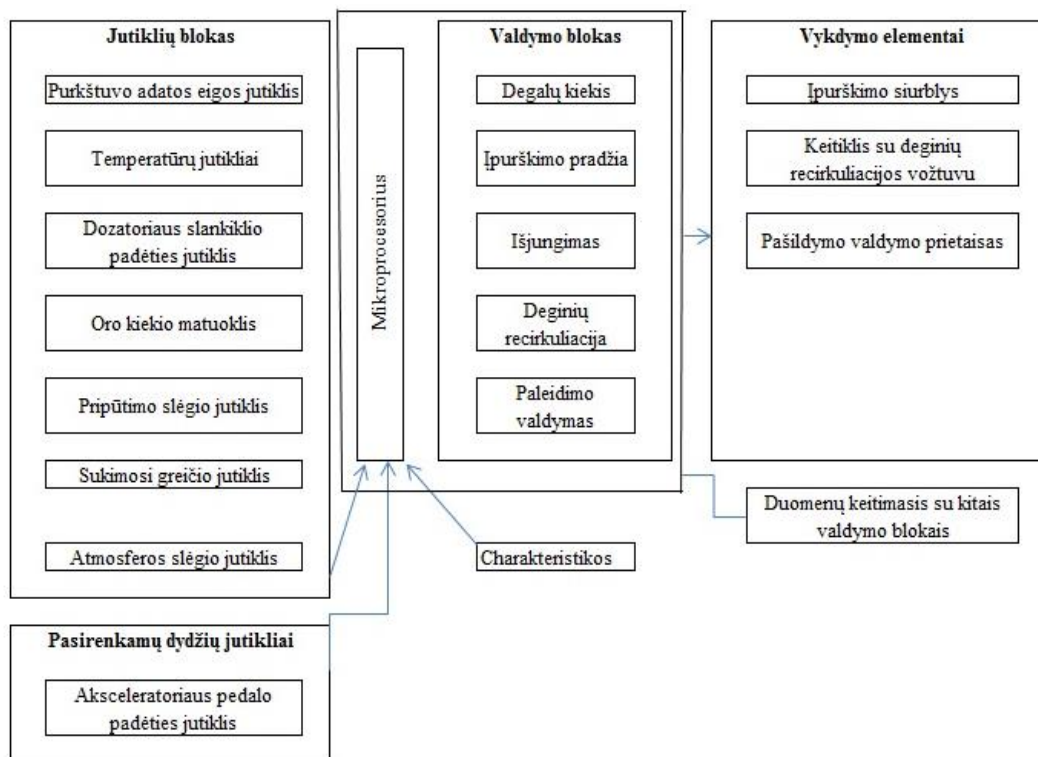
Kaip parodyta Bosch ir Denso gaminamos produkcijos pavyzdyje, pateiktame 9 paveiksle, Denso ECD-U2P sistemoje nepanaudotas kuras grąžinamas ne į rezervuarą, bet tiekiamas į tam skirtus aušintuvus, kurie paveikslėlyje yra pažymėti mėlyna spalva. Tuo tarpu Bosch EDC 16 sistemoje nepanaudotas kuras yra grąžinamas tiesiai į rezervuarą ir ten ataušinamas.



**9 pav.** Bosch EDC 16 ir Denso ECD-U2P CR sistemos (iš kairės į dešinę) [5]

Oranžine spalva (Bosch EDC 16) pažymėtas žemo slėgio tiekimas. Trumpai tariant, maitinimo siurblys iš degalų bako reikiamu slėgiu tiekia degalus didelio slėgio degalų siurbliui. Tam tikslui naudojami elektriniai, tokie pat kaip ir bezino įpurškimo sistemose arba mechaniniai krumpliaratiniai maitinimo siurbliai. Kita sistema pažymėta raudonai (Bosch EDC 16). Didelio slėgio siurblys degalus spaudžia į akumuliatorių ir jame sukuria degalams įpurkšti reikalingą slėgį. Tai didelio slėgio degalų tiekimo sistema, kuri degalų įpurškimui reikalingą slėgį elektronikos būdu yra paskirstoma atskiriems cilindrams. [5]

Kalbant apie EDC ( angl. Electronics diesel control) sistemą, ji sudaryta iš trijų pagrindinių sisteminių blokų (10 paveikslas). Pirmasis blokas tai darbo režimo registravimo jutiklių blokas, kuris įvairius fizikinius dydžius paverčia elektriniais signalais. Antrasis valdymo blokas vadinamas pagrindiniu bloku su mikroprocesoriumi, kuris apdoroja informaciją, gautą iš pirmojo bloko pagal tam tikrus reguliavimo algoritmus, ir formuoja elektrinius išėjimo signalus. Trečiasis blokas – vykdymo mechanizmo blokas, kuris valdymo bloko išėjimo elektrinius signalus paverčia mechaniniais dydžiais.[10]



**10 pav.** Dyzelinio variklio elektroninio reguliavimo blokinė schema [10]

Analizuojant paveikslą, taip pat galime pridurti, kad vykdyimo mechanizmai bei jutikliai sudaro grandį. Ši grandis sujungia elektroninio valdymo bloką su varikliu. Jutikliai registruoja variklio darbo režimą ir sąlygas: sukimosi greitį, variklio ir degalų temperatūrą, tiekiamo oro masę į cilindrus, kitų jutiklių padėtis. Elektroninis valdymo blokas apdorotus duomenis pakeičia į elektrinius signalus, kuriuos siunčia vykdyimo elementams, t.y. reguliuoja degalų kiekio tiekimą, degalų įpurškimo pradžią, deginių recirkuliaciją bei keičiasi informacija su kitais valdymo blokais.

Galime padaryti išvadą, kad dozuojamoms medžiagoms dinaminės charakteristikos (šiuo atveju kuro) kinta priklausomai nuo vibrodozatoriaus sužadinimo parametrų. Tai yra nuo impulso trukmės, dažnio ir amplitudės dydžio. Tai leidžia lengvai valdyti padavimo greitį ir dozės dydį įpurškimo metu.

Kadangi pagrindinis aktyvus purkštuko elementas yra pjezokeraminės medžiagos tad visų vibracinių įtaisų techninės charakteristikos priklauso nuo elektromechaninių šių medžiagų savybių. Todėl labai svarbu aprašyti pjezokeraminio purkštuko medžiagų veikimo principą, kuris pateikiamas sekančiame poskyryje.

### **2.2.1. Bendrosios magistralės privalumai ir nauda**

Pagrindiniai privalumai ir CR sistemos nauda yra pateikiama lentelėje [18, 27, 28]:

**3 lentelė.** CR sistemos privalumai ir nauda

<b>Privalumai</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kuro spaudimas tiekiamas pagal pareikalavimą;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Didelis įpurškimo spaudimas ir geresnis kuro išsklaidymas;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Įpurškimo slėgis sukurtas nepriklausomai nuo variklio apsisukimų;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Įmanomas sudėtinis įpurškimas per cilindro degimą .</li> </ul>
<b>Nauda</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mažinama išmetamųjų dujų emisija;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mažinama kietųjų dalelių emisija;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mažinama triukšmo emisija;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pagerinama kuro veiksminguma;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geresnės eksploatacinės savybės.</li> </ul>

Kaip matome iš lentelės CR sistema turi nemažai privalumų ir naudos. Tačiau reikia paminėti ir viena trūkumą, tai aukšti reikalavimai dyzeliniam kurui. Pavyzdžiui, Amerikoje tokios dyzelinės sistemos automobiliuose yra praktiškai nenaudojamos dėl to, kad šioje šalyje kuro kokybė yra labai žema, o dėl nekokybiško kuro ir biodyzelino naudojimo pasitaiko dažni CR sistemos gedimai – užteršiami purkštukai.

## **2.2. Pjezokeraminio purkštuko medžiagų veikimo principas**

Praeitame poskyryje buvo aprašomas CR sistemos veikimo principas dyzeliniuose varikliuose, lyginant juos su skirtingų gamintojų varikliais. Šiame poskyryje bus aprašoma kaip veikia pjezokeraminė purkštuko dalis: aprašomas pjezo efektas, pjezoelektrikų struktūra ir pjezoelementų charakteristikos.

Visų pirma, verta paminėti, kad pjezoefektas pirmą kartą pritaikytas Pirmojo pasaulinio karo metais apie 1914 m. Tačiau technikos srityje plačiau pradėtas diegti tik įvairius pjezomedžiagų gamybos technologijas ir metodus. Vieni pirmųjų patentų panaudojant pjezokeraminių medžiagų savybes skysčiams dozuoti ir transportuoti buvo užregistruoti 1964 m. Jungtinėse Amerikos Valstijose. [10]

Antra, pjezoelektrinių savybių turi gamtoje randamos medžiagos. Viena labiausiai žinomų medžiagų yra kvarcas (11 pav.).

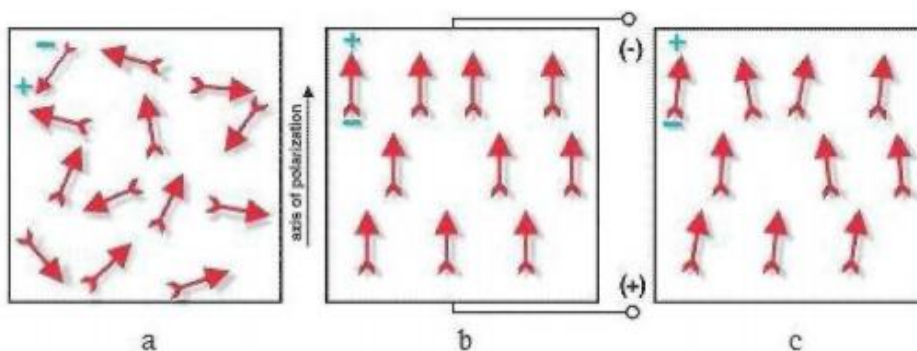


**11 pav.** Kvarco kristalai

Tačiau įvairiems technikos poreikiams yra naudojama pjezokeramika, kuri turi pjezokristalinę struktūrą, sudarytą iš kristalitų turinčių domenininę struktūrą ir skirtingą kristalografinių ašių išdėstymą bei pasižyminčių segnetoelektrinėmis savybėmis. Kadangi pjezokeraminių medžiagų savybės priklauso nuo gamybos technologijos, šiuo metu įvairiuose precizinės technikos ir technologijos įtaisuose plačiausiai naudojamos pjezokermanės medžiagos – švino titanatas – cirkonatas ( $\text{PbTiO}_3 - \text{PBZrO}_3$ ). Taip pat [22] gali būti naudojamos ir kitos daugiakomponentės sistemos, kurios sudarytos iš tų pačių arba panašių bazinių cheminių elementų pagrindu. Šie elementai yra skirstomi į keturias pagrindines grupes. Pirmoji grupė, kaip jau buvo minėta tekste yra randama gamtoje. Tai kvarcas, segneto druska, berlinitai bei topazas. Kita grupė yra sudaryta iš sintetinių elementų kaip langasitai ( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ), amonio ir galio ortofosfatai. Trečioji grupė yra keramikos elementai – bario titanatas ( $\text{BaTiO}_3$ ) ir švino titanatas ( $\text{PbTiO}_3$ ) bei švino cirkonatas-titanatas ( $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ ). Paskutinė, ketvirtoji grupė yra sudaryta iš polimerų. Šioje grupėje svarbus elementas yra polivinildenfluoridas (PVDF).[20]

Kadangi pagaminti pjezokeramikos elementai yra izotropiški, jie neturi pjezoelektrinių savybių dėl jų elektrinių dipolių orientacijos, kuri yra chaotiška. Kad pjezoelektrinės savybės atsirastų, būtinas elektrinių dipolių poliškumas – orientacija elektrinio lauko atžvilgiu. Prie pjezoelektrikų pridėjus elektrinį lauką, kuris didina elementariųjų grūdelių poliarizaciją, pjezoelektriko geometriniai matmenys padidėja. Tačiau jei pridėsime elektrinį lauką, mažinantį grūdelių poliarizaciją, pjezoelektrikų geometriniai matmenys sumažėja. Būtent ši pjezoelektrikų savybė yra pritaikoma įvairiose technikos bei mokslo srityse.

Pjezoelektrikų struktūra parodyta 12 paveiksle [11]:

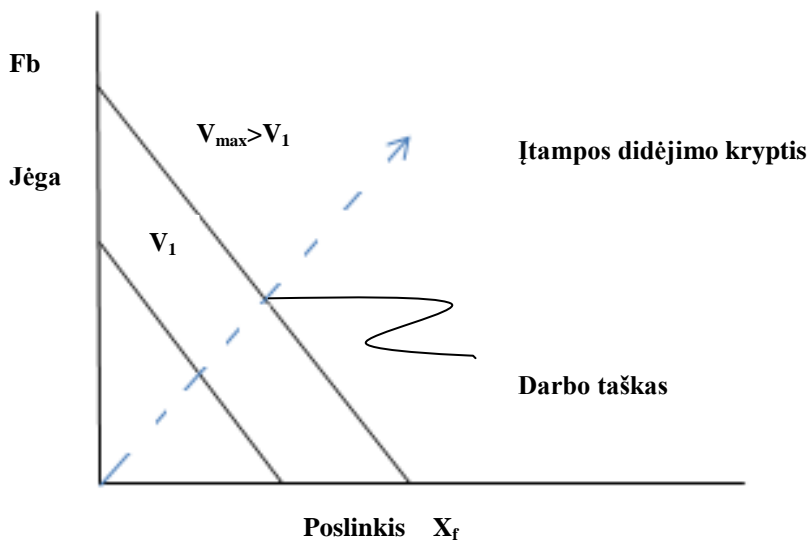


**12 pav.** Pjezoelektrikų struktūra: a – nesant elektriniam laukui, b – lauke tempenčiame elementą, c – po poliarizacijos



Kaip jau buvo minėta anksčiau, pjezoelementai yra dažniausiai naudojami dėl jų gebėjimo padidėti arba susitraukti. Ši savybė yra labai svarbi naudojant juos įrenginiuose, kuriuose reikia tikslumo ir preciziškumo.

Toliau kalbant apie pjezoelementus, pastarieji paprastai yra apibūdinami laisvuju poslinkiu bei užblokuotąją jėgą (13 pav.). [7]



**13 pav.** Pjezoelemento charakteristika: jėga – poslinkis

Laisvasis poslinkis, tai poslinkis gaunamas esant maksimaliai rekomenduojamai įtampai, kai pjezoelementas yra nesuvaržytas bei neturi nugalėti pasipriešinimo jėgų. Tuo tarpu užblokuotoji jėga yra apibūdinama kaip jėga, kurią išvysto pjezoelementas esant maksimaliai rekomenduojamai įtampai bei kai jis yra visiškai užblokuotas ir jo matmenų pokytis yra negalimas. Maksimali jėga gaunama tada, kai matmenų pokytis yra lygus nuliui, o maksimalus poslinkis, kai išvystoma jėga yra lygi taip pat nuliui. [11]

Taigi, galime daryti išvadą, kad pjezoelektrinių savybių turinčios medžiagos mechaninį poveikį paverčia elektriniu impulsu ir atvirkščiai. Įrengimai su šiomis medžiagomis yra kompaktiškesni, jautresni valdymui bei jų didesnis naudingumo koeficientas, taip pat jie nereikalauja ypatingos priežiūros eksploataciniu laikotarpiu. Tačiau pjezoelektrinėse porose vyksta dilimas kaip ir kituose mechanizmuose. Šis dilimas ardo pjezomedžiagos paviršių ir sutrumpina įrenginio darbingumo laiką.

### **2.3. Pjezokeraminių purkštukų kokybės gerinimo problematika**

Norint pagerinti purkštukų kokybę, autorius pastebėjo, kad Lietuvoje atlikti tokį bandymą yra sudėtinga. Visų pirma yra susiduriama su keletu pagrindinių problemų:

- Lietuvoje nėra tinkamų bandymų stendų;
- Nėra atliktų lietuvių autorių tyrimų tiriant pjezokeraminius purkštukus;

Pirmoji problema riboja tyrimą, nes tinkamais bandymų stendais yra įvardijami tie kuriuose naudojamos didelės raiškos vaizdo kameros, lazeriniai jutikliai ir kita sudėtinga įranga, kurios pagalba būtų galima nustatyti ne tik kuro purkštukų išpurškiamo kuro kiekį per tam tikrą laiką bet ir lašelių dydį, išpurkštų lašelių fakelo nuotolį.

Antroji problema rodo, kad ši tema dar yra mažai išnagrinėta, nors pjezo keraminiai purkštukai rinkoje jau yra ilgiau kaip 18 metų. Panašios konstrukcijos purkštukai yra naudojami iki šiol ir jų gamintojai deda nemažai pastangų juos tobulindami siekiant pagerinti jų kokybę.

Galiausiai reikia paminėti, kad užsienio autoriai daugiau nagrinėja CR sistemos valdymo bloko tobulinimo galimybes ir mažiau dėmesio skiria patiems purkštukams.

### **2.4. Dyzelinio kuro purkštuko išpurškimo charakteristikos ir skaičiavimo metodai**

Nuo pjezo keraminių purkštukų atsiradimo, šie prietaisai buvo nuolat tobulinami: naudojamos medžiagos keičiamos į naujesnes, atsparesnes dilimui bei aukštai darbinei temperatūrai, purkštukų galvutėse esančios skylutės taip pat pakeitė prieš tai buvusius diametrus. Pastariesiems diametrams sumažėjus, didėjo skylučių skaičius, išpurškiamo kuro slėgis.

Dyzelinuose varikliuose purkštukų temperatūra pakyla iki 815 laipsnių pagal celsijų, o darbinis kuro slėgis siekia iki 2000 barų. Gaminant tokius purkštukus reikia labai mažų tolerancijų, o nukrypimai negali siekti daugiau kaip vieną mikrometrą. Darbiniai paviršiai turi būti apsaugoti nuo neigiamo atmosferos poveikio bei degaluose pasitaikančios drėgmės.

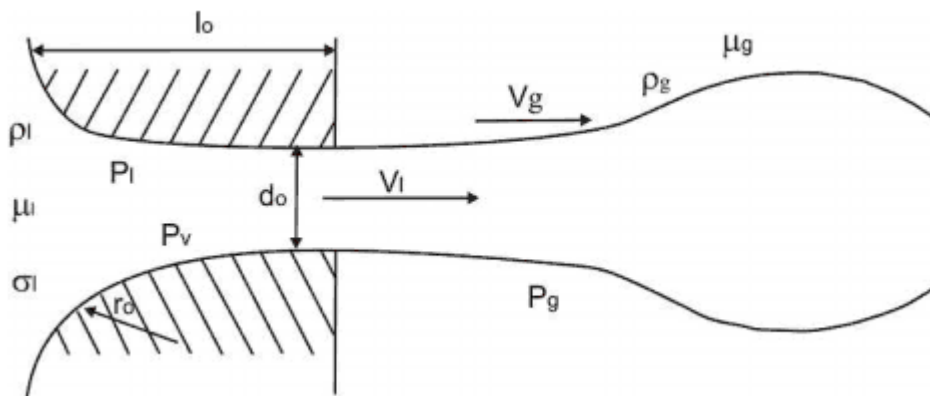
Šiuolaikiniuose purkštukuose esančių skylių bendri diametrai dažnai siekia nuo 115 iki 200 mikronų. Kaip jau buvo minėta, pagrindinės sudedamosios dalys sudarančios CR sistemą yra: kuro bakas, aukšto slėgio siurblys, kuro akumuliatorius ir pjezo keraminiai purkštukai. Kuras iš bako tiekiamas į aukšto slėgio siurblių iš jo į kuro akumuliatorių ir išpurškiamas per elektroniniu būdu valdomus purkštukus. Purkštukai skirti išpurkšti degalus į cilindrą, kuriame nuo susidarančių oro

srautų sumaišomas degusis oro ir kuro mišinys. Degalų akumuliatoriuje atsirandantys slėgio svyravimai išlyginami kuro nuleidimo vožtuvu. [10]

Per paskutiniuosius dešimt metų buvo atlikta nemažai tyrimų siekiant patobulinti CR sistemą. Pirmuosius tyrimus atliko ir pirmuosius purkštukus panaudojo Volvo kompanija 1993 metais. Vėliau 1995 metais ši sistema buvo pradėta plačiau naudoti ir kitų gamintojų. Su CR degalų įpurškimo sistema, degimo procesas gali būti optimizuotas siekiant mažo teršalų lygio kartu su mažesnėmis degalų sąnaudomis. Kuras įpurškiamas į degimo kamerą iš CR esant aukštam slėgiui. Elektroninė valdymo sistema užtikrina, kad įpurškimo pradžia, kiekis ir laikas būtų nepriklausomi nuo variklio greičio. [17, 10]

Kadangi vienas iš svarbiausių kriterijų, kuris apibūdina CR purkštuką yra jo skylių kiekis bei jų diametras tyrimo metu siekiant tikslo bandoma išsiaiškinti kokio skersmens ir skylių kiekio derinys yra pats optimaliausias išpurškiant kurą į variklio cilindrą, kad jame susimaišytų tinkamos konsistencijos degusis mišinys. Pastarasis mišinys padeda taupyti degalus, mažina CO<sub>2</sub> emisiją bei padeda išgauti maksimalią galią.

Norint tiksliai ir išsamiai suprasti išpurškimo procesą, vykstantį purkštuke reikia tiksliai išanalizuoti purkštuko antgalį sudarančius fizikinius parametrus. Autorių [2] sudarytoje scheme, kuri pateikiama 14 paveiksle, vaizduoti esminiai kintamieji apibūdinantys įpurškimo procesą:



**14 pav.** Svarbiausi kintamieji apibūdinantys išpurškimo procesą

Remiantis anksčiau minėtų autorių sudaryta schema, kurioje pateikiami kintamieji, darantys įtaką purkštuko išpurškimo sklaidai, pateikiama 4 lentelė. Šioje lentelėje gerai matyti kintamųjų grupės: skylių geometrija, įpurškimo sąlygos, įpurškiamo skysčio parametrai, darbinio skysčio ypatybės. [9, 12, 21]

**4 lentelė.** Kintamieji, įtakojantys purškuko veikimą

Skylės geometrija	Įpurškimo sąlygos	Išpurškiamo skysčio parametrai	Dujų į kurias įpurškiamas skystis parametrai
Angos diametras ( $d_0$ )	Išpurškiamo skysčio slėgis ( $P_1$ )	Tankis ( $\rho$ , $\text{kg/m}^3$ )	Tankis ( $\rho_g$ , $\text{kg/m}^3$ )
Angos ilgis ( $l_0$ )	Aplinkos dujų slėgis ( $P_2$ )	Skysčio kinematinis klampumo koeficientas ( $\mu$ )	Kinematinis klampumas ( $\mu_2$ )
Angos išėjimo spindulio ilgis ( $r_0$ )	Slėgio pokytis ( $\Delta P = P_1 - P_2$ )	Paviršiaus įtempimo koeficientas ( $\sigma$ , $\text{mN/m}$ )	
	Vidutinis išpurškiamo skysčio greitis ( $V_s$ )		

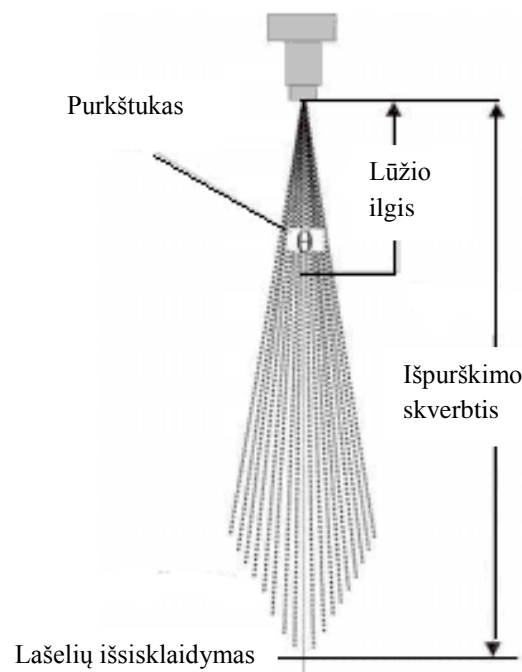
Visi šie kintamieji gali būti pritaikomi bedimensinėse formose. Tai leidžia supaprastinti skaičiavimus ir susieti ryšius. Šie bedimensiniai kintamieji naudojami daugelyje atveju atliekant skaičiavimus:

- Reinoldso skaičius. Ryšys tarp inercinių ir klampos jėgų  $Re$ ;
- Weberio skaičius. Ryšys tarp paviršinio įtempimo ir inercijos jėgų  $We$ ;
- Teilorio kalmpos parametras  $Ta$ ;
- Ohnesordžo skaičius  $Oh$ ;
- Skylės pralaidumo koeficientas  $C_d$ ;
- Kavitacijos parametrai  $K$ .

Kadangi tolimesniame tyrime aukščiau išvardintų formulių neužtenka, naudojamos papildomos formulės:

- Skysčio greitis  $V_s$ ;
- Skylės diametras  $A$ ;
- Skysčio pralaidumas  $\mu_f$ ;
- Pratekėjimo debetas  $Q$ . [2, 3]

Išsiaiškinius kintamuosius, įtakojančius purkštuko veikimą bei bedimensinius dydžius, kurie bus reikalingi tolimesnio tyrimo atlikimui, svarbu išanalizuoti dyzelinio purkštuko kuro išpurškimo makroskopines ir mikroskopines charakteristikas. Patarosios charakteristikos apibūdinamos išpurkštų kuro lašelių dydžiu bei kitomis kinematinėmis savybėmis. Makroskopinės, analizuojant dyzelinius purkštukus, apima išpurškiamo iš purkštuko kuro pasklidimo nuotolį, kuro pasklidimo kampą ir fakelo lūžio ilgį ( 15 pav.). Išpurškimo nuotolis apibrėžiamas kaip distancija apimanti purškimo dydį ir tai nustato dviejų veiksnių pusiausvyrą - pirma, momentinis kiekis su kuriuo skystis yra išpurškiamas, antra, pasipriešinimas į kurį skystis patenka po išpurškimo. Dažniausiai tai yra dujos arba kitaip – oras. [12]



**15 pav.** Dyzelinio purkštuko fizikiniai parametrai

Kaip teigia autoriai [12] dėl trinties efekto, skysčio kinetinė energija palaipsniui paverčiama į darbinių dujų kinetinę energiją. Ši energija nepertraukiamai mažėja, kol lašelių judėjimas tampa išimtinai priklausomas nuo judančių dujų cilindre. Analizuojant mokslinę literatūrą pastebėta, kad kitų autorių tyrimuose išpurškiamų skysčio lašelių srauto skverbtis priklauso nuo išlekiančio iš purkštuko lašelių pagreičio. Pirmieji išpurškiami lašeliai patiria didesnį aerodinaminį pasipriešinimą, todėl jie plačiau pasiskirsto, o lašeliai išpurškiami vėliau lekia tiesesne trajektorija. Šiuo atveju, reikia pabrėžti, kad dyzelinio kuro purkštukai dažnai būna kompaktiško tipo, kas leidžia jiems turėti didelę skverbtį.

Keletas tyrėjų [9, 15] atliko studijas apie išpurškimo srautą ir pastebėjo eilę sąsajų, kurios leidžia nustatyti pagrindinius kintamuosius, kurie veikia dyzelinio kuro purkštuko išpurškimo impulsą. Toliau trumpai pateikiami labiausiai susiję tyrimai.

Vienas pirmųjų pradėjusių studijuoti šį reiškinį buvo Dentas [9]. Autorius pasiūlė pritaikyti eksperimentinį ryšį, kuris yra taikomas impulsiniam kuro įpurškimui. Šis ryšys buvo palygintas su kitų autorių [15] atliktais tyrimais, siekiant nustatyti skirtumus tarp šių ryšių. Vis dėl to, šis ryšys yra pritaikytas bendrąja forma (1 formulė), kuri skirta dyzeliniams purkštukams:

$$S(t) = 3.07 \left( \frac{\Delta P}{\rho_a} \right)^{\frac{1}{4}} \left( \frac{294}{T_a} \right)^{\frac{1}{4}} \sqrt{d_0 t} \quad (1)$$

Autoriai [14] pasiūlė dvi išraiškas (3 ir 5 formulės) apibrėžiančias išpurškto kuro įsiskverbimą kaip laiko pokyčio funkcija bei apibrėžė, kad laiko pokytis gali svyruoti tarp 0,3 – 1 ms priklausomai nuo įpurškimo sąlygų.

$$t_{rot} = 28.65 \frac{\rho_1 d}{\sqrt{\rho_g \Delta P}} \quad (2)$$

$$S = 0.39 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_1}} t \quad (3)$$

$$t_{rot} = t \quad (4)$$

$$S = 2.39 \left( \frac{\Delta P}{\rho_g} \right)^{0.258} \sqrt{d_0 t} \quad (5)$$

Empirinė lygtis atsižvelgiant į bedimensinius parametrus  $\rho^* = (\rho_a / \rho_1)$  buvo sukurta norint gauti galutinę priklausomybės nuo laiko funkcijos išraišką (6 formulė):

$$S(t) = 0.6^{-3} U_0(t)^{0.9} \left( \frac{\rho_a}{\rho_1} \right) \quad (6)$$

Auksčiau parašytoje 6 formulėje  $U_0$  yra vidutinis greitis pradžioje įpurškimo (m/s), o  $t$  įpurškimo laiko trukmė (m/s). Šioje formulėje purkštuko išpurškiamas srautas yra priklausomas nuo temperatūrų pokyčio darbinėje kameroje, kurios gali kisti nuo 293 K iki 423 K. Šioje formulėje taip pat įtrauktos aukšto ir žemo slėgio dujų tankiai, esantys variklio cilindre prieš įpurškiant kurą.

Įpurškimo srautas išreiškiamas 7 formule:

$$S = C_1 (\Delta P)^{0.25} \sqrt{t \rho_1^{0.25} \rho_g^{-0.14}} \quad (7)$$

Autorių [1, 9, 2] pasiūlytas išraiškas galima išsireikšti nauja formule skirta kuro purkštuko išpurškiamo srauto nuotoliui apskaičiuoti:

$$S = C \left( \frac{\Delta P}{\rho_g} \right)^{0.25} \sqrt{d_0 t} \quad (8)$$

Laikant  $C_1$  ir  $C_2$  tyrimo konstantomis, o  $d_{eq}$  ekvivalentiniu diametru bei  $C$  kita tyrimo konstanta kaip pralaidumo koeficiento funkcija, galima teigti, kad pralaidumo koeficientas  $C_d$  ir konstanta  $C$  turi tiesioginę priklausomybę nuo naudojamų purkštukų tipo ir kiek mažiau nuo darbo sąlygų. Pagal [12], purkštukai gali būti klasifikuojami pagal skirtingų darbinių skysčių tankius priklausomai nuo to, kokio kuro rūšį reikia išpurkšti.

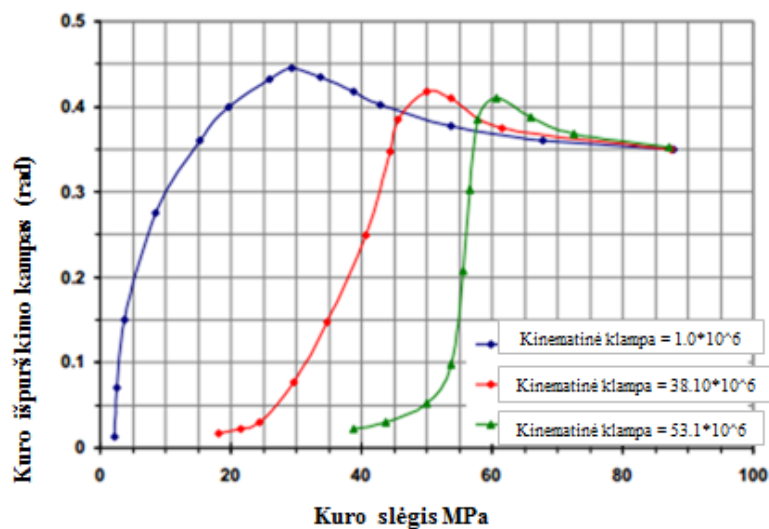
Literatūros analizė parodė, kad išpurškimo srautas iš esmės priklauso nuo sekančių parametru: darbinio skysčio ir aplinkos slėgio skirtumų bei išpurškiamo skysčio greičio. Remiantis [12] skysčio dalis, kuri sparčiai išpurškiama į aplinką pro purkštuko galvutę yra veikiamą aerodinaminių jėgų pasipriešinimo. Tačiau išpurškiamo skysčio slėgio svyravimai atsirandantys išpurškimo metu, pagal anksčiau minėtą autorių, neturi įtakos išpurškiamo skysčio greičiui. Aerodinaminės jėgos, veikiančios aplink purkštuko galvutę palaipsniui mažina išpurkštų lašelių greitį, kol galiausiai šis greitis susilygina su cilindre judančių darbinių dujų greičiu, kuro lašeliai, susimaišę su darbinėmis dujomis pasklinda po visą cilindro tūrį. Taip pat remiantis šiuo autorium galima daryti prielaidą, kad į cilindrą išpurškiamų

kuro lašelių greitis ir sklaida labiausiai priklauso nuo purkštuko galiuko geometrijos, darbinio skysčio slėgio ir jo tankio.

Kitų autorių [12] teigimu, išpurškiamų lašelių greitis labai priklauso nuo išpurškiamo skysčio tankio. Mažėjant išpurškiamo skysčio tankiui žymiai sumažėja ir išpurkštų lašelių greitis darbinėse dujose, taip pat sumažėja ir aerodinaminės sąveikos jėgos. Tuo tarpu temperatūrinis kuro parametras, anot anksčiau minėtų autorių, turi mažai įtakos palyginti su išpurškiamo kuro tankio parametru. Dėl šios priežasties kuro temperatūrą neturi didelės reikšmės išpurškiamam skysčiui.

Sekantis kuro purkštuko mikroskopinis parametras yra purkštuko galvutės kūgio kampas. Purkštuko kūgio kampas yra apibrėžiamas dviem tiesiomis linijomis, kurios išeina statmenai kuro purkštuko išpurškimo angoms ir tangento, kuris sąlygoja išpurškiamo kuro nuotolį.

Kalbant apie dyzelinių kuro purkštuko kūgio kampą, jis yra sudarytas iš dviejų tiesių linijų, kurios susijungia su išpurškimo kontūru ir nuotolio ekvivalentu (16 pav.). Šis ekvivalentas yra 60 kartų didesnis už purkštuko angą. [12]



16 pav. Kuro išpurškimo kampo kitimas priklausomai nuo kuro slėgio

Šiuolaikiniuose kuro purkštukuose šis kampas dažniausiai būna nuo  $5^{\circ}$  iki  $30^{\circ}$  laipsnių dydžio, priklausomai nuo to, kokio skersmens yra cilindras į kurį išpurškiamas kuras ir kuro slėgis purkštuke. Kuo didesnis cilindro skersmuo tuo išpurškimo kampas yra didesnis. Tuo tarpu iš diagramos matome, kad didėjant išpurškimo slėgiui iki tam tikros ribos išpurškimo kampas didėja, o dar labiau didėjant slėgiui šis kampas po truputį mažėja, kol tampa konstantiniu dydžiu. Šios sąlygos nulemia kuro lašelių pasiskirstymą variklio degimo kameroje ir cilindro tūryje. Viena vertus, per didelis kampo padidinimas



gali lemti lašelių, atšokusių nuo kameros kraštų, jungimąsi į stambesnius negu buvo išpurkšti. To pasėkoje blogėja kuro ir darbinių dujų maišymasis variklio cilindre. Kita vertus, jei kampas yra per daug sumažinamas, išpurkšto kuro srautas gali susidurti su variklio cilindru ar degimo kamera ir ten nusėsti. Taip nusėdęs kuras toliau nesimaišo su darbinėmis dujomis. Dėl to nevyksta savaiminio užsidegimo procesas.

Nemažai tyrimų yra atlikta norint nustatyti optimaliausią purkštuko kūgio kampą. Todėl pastebėta, kad daugelio autorių tyrimų pateiktuose pasiūlymuose, kūgio kampo apskaičiavimui rekomenduojamos formulės yra:

$$\tan \frac{\theta}{2} = 0.13 \left( 1 + \frac{\rho_g}{\rho_1} \right) \quad (9)$$

Ši išraiška susideda iš kuro ir dujų tankio santykio. Tačiau bedimensinis išpurškimo santykis  $\frac{l_0}{d_0}$  nėra įtrauktas. Vis dėlto, kiti autoriai [6] šį bedimensinį parametą įtraukia į savo tyrimus norėdami apskaičiuoti didžiausią kūgio kampo skylės diametrą.

Kūgio kampas pagal kitą autorių [6;12] yra :

$$\theta = 0.05 \left( \frac{d^2 \rho_g \Delta \rho}{\mu_a^2} \right)^{0.25} \quad (10)$$

Kaip matome iš pateiktos 10 formulės, apskaičiuojant kūgio kampą yra įtraukiami  $\rho_g$  (darbinių dujų tankis),  $\Delta \rho$  (darbinių dujų tankių pokytis),  $d^2$  (purkštuko skylės diametras) ir  $\mu_a^2$  (kinematinis greitis). Kiti parametrai, kaip kinematinė klampa neturi įtakos kampo didumui, todėl formulėse nėra naudojama.

Kūgio kampas labiausiai yra veikiamas skylės geometrinių charakteristikų, tankio santykio ir Reinoldso skaičiaus, išskyrus kitus kintamuosius kaip  $\Delta P, \rho^*, Tg$  (darbinių dujų temperatūra).

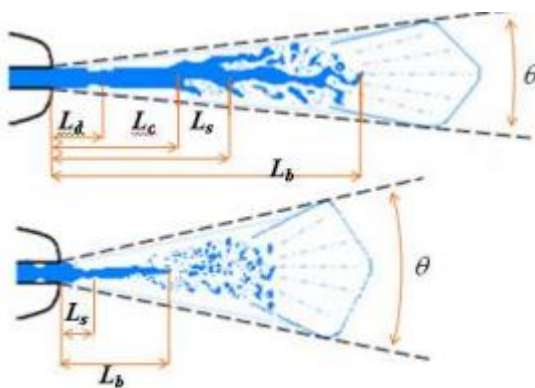
Trečiasis mikroskopinis parametras yra išpurškiamo skysčio nuotolis (fakelo lūžio ilgis). Išpurškiamo skysčio nuotolis yra labai svarbi purkštuko charakteristika, kuri apibūdina išpurkšto fakelo elgesį degimo kameroje arba cilindre. Išpurškiamo fakelo zona, dar vadinama nuotoliu, kuris matuojamas nuo purkštuko skylės iki taško, kuriame nuo išpurkšto srauto atsiskiria pirmieji kuro

lašeliai. Norint apibūdinti šią zoną, reikia pasitelkti įvairius matavimo metodus ir naujausias technologijas, pvz.: didelės rezoliucijos vaizdo kameras.

Literatūroje randami keli, autorių tyrimuose naudojami, patys populiariausi metodai, kurie padeda išanalizuoti išpurškiamo fakelo ilgį. Analizuojant fakelo struktūrą išskiriamos dvi pagrindinės zonos:

- Pirmoji zona - neišsisklaidęs kuro lašelių srautas;
- Antroji zona – pilnai išsisklaidęs kuro lašelių srautas.

Skirtumas tarp šių dviejų srautų yra tas, kad pirmoje zonoje lašeliai pradeda atsiskirti nuo bendro srauto jo paviršiuje. Skaidymasis prasideda iš karto, kai kuro srautas išlekia pro purkštuko skylutės pabaigą [14] Pateiktame 17 paveiksle šis atstumas pažymėtas  $L_c$ :



**17 pav.** Užbaigto ir neužbaigto kuro fakelo išpurškimo struktūra

Paveiksle pažymėtas atstumas  $L_b$  yra virtualioji konstanta priklausanti nuo išpurškiamo kuro srauto greičio. Taip pat autoriai [12, 14] ištyrė, kad kavitacija teigiamai veikia kuro srauto išsiskaidymo į lašelius procesą išpurkšto kuro fakelo pabaigoje.

Nemažai išraiškų buvo naudojama siekiant apibūdinti išpurškimo ilgį. Šios išraiškos buvo pasiūlytos naudoti esant specifinėms sąlygoms pagal kiekvieną tiriamą atvejį atskirai (17 pav.)

Eksperimentinių tyrimų pagrindu, išpurškimo ilgis pilnai išsisklaidžiusiame kuro lašelių sraute išmatuojamas pasinaudojus autorių [14] pateikta 11 formule:

$$L_b = 7d \left( 1 + 0.4 \frac{R}{D} \right) \left( \frac{\rho_g}{\rho_l U_0^2} \right)^{0.05} \left( \frac{L}{D} \right)^{0.13} \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.05} \quad (11)$$

Pagal [6] išpurškimo ilgis apskaičiuojamas pagal 12 formulę:

$$L_b = 7.15 \left( \frac{\rho_1}{\rho_g} \right)^{0.05} \quad (12)$$

Kiti autoriai [24, 25] siūlo naudoti kitą išraišką išpurškimo ilgiui skaičiuoti:

$$L_b = 2.65^{-3} (d) We^{-0.1} Re^{-0.3} \left( \frac{\rho_1}{\rho_g} \right)^{-0.08} \quad (13)$$

Formulės kintamieji yra paaiškinti anksčiau aptariant kintamuosius bedimensinėse formose. Tolimesnio tyrimo eigoje ši autorių pasiūlyta formulė bus panaudojama išpurškimo nuotoliui nustatyti.

Svarbiausi parametrai norint nustatyti išpurškimo fakelo ilgį buvo paminėti anksčiau, tai skysčio tankio ir aerodinaminių jėgų sąveika, purkštuko skylės diametras ir išpurškimo skylės ilgio santykis. Tačiau svarbu paminėti dar keletą parametrų, kaip skylės diametrą  $d_0$ , fizikinius ir cheminius reiškinius bei termodinamines ypatybes.

Visų pirma fakelo ilgis turi tiesioginę priklausomybę nuo skylės diametro. Pasak autoriaus [27] keičiant skylės diametrą, proporcingai keičiasi ir išpurškiamo kuro srauto fakelo ilgis. Kalbant apie termodinamines ypatybes [27, 29] savo darbuose teigia, jog degiojo mišinio temperatūra daro stiprią įtaką šio mišinio savaiminio įsiliepsnojimo greičiui. Kuo greičiau mišinys įsiliepsnoja, tuo mažesnis fakelo ilgis. Tačiau išpurškiamo kuro temperatūra neturi tokios didelės įtakos, nes kuras yra išpurškiamas į sąlyginai žemo slėgio zoną, kuri yra lyginama su skysčio slėgiu. Nors kuro temperatūra yra kintama, tačiau didelės įtakos fakelo padidėjimui ar sumažėjimui neturi. Tai buvo įrodyta [27, 29], kuris padarė išvadą, kad kuro tankis net prie didelių temperatūrų mažai keičiasi. Todėl skaičiavimuose į kuro temperatūros svyravimus nėra atsižvelgiama.

Antra, fizikiniai ir cheminiai reiškiniai, kurie daro didelę įtaką išpurškiamo fakelo ilgiui yra kuro tankis, klampa ir lakumas (išgaravimo savybė). Pastaroji savybė yra pagrindinė nuo kurios priklauso, kiek energijos bus sunaudota kurui įkaitinti ir išgarinti cilindre.

Toliau kalbant apie kuro purkštukus reikia aptarti jų mikroskopines charakteristikas, kurios buvo išvardintos anksčiau. Kaip mikroskopinių charakteristikų pavyzdį galime pateikti automatizuotą mechanizmą, kuris atsakytų už lašelių pasiskirstymą cilindre bei jų dydžių santykį išpurškimo proceso

metu. Galiausiai tokio automatizuoto mechanizmo kokybė gali būti apskaičiuojama pagal vidutinį išpurkštų lašelių diametrą. Vidutinis lašelių diametras gali būti prilyginamas lygiaverčiui diametrui, kuris charakterizuoja visas išurškiamų lašelių grupes vieno purškimo metu.

Lygtis sudaryta bendrąja forma, kurioje buvo apibrėžtos visos koreliacijos remiantis Sauters vidutiniu diametru pateikiama toliau:

$$D_{mn} = \sqrt[m-n]{\frac{\sum_{i=1}^k D_i^m N_i}{\sum_{i=1}^k D_i^n N_i}} \quad (14)$$

Čia  $N_i$ - lašelių skaičius vieno išpurškimo metu,  
 $D_i$  išpurkštų lašelių diametras.

Bendrai kalbant, vidutinis diametras yra naudojamas palengvinti duomenų analizę ir skaičiavimus. Vidutinis diametras yra toks, kuris apibrėžia lašelių populiacijos charakteristikas kaip pavaizduota 14 formulėje.

Sauterio vidutinis diametras kai kuriais atvejais yra naudojamas lašelių diametrui analizuoti, kuris turi vienodą ilgio/paviršiaus santykį bendrame išpurškime, taip pat vidutiniam aritmetiniam diametrui  $D_{10}$ , kuris pavaizduotas sekančioje (16) formulėje:

$$SMD = \frac{\sum_{i=1}^k D_i^3}{\sum_{i=1}^n D_i^2} \quad (15)$$

$$D_{10} = \frac{\sum_{i=1}^k D_i}{\sum_{i=1}^k N_i} \quad (16)$$

Atsižvelgiant į tai, kad formulėse naudojant vidutinį diametrą  $D_i$  yra labai supaprastinami lašelių sklaidos populiacijos skaičiavimai. Todėl tolimesnio tyrimo eigoje yra naudojama ši formulė norint paskaičiuoti lašelių pasiskirstymą degimo kameroje ar variklio cilindre priklausomai nuo jų dydžio.

Lašelių pasiskirstymas cilindre priklauso nuo išpurškimo bei keletu pagrindinių parametru. Visu pirma, išpurškimo norma priklauso nuo išpurškiamų iš purkštuko lašelių diametro ir skaičiaus. Kitaip tariant, nuo lašelių didumo ir išpurškiamo skysčio tūrio į cilindrą. Taip pat, išpurškimo norma priklauso ir nuo darbinių dujų esančių cilindre pasipriešinimo. Šios aerodinaminės jėgos pasipriešinimas didėja priklausomai nuo išpurškiamų iš purkštuko kuro lašelių dydžio. [16]

Kuro ir darbinių dujų tankių santykis turi du priešingus efektus nuo kurių priklauso kuro lašelių dydis, jų sklaidymasis cilindre ir gebėjimas vėl susijungti ir sudaryti didesnius kuro lašelius. Didėjant tankių santykiui didėja ir aerodinaminų jėgų sąveika cilindre, kuri yra sumažėjusio lašelių greičio ir padidėjusio jų skaičiaus vienetu priežastimi.

Darbinių dujų esančių cilindre temperatūra, kuri pakelia ir įpurkšto kuro temperatūrą kuro sklaidai didelės įtakos neturi, todėl į skaičiavimus ji nėra įtraukta. Darbinių dujų temperatūra turi įtakos tik išpurkšto kuro įsiliepsnojimo spartai, t.y., pirmiausia užsidega mažesni lašeliai, truputį vėliau didesni ir taip prasideda grandininė reakcija, kurios metu sudeginamas visas degusis mišinys cilindre.

Vidutinis lašelių dydis yra linkęs augti priklausomai nuo atstumo, kuris pradedamas skaičiuoti nuo išpurškimo angos esančios purkštuko galvutėje. Vienuose tyrimuose teigiama, kad lašelių diametro didėjimas yra daugiau koncentruotas aplink išpurškiamo fakelo spindulį nepriklausomai nuo fakelo ilgio, tuo tarpu kituose, kaip jau rašyta anksčiau, lašelių diametras didėja priklausomai nuo išpurkšto kuro lašelių nuskriejimo nuotolio. Pastaruoju teiginiu yra dažniausiai vadovujamasi ir naujausiais tyrimais [17] patvirtinta, kad kuro lašeliai, kurie nutolę didesniu atstumu nuo išpurškimo spindulio yra pastovaus dydžio ir išlaiko konstantines vertes.

Paprastai tariant, lašelių dydis yra mažiausias prie purkštuko angos iš kurios išpurškiamas kuras ir didėja fakelo gale.

Sauters vidutinis diametras pagal autorius [13] yra pateiktas 17 formulėje:

$$SMD = 4.12d(Re)^{0.12}We^{-0.54}\left(\frac{\mu_1}{\mu_g}\right)^{0.54}\left(\frac{\rho_1}{\rho_g}\right)^{0.18} \quad (17)$$

Tų pačių autorių išvestos ir dar dvi formulės, kurių pirmoji (18 formulė) skirta skaičiuoti neišbaigtam išpurškimui:

$$SMD = 0.38d(\text{Re})^{0.25} We^{-0.32} \left( \frac{\mu_1}{\mu_g} \right)^{0.37} \left( \frac{\rho_1}{\rho_g} \right)^{-0.47} \quad (18)$$

Antroji formulė naudojama normaliam išbaigtam išpurškimui skaičiuoti;

$$SMD = 8.7(\text{Re} We)^{-0.28} d_0 \quad (19)$$

Pastaroji formulė naudojama kaip viena iš formulių pjezo keraminių purkštukų tyrimui atlikti.

Šiame skyriuje išsiaiškinome pagrindines priklausomybes dėl kurių keičiasi lašelių dydis ir išpurškimo nuotolis. Taip pat išanalizavus daugelio autorių pasiūlytas formules, pastebėta, kad dauguma jų galime pritaikyti konkrečiam tyrimui atlikti, todėl ne visos formulės bus naudojamos atliekant tolimesnį tyrimą, o kai kurioms formulėms įvedami papildomi kintamieji.

## 2.5. CR kuro sistemų purkštukų tikrinimo stendo techninės charakteristikos

Gilesniam tyrimui atlikti yra naudojamas bandymų stendas. Šio bandymo stendo pagrindinės techninės charakteristikos pateikiamos 5 lentelėje:

**5 lentelė.** Bandymų stendo charakteristikos

<b>Techninės charakteristikos</b>
Keturių purkštukų tikrinimas vienu metu
Automatinis matavimo talpų išpylimas
Aukšto slėgio daviklio kontroliavimas
Išpurškiamo kuro kiekio matavimas
Sukeliamas slėgis nuo 200 iki 2030 bar
Programa skirta tikrinti Bosch, Siemens ir Delphi purkštukus
Reguliuojamas kuro purkštuko darbo laikas

Kitame poskyryje atliekamas pjezokeraminių purkštukų kokybės gerinimo tyrimas.

### 3. PJEZOKERAMINIŲ PURKŠTUKŲ KURO IŠPURŠKIMO CHARAKTERISTIKŲ ANALITINIS TYRIMAS, REZULTATAI IR VERTINIMAS

#### 3.1. Pjezokeraminių purkštukų išpurškiamo lašelio dydžio, fakelo ilgio išpurškiamo kuro kiekio apskaičiavimas

Šioje darbo dalyje atliekami darbo tikslui pasiekti skaičiavimai, kurie yra lyginami su moksline literatūra bei autorių teorijomis.

Kaip buvo minėta ankstesniame poskyryje, tyrimui pasiekti labai svarbu išanalizuoti dyzelinio kuro purkštuko skysčio išpurškimo nuotolį, kuro lašelių dydį bei išpurškiamo kuro kiekį. Todėl toliau darbe bus skaičiuojami pastarieji kuro purkštukų parametrai. Taip pat bandoma palyginti išpurškiamo kuro kiekį su gamintojų deklaruojamais parametrais. Tačiau reikėtų paminėti, kad dauguma gamintojų neatskleidžia tokios informacijos, įvardindami tai kaip konfidencialia informacija, kurios atskleidimas gali sukelti įmonės veiklos nesklandumų rinkoje. Be to, tyrimo metu atliekami skaičiavimai lyginami su jau pateiktais teoriniais skaičiavimais bei praktiniu bandymo metu gauta informacija.

Pirmoje tyrimo dalyje bandoma išsiaiškinti kokie kintamieji turi įtakos išpurškimo sąlygoms. Šio tyrimo pagrindas yra tokie kintamieji kaip slėgis, skysčio tankis, temperatūra nuo kurių priklauso kuro purkštuko išpurškiamo fakelo ilgis, kuro lašelių dydis ir sklaida.

Visų pirma, norint išsiaiškinti kokio tipo kuro tekėjimo savybės yra purkštuko viduje būtina apskaičiuoti Reinoldso skaičių. Pastarasis skaičius – tai bedimensė konstanta, kuri parodo skysčio inercinių ir klampos jėgų santykį (20 formulė).

$$\text{Re} = \frac{\rho_1 V_s^2 / L}{\mu V_s / L^2} = \frac{\rho V_s L}{\mu} \quad (20)$$

Čia: L-sistemos ilgis 0,015m

$\rho$  - kuro tankis( kg/m<sup>3</sup>)

Pagal Reinoldso skaičiaus didumą apsprendžiama skysčio tekėjimo charakteristika – laminarinė ar turbulentinė. Jei šis skaičius yra didesnis negu 3000, tai toks tekėjimas yra turbulentinis, jei mažesnis – laminarinis.

Toliau pateiktoje lentelėje [31] surašyti dyzelinio kuro naudojamo Europos Sąjungoje kokybės rodikliai (6 lentelė).

**6 lentelė.** Standarto EN 590 dyzelinių degalų kokybės rodikliai

Savybės	Rodikliai
Tankis esant 15C <sup>0</sup> ( kg/m <sup>3</sup> )	820-860
Klampa( mm <sup>2</sup> /s)	1-2
Vandens kiekis pagal Fischer( mg/kg)	< 200
Kuro paviršiaus įtempimo koeficientas N/m	0,028

Šie rodikliai bus naudojami tolimesnėje tyrimo eigoje apskaičiuojant kuro purkštukų išpurškiamo kuro parametrus.

Kadangi norint apskaičiuoti Reinoldso skaičių turimų parametrų neužtenka reikia pasinaudoti pagalbinėmis formulėmis. Pagalbinėmis formulėmis įvardijamos šios:

$$v_s = \frac{\mu}{\rho} \quad (21)$$

Čia:

$v_s$  - kuro kinematinės klamos koeficientas prie 15 C<sup>0</sup> (mm<sup>2</sup>/s)

$\mu$  - kuro dinaminės klamos koeficientas išreiškiamas per kuro kinematinės klamos koeficiento formulę;

Iš kuro kinematinės klamos koeficiento formulės išsireiškiamame kuro dinaminės klamos koeficientą  $\mu$  ir jį paskaičiuojame;

$$\mu = 1.5 \cdot 10^6 \cdot 840 = 0.00126 \text{ kg m}^2/\text{s} \quad (22)$$



Taip pat Reinoldso skaičiaus negalime apskaičiuoti nežinodami kuro srauto judėjimo greičio, kuris priklauso nuo kuro tankio ir slėgio.

Paskaičiuojamas kuro srauto greitis purkštuko galvutėje;

$$V_s = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P^2}{\rho}} \quad (23)$$

Čia:

$\Delta P$  išpurškiamo iš purkštuko ir cilindre esančių slėgių skirtumas (bar)

Variklio darbo metu prieš kuro išpurškimą cilindre slėgis pakyla iki 30 barų todėl skaičiuojant slėgių skirtumą į formulę įrašomas 30 barų dydis.

$$V_s = \sqrt{\frac{2 \cdot (300 - 30)^2}{0.84}} = 4.2 \text{ m/s}$$

Galiausiai, išsivedant papildomas formules skaičiuojamas Reinoldso skaičius, kuris parodo inercinių ir klamos jėgų santykį skystyje, šiuo atveju dizeliniame kure:

$$\text{Re} = \frac{\frac{840 \cdot (4.2)^2}{0.0126 \cdot 4.2}}{0.015^2} = 42000$$

Šis skaičius parodo, kad purkštuke yra turbulentinis skysčio tekėjimas. Pagal anksčiau minėtų dydžių reikšmes, turbulentinis skysčio tekėjimas leidžia išpurkštam iš purkštuko skysčiui greičiau išsiskaidyti į lašelius.

Toliau skaičiuojamas Veberio skaičius, kuris papildo Reinoldso skaičių. Veberio skaičius parodo ar įpurškiamo skysčio sąveika su darbinėmis dujomis yra gera ir ar ji padeda išsiskaidyti įpurškštiems lašeliams visame cilindro tūryje. Kuo didesnis šis skaičius tuo maišymasis yra geresnis. Anot [15] šis skaičius turi būti ne mažesnis kaip 1000 kitaip maišymasis cilindre nevyksta.

Skačiuojamas Veberio skaičius pagal 24 formulę:

$$We = \frac{\rho V_s^2 L}{\sigma} \quad (24)$$

Čia:

$\sigma$  - kuro paviršiaus įtempimo koeficientas (N/m)

$$We = \frac{840 \cdot (4.2)^2 \cdot 0.015}{0.028} = 7938$$

Kadangi paskaičiavus Veberio skaičių, rezultatas gaunamas daug didesnis negu rekomenduoja [15] savo tyrime, galime teigti, kad visi kintamieji yra parinkti teisingai. Todėl jis tik patvirtina Reinoldso skaičiaus patikimumą.

Toliau Teiloro skaičiumi išvedamas bedimensis dydis, kuris panašiai kaip ir Veberio skaičius nusako dviejų skirtingų fizikinių kūnų maišymąsi:

$$Ta = \frac{Re}{We} = \frac{\sigma}{\mu \cdot V_s} \quad (25)$$

$$Ta = \frac{42000}{7938} = \frac{2.8}{0.0126 \cdot 4.2} = 5.29$$

Teiloro skaičius apsprendžia cilindre besimaišančių darbinių dujų ir išpurkšto skysčio, šiuo atveju kuro, charakteristiką. Gautas skaičius rodo, kad cilindre maišymasis vyksta sklandžiai. Tačiau jei gautas skaičius būtų didesnis nei 1700, maišymasis cilindre nevyktų.

Toliau tyrime apskaičiuojamas Ohnesordžo skaičius. Šis skaičius parodo santykį tarp tamprumo jėgos, inercijos ir įtempimo jėgų. Reikia atkreipti dėmesį, kad Ohnesordžo skaičius naudojamas tik skysčių ir dujų įpurškimo technologiniuose skaičiavimuose.

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} \quad (26)$$

$$Oh = \frac{\sqrt{7938}}{42000} = 0.0021$$

Kadangi visuose skaičiavimuose naudojamas identiškas skystis (dyzelinis kuras), kurio klampa ir paviršiaus įtempimai nesikeičia, o temperatūra imama kaip konstantinė vertė, tai Ohnesordžo skaičius nekinta. Šį rezultatą pavirtina ir [18] atliktas tyrimas, kuriame teigia, kad Ohnesodžio skaičius esant tam pačiam naudojamam skysčiui nekinta. Atlikus visus pirminius skaičiavimus išsiaiškinome, kad parinkti kintamieji yra teisingi, nes gauti rezultatai nenukrypsta nuo kituose straipsniuose ir moksliniuose darbuose aprašytų tyrimų rezultatų.

Tolimesnėje darbo eigoje bus apskaičiuojamas purkštuko skylių pralaidumo koeficientas, kuris padės išsiaiškinti koks kuro kiekis gali pratekėti prie skirtingų kuro tekėjimo greičių bei slėgių. Kuo gaunamas skaičius yra didesnis, tuo daugiau kuro gali pratekėti.

Taigi, skaičiuojamas skylės pralaidumo koeficientas  $C_d$  pagal 27 formulę:

$$C_d = \frac{V_s L}{\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}} \quad (27)$$

$$C_d = \frac{4.2 \cdot 0.015}{\sqrt{\frac{2 \cdot (300 - 30)}{840}}} = 0.746$$

Kavitacijos atsiradimas yra nepageidaujamas kaip ir bet kuriame hidrauliniame prietaise taip ir kuro purkštuke. Paskaičiavus kavitaciją sužinome prie kokio minimalaus slėgio išsiskiria oro burbuliukai.

$$K = \frac{2 \cdot \Delta P}{\rho \cdot (V_s)^2} \quad (28)$$

$$K = \frac{2 \cdot (300 - 30)}{840 \cdot 4.2^2} = 0.0364$$

Pateikiant rezultatą, reikia paminėti, kad kavitacija tai reiškiny, atsirandantis skystyje, susiformavus prisotintų dujų burbuliukams, kuriems sproginėjant iš metalų paviršiaus išplėšiamos mažiausios medžiagos dalelės. Kritiniai šio skaičiaus parametrai yra nuo 0,2 iki 1,5. [13] Taigi, gautas rezultatas, šiuo atveju rodo, kad pasiekus 0,0364 kavitacija nevyksta.

Pasinaudoję 29 formule paskaičiuojame purkštuko pralaidumą prie pasirinkto slėgio ir skylių diametro:

$$f = \frac{Q}{\sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}} \quad (29)$$

Kadangi apskaičiuoti dyzelinio kuro purkštuko pralaidumo iškart negalime, tad pasinaudojame papildomomis formulėmis:

$$Q = V_s \cdot A \quad (30)$$

Čia A Skylės dydis (mm<sup>2</sup>)

Q . pratekėjimo srautas (mm<sup>3</sup>/s)

Negalint kitaip apskaičiuot pratekėjimo srauto Q, į skaičiavimus įvedama dar vieną formulę, tai skylės dydžio formulė.

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (31)$$

$$A = \frac{3.14 \cdot 0.15^2}{4} = 0,016 \text{ mm}^2$$

$$Q = 4.2 \cdot 0.016 = 0.067 \text{ mm}^3 / \text{s}$$

Kadangi apskaičiavome pratekėjimo srautą, slėgių pokytį, o kuro tankis buvo imamas iš lentelės pateiktos anksčiau, šiuos rezultatus įstatome į 29 formulę, kuri rodo vieno išpurškimo metu purkštuko įpurškiamą kuro normą:

$$f = \frac{0.067}{\sqrt{\frac{2 \cdot 270}{840000}}} = 1.53 \text{ g / s}$$

Gautas rezultatas rodo, kad prie 300 barų kuro slėgio purkštuko išpurškiama kuro norma yra 1,53 g/s.

Dar vienas labai svarbus dydis apibūdinantis kuro purkštuką yra jo išpurškiamų lašelių dydis. Kuo mažesni lašeliai tuo jie lengviau išsimaišo darbinių dujų srovių pagalba cilindre ar degimo kameroje.

Toliau naudojant 32 formulę, apskaičiuojame išpurškiamų lašelių dydį prie pasirinktų parametru  $d_0=57,5 \mu m$ , o išpurškiamo kuro slėgis 300 bar:

$$SMD = 8.7(\text{Re} \cdot \text{We})^{-0.28} \cdot d_0 \quad (32)$$

$$SMD = 8,7(4200 \cdot 7938)^{-0.28} \cdot 57,5 = 0.0000020 \mu m$$

Apskaičiuotas kuro lašelių dydis yra  $0,0000020 \mu m$ .

Ne mažiau svarbus parametras yra purkštuko išpurškstas fakelo ilgis. Jei fakelo ilgis yra per didelis, tai kuro lašeliai gali nuskrieti per toli ir atsitrenkę į variklio cilindro sienelės prie jų prikibti arba atšokę nuo cilindro sienelių kuro lašeliai susijungia su kitais lašeliais, taip padidėjęs kuro lašelių diametras neigiamai veikia savaiminio užsidegimo procesą. Tokiu atveju, variklio cilindre kuro mišinys tampa „liesnis“ (per mažai kuro), krenta variklio galia, išsiskiria mažiau šiluminės energijos, neefektingai naudojami kuro resursai. Taigi, toliau skaičiuojamas išpurškiamų lašelių fakelo ilgis prie pasirinktų parametru:

$$L_b = 2.65^{-3} (d_0) \text{We}^{-0.1} \cdot \text{Re}^{-0.3} \left( \frac{\rho}{\rho_g} \right) \quad (33)$$

Čia  $\rho_g$  -cilindre esančių dujų tankis  $1,293 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

$$L_b = 2.65^{-3} \cdot (57,5) \cdot 7983^{-0.1} \cdot 4200^{-0.3} \left( \frac{840}{1.293} \right) = 5.8 \text{ cm}$$

Kuro lašeliai nuo purkštuko išpurškimo skylės nulėks 5,8 cm.

### 3.2. Pjezokeraminių purkštukų tyrimo rezultatai ir vertinimas

Atlikus visus skaičiavimus ir duomenis surašius į 7 lentelę puikiai matome, kad teorinis kuro kiekis (pažymėtas paryškinta juoda spalva lentelėje) paimtas iš žurnalo Autospeed (1999) publikuoto straipsnio skiriasi nuo paskaičiuotų dydžių.

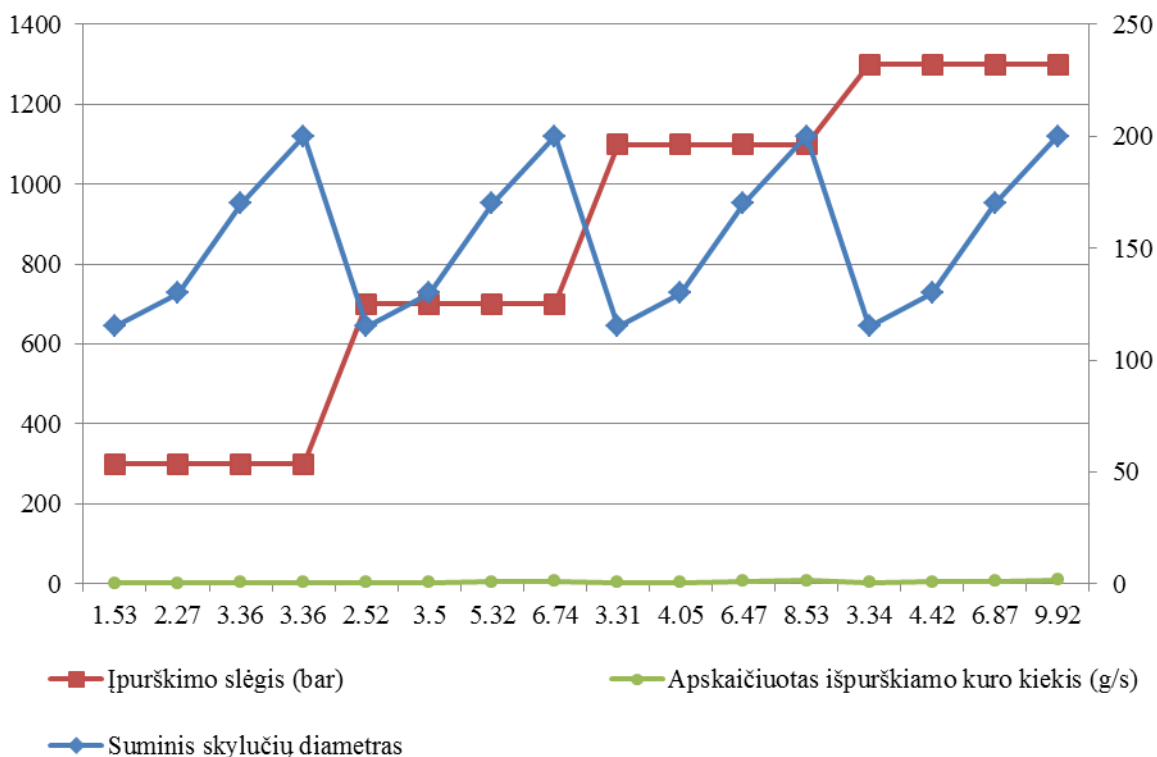
**7 lentelė.** Atlikto tyrimo gautų rezultatų bendra lentelė

Įpurškimo slėgis (bar)	Skylučių skaičius (vnt)	Suminis skylučių diametras ( $\mu m$ )	Apskaičiuotas išpurškiamo kuro kiekis (g/s)	Teorinis išpurškiamo kuro kiekis (g/s)	Skylių pralaidumo koeficientas $C_d$	Išpurškiamų lašelių fakelo ilgis (mm)	Išpurškiamų lašelių dydis ( $\mu m$ )
300	2	115	1,53	<b>2,04</b>	0,746	58	20
300	2	130	2,27	<b>2,61</b>	0,87	65	22
300	3	170	3,36	<b>4,46</b>	0,753	32	21
300	5	200	3,36	<b>6,18</b>	0,587	11	17
700	2	115	2,52	<b>3,38</b>	0,745	48	16
700	2	130	3,5	<b>4,32</b>	0,81	54	17
700	3	170	5,32	<b>7,38</b>	0,721	61	19
700	5	200	6,74	<b>10,2</b>	0,66	83	14
1100	2	115	3,31	<b>4,32</b>	0,725	38	12
1100	2	130	4,05	<b>5,52</b>	0,734	46	13
1100	3	170	6,47	<b>9,43</b>	0,686	58	11
1100	5	200	8,53	<b>13,1</b>	0,651	72	9
1300	2	115	3,34	<b>4,72</b>	0,708	36	10
1300	2	130	4,42	<b>6,03</b>	0,733	40	11
1300	3	170	6,87	<b>10,3</b>	0,666	49	9
1300	5	200	9,92	<b>14,3</b>	0,651	53	8

Pateiktų ir tyrimo metu apskaičiuotų rezultatų nesutapimas gali būti dėl keletos priežasčių. Visų pirma, skaičiuojant rodiklius galėjo būti paimti skirtingi kuro tankiai, nes pastarieji gali svyruoti pagal 6 lentelėje pateiktą EN590 standartą nuo  $820 \text{ kg/m}^3$  iki  $860 \text{ kg/m}^3$ . Antra, skaičiuojant gaunami

rezultatai apvalinami, todėl gaunamos nežymios paklaidos, kurių galutinės reikšmės atsispindi 7 lentelėje.

Pagal sudarytos 7 lentelės apskaičiuotų rezultatų duomenis galime daryti išvadą, kad purkštuko išpurkšto kuro kiekis priklauso nuo kuro slėgio, t.y., kuo didesnis kuro slėgis tuo išpurškama kuro norma yra didesnė. Kaip matome iš 18 paveiksle pateikto grafiko, kuriame pateikiami trys parametrai, purkštuko kurio suminis skylių diametras  $115 \mu\text{m}$ , didinant slėgį nuo 300 iki 1300 barų išpurškimo dydis padidėjo 2,2 karto, tuo tarpu purkštuko kurio suminis skylių diametras  $200 \mu\text{m}$  kuro išpurškimo dydis padidėjo 2,9 karto. Toliau didinant kuro slėgį iki 2030 barų, išpurškimo dydis pirmojo purkštuko atitinkamai padidėjo iki 2,9 karto, o antrojo iki 4,1 karto.



**18 pav.** Išpurškiamo kuro kiekio priklausomybė nuo slėgio

Norint sumažinti kuro išpurškimo kiekį galima trumpinti kuro purkštuko darbo laiką, tokiu atveju kitos purkštuko savybės nenukenčia. Didinant kuro slėgį pagerėjo ir kiti kuro purkštukų parametrai. Kiekvieną kartą padidinus kuro slėgį išpurškiamų kuro lašelių dydis palaipsniui mažėjo, lašelių dydis padidinus slėgį iki 2030 barų pirmajame purkštuke sumažėjo 50 proc., antrajame 55 proc., o trečiajame 57 proc. Didžiausias kuro lašelių sumažėjimas pastebimas paskutiniajame purkštuke - lašelių diametrai sumažėjo net 64,7 proc.

Matant tokias tendencijas galime teigti, kad kuo mažesni kuro purkštuko skylių diametrai ir kuo didesnis kuro slėgis, tuo kuro lašelių sumažėjimas yra didesnis. Tuo tarpu fakelo ilgiui kuro slėgio didėjimas tokios didelės įtakos neturėjo, išpurškimo nuotolis dažniausiai padidėjo tik keliais procentiniais punktais. Tai galima paaiškinti vieno iš autoriaus [27, 28] teiginiu, kad kuo mažesni kuro lašeliai ir kuo jų daugiau, tuo didesnės aerodinaminės jėgos juos veikia ir tuo mažesnę atstumą jie sugeba nuskristi nors ir išlekia iš purkštuko didesniu greičiu keliant kuro slėgį.

### 3.3. Pjezokeraminių purkštukų išpurškiamo kuro kiekio nustatymas ir įvertinimas

Šioje tyrimo dalyje, gilesniam tyrimo atlikimui buvo panaudotas kompiuterizuotas pjezo purkštukų bandymo stendas (19 pav.). Šiame stende vienu metu galima bandyti keturis purkštukus, slėgis gali būti reguliuojamas nuo 200 barų iki maksimalaus 2030 barų.



**19 pav.** Purkštukų tikrinimo stendas

Šiame bandyme naudojami tie patys purkštukai kaip ir pirmoje tyrimo dalyje. Tačiau į šiuos purkštukus iš bandymo stendo yra paduodamas 2030 barų slėgis. Tai yra, kaip minėta anksčiau, maksimalus dydis, kurį gali išvysti bandymų stendas.



Šiame stende, purkštukų darbo laiko režimą galima nustatyti nuo vienos sekundės iki vienos minutės. Kuro temperatūra šiame stende palaikoma automatiškai apie 15 C<sup>0</sup>. Bandymai buvo atliekami po du kartus.

Vienu metu į bandymų stendą buvo įdedami keturi skirtingi purkštukai, kurių skylučių diametrai: 115, 130, 170, 200. Kuro slėgis visiems purkštukas po du kartus buvo duodamas vienodo dydžio, pirmą kartą 300 barų, antrą - 700, trečią - 1100, ketvirtą - 1300, penktą – 2030 barų. Galima pastebėti, kad purkštukų išpurškiami kuro kiekiai labai artimi paskaičiuotiems kiekiams. Deja, šiuo stendu negalima praktiškai nustatyti išpurškiamų kuro lašelių dydžių ir fakelų ilgių. Todėl galima teigti, kad kuro kiekiai, lašelių dydžiai ir išpurškiamų fakelų ilgiai pagal parinktas formules paskaičiuoti teisingai.

Papildant tyrimą buvo apskaičiuotas kuro purkštuko su 8 išpurškimo skylėmis (esant 2030 barų išpurškiamo kuro slėgiui), išpurškiamas kuro kiekis, išpurškiamų lašelių dydis, išpurškiamo fakelo ilgis ir skylių pralaidumo koeficientas (8 lentelė).

**8 lentelė.** Eksperimentinio tyrimo metu gauti kuro purkštukų rezultatai

Išpurškiam o kuro slėgis (bar)	Skylučių skaičius purkštuk e (vnt)	Skylučių dydis ( $\mu m$ )	Teorinis išpurškiam o kuro kiekis (g/s)	Paskaičiuota s išpurškiamo kuro kiekis (g/s)	Skylių pralaidum o koeficienta s C <sub>d</sub>	Išpurškia - mų lašelių fakelo ilgis (mm)	Išpurškia -mų lašelių dydis ( $\mu m$ )	Bendra s skylučių dydis ( $\mu m$ )
2030	2	57	5,44	4,54	0,825	34	9	115
2030	2	65	7,01	5,83	0,798	40	10	130
2030	3	57	9,23	6,72	0,726	48	9	170
2030	5	40	17,4	13,79	0,673	62	6	200
2030	8	25	-	13,79	0,64	36	4	200

Palyginus kuro purkštuką su aštuoniomis skylutėmis su kitais nagrinėtais tyrime matome, kad šio kuro purkštuko išpurškiamų lašelių dydis dar 33 procentais mažesnis nei purkštuko su 5 skylėmis ir tokiu pat darbinio kuro slėgiu bei vienodo dydžio bendru kuro išpurškimo skylučių diametru. Toks didelis lašelių dydžių skirtumas susidaro todėl, kad purkštuko su 8 skylutėmis vienos skylutės diametras yra mažesnis negu purkštuko su 5 skylutėmis atitinkamai 40  $\mu m$  ir 25  $\mu m$ . Be to, purkštuko su 8 skylutėmis išpurškto kuro ir oro išsimaišymas cilindre yra geresnis, nes kuras išpurškiamas aštuoniomis

skirtingomis kryptimis, o kuo tolygiau išsimašo degusis mišinys, tuo geriau sudega kuras, mažinami CO<sub>2</sub> emisijos kiekiai ir taupomas kuras.

Atlikus abu tyrimus matome, kad kuro purkštukų kokybė priklauso nuo skylučių kiekio ir jų diametro. Taip pat analizuojat gautus duomenis pastebėta, jog kuro išpurškimo nuotolis, kitaip tariant fakelo ilgis, mažai keičiasi lyginant jį su kuro slėgio didėjimu. Bandymo stendo pagalba padidinus visiems keturiems tirtiems purkštukams kuro slėgius iki 2030 barų šių purkštukų kokybiniai rodikliai taip pat išaugo lyginant juos su buvusiais prie mažesnių slėgių.

Antrojoje tyrimo dalyje paskaičiuojamas patobulinto kuro purkštuko su aštuoniomis skylėmis išpurškiamo kuro kiekis, fakelo ilgis, lašelių diametras. Palyginus apskaičiuotus duomenis su kitų purkštukų tyrimo duomenimis galime daryti išvadą, kad kuro purkštukas su 8 skylėmis leistų sutaupyti nemažai degalų, tačiau jo gamyba būtų daug brangesnė nei šiuo metu naudojamų purkštukų su 5 skylėmis. Reiktų tikslesnių skylučių apdirbimo tolerancijų, skylučių apdirbimas užtruktų ilgiau negu purkštuko su 5 skylėmis. Be to, kure gali atsirasti smulkių pašalinių dalelių iš judančių mechanizmų, ar iškristi nuosėdos, kurios gali užkišti pjezo keraminio kuro purkštuko išpurškimo kiaurymes. Tačiau, autoriaus pasiūlymas, nepaisant brangesnės pjezokeraminių purkštukų gamybos ir eksploatacinių išlaidų rinktis automobilius, kuriuose įdiegti naujos kartos pjezokeraminiai purkštukai, nes vykstantys technologiniai pokyčiai, be visa ko, lems šių naujos kartos purkštukų (su 8 skylėmis) naudojimą ateityje dėl esminių savybių - kuro ekonomijos ir mažos CO<sub>2</sub> emisijos.

## **IŠVADOS IR PASIŪLYMAI**

Išanalizavus teorinius pjezokeraminių purkštukų aspektus bei atlikus analitinį tyrimą, daromos tokios išvados:

1. Dozuojamos medžiagos dinaminės charakteristikos (šiuo atveju kuro) kinta priklausomai nuo į purkštuką paduodamos impulso trukmės, dažnumo ir amplitudės dydžio.
2. Pjezoelektrinių savybių turinčios medžiagos mechaninį poveikį paverčia elektriniu impulsu ir atvirkščiai. Įrengimai su šiomis medžiagomis yra kompaktiškesni, jautresni valdymui bei jų didesnis naudingumo koeficientas, taip pat jos nereikalauja ypatingos priežiūros eksploataciniu laikotarpiu.
3. Tyrimo metu nustatyta kuro lašelių dydžio priklausomybė didinant kuro slėgį. Kuo didesnis kuro slėgis purkštuke, tuo mažesni išpurškiami kuro lašeliai.
4. Nekeičiant kuro purkštuko parametrų galima išgauti iki 50% mažesnius kuro lašelius. Padidinus skylučių skaičių purkštuke ir sumažinus jų diametrus gaunami kuro lašeliai dar 33% mažesni, tačiau kaip rodo skaičiavimai, išpurškiamo iš purkštuko kuro kiekis beveik nesumažėja.

## **PASIŪLYMAS**

Autoriaus pasiūlymas, nepaisant brangesnės pjezokeraminių purkštukų eksploatacijos rinktis automobilius, kuriuose įdiegti naujos kartos pjezokeraminiai purkštukai, nes vykstantys technologiniai pokyčiai, be visa ko, lems šių naujos kartos purkštukų (su 8 skylėmis) naudojimą ateityje dėl esminių savybių - kuro ekonomijos ir mažos CO<sub>2</sub> emisijos.

## LITERATŪRA

1. ARAI, M., et al. *Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by a diesel Nozzle*. 1984. SAE Technical Paper.
2. BAE, CH., KANG, J. *Diesel Spray Characteristics of Common-Rail VCO Nozzle Injector*. 2000. Congreso THIESEL-2000, Valencia, Spain.
3. BAE, CH., KANG, J. *Diesel Spray Development of VCO Nozzles for High Pressure Direct-Injection*. 2000.SAE Technical Paper 2000-01-1254
4. BAE, CH., et al. *The Influence of Injector Parameters on Diesel Spray*. 2000. Congreso THIESEL-2000, Valencia, Spain.
5. BOSCH, ROBERT. *The Common Rail Diesel Injection System Explained. Technical features*. 2004.
6. BRACCO, F.V. *Structure of High Speed Full Cone Sprays. Recent Advances in Gas Dynamycs, Plenum Publishing Corporation, N. Y.* 1983.
7. BUBULIS, A. *Preciziniai vibraciniai įrenginiai skysčiams ir birioms medžiagoms dozuoti*. Monografija. Kaunas. Technologija. 1999, p. 160.
8. *Common Rail Diesel Fuel Systems. Journal of AK Training* [interaktyvus]. 2011. [žiūrėta 2013 m. sausio 20 d.]. Prieiga per internetą:  
<<http://www.yildiz.edu.tr/~oisin/Dersler/Dersnotlari/0653611/dinjection.pdf>>
9. DENT, J.C. *A Basis for the Comparison of Variuos Experimental Methods for Studying Spray Penetration. SAE Technical Paper 710571*.
10. GIEDRA, Kazimieras, KIRKA, Aleksandras, SLAVINSKAS, Stasys. *Automobiliai*. Kaunas, 2006. p. 217. ISBN 9955-707-05-4
11. JAFFE, B. Et al. *Piezoelectric Ceramics. Academic press, London and New York, 1971, p. 317*.
12. HIROYASU, H., ARAI, M. *Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines. SAE Technical paper 900475*. 1990, p. 12
13. HIROYASU, H., KADOTA, T. *Fuel Droplets Size Distribution in Diesel Combustion Chamber. SAE Technical paper*. 1974, p. 10
14. HIROYASU, H., MIAO H. *Optical Techniques for Diesel Spray and Combustion*. Selected papers from the THIESEL 2002 Conference, Valencia, Spain, 11-13 September 2002.

15. KECH, J. et al. *Common Rail Fuel Injection: Key technology for clean and economical combustion. Engine Technology* [Interaktyvus]. 2011, p. 1-5 [žiūrėta 2013 m. kovo 17 d.]. Prieiga per internetą: <[http://www.mtuonsiteenergy.com/fileadmin/fm-dam/mtu\\_onsite\\_energy/5\\_press/technical-articles/en/MTU\\_White\\_Paper\\_Fuel\\_Injection.pdf](http://www.mtuonsiteenergy.com/fileadmin/fm-dam/mtu_onsite_energy/5_press/technical-articles/en/MTU_White_Paper_Fuel_Injection.pdf)>
16. KENNAIRD, D., CRUA, C., HEIKAL, M. *A New High Pressure Diesel Spray Research Facility* [Interaktyvus]. 2000, p. 1- 10. [žiūrėta 2013 m. kovo 28 d.]. Prieiga per internetą: <[http://www.academia.edu/1297679/A\\_new\\_high-pressure\\_diesel\\_spray\\_research\\_facility#](http://www.academia.edu/1297679/A_new_high-pressure_diesel_spray_research_facility#)>
17. KITCHEN, TONY. *Common Rail Diesel Fuel Systems* [Interaktyvus]. 2012. [žiūrėta 2013 m. gegužės 3 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.yildiz.edu.tr/~oisin/Dersler/Dersnotlari/0653611/dinjection.pdf>>
18. LINDSTRÖM, MIKAEL. *Injector Nozzle Hole Parameters and their Influence on Real DI Diesel Performance* [interaktyvus]. 2009, p. 3-49 [žiūrėta 2013 m. kovo 28 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.google.lt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=3&sqi=2&ved=0CE8QFjAC&url=http%3A%2F%2Fkth.diva-portal.org%2Fsmash%2Fget%2Fdiva2%3A159595%2FFULLTEXT01&ei=7PJyUbOSKvSQ4ATNr4CQBQ&usg=AFQjCNFfMNzCQH8S1A5BhD0XfxKJb2OS1A&sig2=CjGLBFtY3ITp0YW3J6yMPw>>
19. MAGNUSSEN, M. *Vibratory Motors and Methods of Making and Using Sama. USA, Patent No. 6870340 B2, 2005*
20. *Milestones in Common Rail Development* [interaktyvus]. Bosch žurnalas. 2010. [žiūrėta 2013 m. sausio 3d. ] Prieiga per internetą: <[http://www.boschdieselcenter.com.my/mam/boaa/master/docs/artikel\\_meilsteine-der-cre\\_eng.pdf](http://www.boschdieselcenter.com.my/mam/boaa/master/docs/artikel_meilsteine-der-cre_eng.pdf)>
21. *Pagrindiniai hidraulikos dėsniai, reiškiniai ir sąvokos. KTU.* [Interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2013 m. balandžio 3 d.]. Prieiga per internetą: <[http://www.panko.lt/geba/ktu\\_puslapis/files/Hidr\\_kn1.pdf](http://www.panko.lt/geba/ktu_puslapis/files/Hidr_kn1.pdf)>
22. RAGULSKIS, K. Et al. *Vibromotors for Precision Microrobots. Hemisphere Publishing, USA, ISBN 89116054905. 1988, p. 310*
23. RAMOS, J.I. *Internal combustion engine modeling.* Butterworth-Heinemann Limited, 1999, p.150-158. ISBN 0750612096, 978-750612098

24. SEMIN et al. *Effect of Injector Nozzle Holes on Diesel Engine Performance . Fuel Injection*. [Interaktyvus]. 2010, p. 83 -94 [žiūrėta 2013 m. balandžio 12 d.]. Prieiga per internetą: <  
<http://www.intechopen.com/books/fuel-injection/effect-of-injector-nozzle-holes-on-diesel-engine-performance> >
25. SEMIN, IDRIS, Awang, BAKAR, Rosli Abu. *Effect of Port Injection CNG Engine Using Injector Nozzle Multi Holes on Air-Fuel Mixing in Combustion Chamber* [Interaktyvus]. European Journal of Scientific Research. 2009, p. 16-24 [žiūrėta 2013 m. kovo 12 d.]. Prieiga per internetą:  
[http://www.academia.edu/2347977/Effect\\_of\\_Port\\_Injection\\_CNG\\_Engine\\_Using\\_Injector\\_Nozzle\\_Multi\\_Holes\\_on\\_Air-Fuel\\_Mixing\\_in\\_Combustion\\_Chamber](http://www.academia.edu/2347977/Effect_of_Port_Injection_CNG_Engine_Using_Injector_Nozzle_Multi_Holes_on_Air-Fuel_Mixing_in_Combustion_Chamber)
26. SEYKENS, X.L.J., SOMERS, L.M.T., BAERT R.S.G. *Detailed Modeling of Common Rail Fuel Injection Process* [interaktyvus]. 2005 [žiūrėta 2013 m. kovo 3 d. ]. Prieiga per internetą:  
<http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/6269.pdf> >
27. SIEBERS, D.L. *Liquid – Phase Fuel Penetration in Diesel Sprays Based on Mixing Limited Vaporization. Technical paper*. [Interaktyvus]. 1999, p. 7 [žiūrėta 2013 m. balandžio 7 d.]. Prieiga per internetą :< <http://papers.sae.org/1999-01-0528/> >
28. SIEBERS, D.L. *Liquid – Phase Fuel Penetration in Diesel Sprays. Technical paper*. [Interaktyvus] 1998, p. 5 [žiūrėta 2013 m. balandžio 21 d.]. Prieiga per internetą:  
<http://papers.sae.org/980809/>
29. SIEBERS, D.L., *Scaling Liquid-Phase Fuel penetration in Diesel Spray Based on Mixing-limited Vaporization. SAE Technical Paper 1999-01-0528. 1999.*
30. SUSLAVIČIUS, Liucijus. “Pamaitinti“ dyzelį tačiau - kaip?. *Transporto pasaulis* [interaktyvus]. 2004, Nr. 5 (29) [žiūrėta 2013 m. vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: <  
[http://www.tp.cargo.lt/content.php?art\\_id=214](http://www.tp.cargo.lt/content.php?art_id=214)>
31. SOLOGUBAS, R., SOLOGUBAS, L., BALTĖNAS, R. *Automobilų degalai ir tepalai*. Vilnius, 1998, p.39. ISBN 9986-546-29-X
32. WIELLIGH, AJ., BURGER, ND, VAAL, PL. *Diesel injector failures and the consequences – caused by fuel quality – Case studies* [Interaktyvus]. 2004, p. 1-19 [žiūrėta 2013 m. balandžio 17 d.]. Prieiga per internetą:  
[http://www.sacea.org.za/.%5Cdocs%5CSAIT%20Referaat%20Inspuiters\\_2\\_Shrunk.pdf](http://www.sacea.org.za/.%5Cdocs%5CSAIT%20Referaat%20Inspuiters_2_Shrunk.pdf)>