



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Vienkomponenčio kuro raketinio variklio katalizatoriaus  
kameros ir jos įkrovos savybių tyrimas ir traukos sistemos  
konceptijos projektas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Paulius Baronas**  
Projekto autorius

**Doc. dr. Sigitas Kilikevičius**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2022**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Vienkomponenčio kuro raketinio variklio katalizatoriaus  
kameros ir jos įkrovos savybių tyrimas ir traukos sistemos  
konceptijos projektas**

Baigiamasis magistro projektas  
Aeronautikos inžinerija (6211EX024)

---

**Paulius Baronas**

Projekto autorius

**Doc. dr. Sigitas Kilikevičius**

Vadovas

**Doc. dr. Ramūnas Česnavičius**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2022**



**Kauno technologijos universitetas**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Paulius Baronas

## **Vienkomponenčio kuro raketinio variklio katalizatoriaus kameros ir jos įkrovos savybių tyrimas ir traukos sistemos koncepcijos projektas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Paulius Baronas

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



## Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Studijų programa – Aeronautikos inžinerija (6211EX024)

# Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studentui(-ei) Pauliui Baronui

### 1. Baigiamojo projekto tema:

Vienkomponenčio kuro raketinio variklio katalizatoriaus kameros ir jos įkrovos savybių tyrimas ir traukos sistemos koncepcijos projektas

Research of the Catalyst Chamber and Bed Properties of a Monopropellant Rocket Thruster and Conceptual Design of the Propulsion System

### 2. Projekto tikslas:

Ištirti vienkomponenčio kuro raketinio variklio katalizatoriaus kameros savybes ir pagal tai suprojektuoti konceptualią traukos sistemą.

### 3. Projekto uždaviniai:

1. Ištirti vienkomponenčio kuro variklių veikimo principą, pagrindinius projektinius kriterijus ir jų įtaką galutiniam sistemos veikimui;
2. Apibūdinti ir ištirti naujo tipo siūlomą katalizatoriaus įkrovos užpildymo metodą;
3. Palyginti naujo siūlomo būdo rezultatus su įprastais, bei randamais literatūroje;
4. Remiantis gautais rezultatais, suprojektuoti galimą konceptualią traukos sistemą.

### 4. Projekto aprašomosios dalies struktūra:

Preliminari

### 5. Projekto konsultantai:

Baigiamojo projekto autorius	Paulius Baronas	2020-10-09
	<i>(vardas, pavardė, data)</i>	
Baigiamojo projekto vadovas	Doc. dr. Sigitas Kilikevičius	2020-10-09
	<i>(pareigų sutrumpinimas, vardas, pavardė, data)</i>	
Krypties studijų programų vadovas	Doc. Saulius Japertas	2020-10-09
	<i>(pareigų sutrumpinimas, vardas, pavardė, data)</i>	

Baronas, Paulius. Vienkomponenčio kuro raketinio variklio katalizatoriaus kameros ir jos įkrovos savybių tyrimas ir traukos sistemos koncepcijos projektas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Doc. dr. Sigitas Kilikevičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Aeronautikos inžinerija (E14), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: vienkomponentis kuras, traukos sistema, katalizatorius.

Kaunas, 2022. 57 p.

## Santrauka

Darbe analizuojama kur ir kodėl naudojami vienkomponenčio kuro raketiniai varikliai, jų veikimo principas, pagrindiniai projektiniai kriterijai. Detaliai apžvelgiamas ir išbandomas modifikuotas katalizatoriaus kameros užpildymo metodas biriomis dalelėmis. Įvertinus šiuo metodu užpildytos kameros hidraulinį slėgį, atliekamas koncepcinis traukos sistemos projektavimas.

Suformulavus darbo tikslą ir uždavinius, atliekama literatūros apžvalga, įvertinami pagrindiniai projektiniai traukos sistemos kriterijai. Apžvelgiamos šiuo metu naudojamos katalizatoriaus įkrovos, jų privalumai ir trūkumai. Taip pat, atliekama vienkomponenčių kuro apžvalga. Tai atlikus, pristatomas autoriaus siūlomas katalizinės kameros užpildymo metodas, kuris remiasi chromatografijoje taikoma technologija. Šiam tikslui buvo įsigyta dviejų rūšių aliuminio oksido dalelių – 600-1200  $\mu\text{m}$  ir 50-200  $\mu\text{m}$ . Aprašomos autoriaus naudojamos katalizatoriaus matricos, atliekamos vizualinės jų patikros elektroniniu mikroskopu. Įvertinami tinkamiausi tirpikliai jų suspendavimui. Katalizatoriaus kameros užpildymo granulėmis metodas, naudojant aukštą slėgį, išbandomas praktiškai. Užpildomos 3 eksperimentinės kameros, bei 2 kontrolinės. Atliekama slėgio paveiktos matricos pakartotinė apžiūra elektroniniu mikroskopu. Įvertinus, jog aukštas užpildymo slėgis katalizatoriaus matricai nepadarė žalos, atliekami slėgio testai. Jų metu naudojant stūmoklinę pompą, tikrinamas susidarantis skirtingas slėgis skirtingose kamerose, esant tam pačiam etanolio tūrio debitui. Atliekama rezultatų analizė, sudaromi grafikai. Nustatoma jog 600-1200  $\mu\text{m}$  dalelės yra tinkamesnės naudoti katalizatoriaus matricai, remiantis tuo, jog atgalinis slėgis, biriu metodu užpildytas kameras, viršija tik 2-3 kartus. Išnagrinėjus rinkoje esančias panašias sistemas ir palyginus jų parametrus su gautais eksperimentiniais, atliekamas pilnas traukos sistemos projektavimas. Atsižvelgiant į vienkomponenčių kuro apžvalgos skyriuje pateiktą informaciją, projektuotinai sistemai parenkamas kuras – vandenilio peroksidas ir aktyvusis katalizatoriaus elementas – kalio jodidas. Užsibrėžus tikslą pasiekti 0.5 g/s kuro debitą, apskaičiuojamas reikalingas slėgis sistemoje. Skaičiavimai atliekami, remiantis pirminiais slėgio testo rezultatais. Galiausiai, suprojektuojamas slegiančiųjų dujų ir kuro bakas. Pagal apskaičiuotą sistemos slėgį, atliekami skaičiavimai „Solidworks Simulation“ programa, siekiant nustatyti tinkamiausią bako sienelių storį. Įvertinus, jog slėginiams indams reikalingas bent 4 atsargos koeficientas, bako sienelių storis parenkamas 5 mm. Atliekamas koncepcinis pačio variklio, su purkštuvu, katalizatoriaus ir degimo kamera, tūta projektavimas.

Galiausiai, įvertinami prognozuotini suprojektuotos sistemos darbiniai parametrai, atliekami palyginimai su rinkoje esančiais pavyzdžiais. Pateikiamos išvados.

Baronas, Paulius. Research of the Catalyst Chamber and Bed Properties of a Monopropellant Rocket Thruster and Conceptual Design of the Propulsion System. Masters's Final Degree Project/ supervisor Assoc. Prof. Dr. Sigitas Kilikevičius; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Aeronautical Engineering (E14), Engineering Science.

Keywords: monopropellant, propulsion system, catalyst.

Kaunas, 2022. 57 p.

### **Summary**

This project analyzes where and why monopropellant thrusters are used, what their working principles and main design criteria are. Modified granular catalyst chamber packing method, using high pressure, is reviewed in detail, and tried practically. After evaluating the chamber properties, packed with the modified method, conceptual design of full propulsion system is done.

Afterwards, literature is reviewed, main propulsion system design criteria are evaluated. Currently used catalyst chamber beds are reviewed and compared. Furthermore, main monopropellant, which are currently used, are reviewed, and compared. Then, authors proposed idea of packing catalyst in the thruster chamber is introduced, and described, which takes inspiration from chromatography field. For this reason, two types of aluminum oxide particles were procured: 600-1200  $\mu\text{m}$  and 50-200  $\mu\text{m}$ . The catalyst matrices are described and analyzed using scanning electron microscope. The most suitable solvents, to disperse the particles in are found. The proposed modified catalyst matrix packing method is tried practically. 3 experimental and 2 control chambers are packed. The catalyst matrix is removed after packing and checked with scanning electron microscope again to check for damage. After no damage is found, pressure tests are performed. Different backpressures are checked, resulting from differently packed catalyst support matrices, while testing with same volumetric flow rate. Ethanol is used as push solvent. Results are then analyzed, and graphs made. It is concluded that 600-1200  $\mu\text{m}$  particles are most suitable to be used as catalyst support, due to more reasonable backpressure values, which are only 2-3 times higher, than chambers packed with usual free-fall method. After reviewing existing market similar systems, and comparing them to experiments data, full propulsion scheme is designed. Based on the information acquired in monopropellants review section, the fuel for projected propulsion system is selected to be hydrogen peroxide with active catalyst potassium iodide. 0.5 g/s mass flow debit is targeted, so the required pressure difference is calculated to achieve it. Calculations are done based on initial pressure tests values. Finally, pressuring gases and fuel tank is designed. Based on the projected system pressure, simulations are done with "Solidworks Simulation", to determine tank wall thickness. Considering that at least 4 factor of safety is recommended for pressure vessels, wall thickness is selected to be 5 mm. Furthermore, conceptual thruster design is done, which includes injector, catalyst and combustion chamber, nozzle.

Lastly, working parameters of the designed propulsion system are projected, compared to market example. Conclusions are then presented.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>	<b>11</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>12</b>
<b>1. Vienkomponenčio kuro variklio veikimo principo analizė.....</b>	<b>14</b>
1.1. Struktūrinė schema .....	14
1.2. Specifinio impulso samprata .....	19
<b>2. Naudojamų vienkomponenčių kurų apžvalga .....</b>	<b>21</b>
2.1. Vandens peroksidą (HTP) .....	21
2.2. Hidrazinas $N_2H_4$ .....	21
2.3. ADN (Amonio dinitro amidas) $H_4N_4O_4$ .....	22
2.4. HAN (hidroksilamonio nitratas) $H_4N_2O_4 \rightarrow NH_2OH \cdot HNO_3$ .....	22
2.5. Azoto oksidas $N_2O$ .....	23
2.6. Kiti galimi vienkomponenčiai kuro variantai .....	24
<b>3. Katalitinio sluoksnio analizė ir eksperimentai.....</b>	<b>25</b>
3.1. Tiriamasis objektas .....	25
3.2. Kamerų mechaninės savybės ir geometrija .....	27
3.3. Suspensijos ar emulsijos sudarymas katalizatoriaus dalelėms .....	28
3.3.1. Analizė elektroniniu mikroskopu .....	28
3.3.2. Pirminių pavyzdžių analizės elektroniniu mikroskopu rezultatai .....	29
3.4. Suspensijos ir emulsijos ruošimas, kamerų užpildymui .....	32
3.5. Eksperimentinių katalitinių kamerų analizė .....	34
<b>4. Inžinerinės traukos sistemos projektavimas .....</b>	<b>42</b>
4.1. Traukos jėgos ir specifinio impulso vertinimas.....	42
4.2. Kuro ir katalizatoriaus parinkimas .....	42
4.3. Masės debitas.....	43
4.4. Sistemos slėgis.....	43
4.5. Kuro bako talpos ir sienelių storio nustatymas.....	45
4.6. Sienų storio patikra.....	45
4.7. Galutinės traukos schemos sudarymas .....	49
4.8. Prognozuojami suprojektuotos sistemos rezultatai. ....	52
<b>Išvados .....</b>	<b>54</b>
<b>Informacijos šaltinių sąrašas .....</b>	<b>55</b>

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Eksperimentų apžvalga.....	27
<b>2 lentelė.</b> Tirpiklių parinkimas .....	33
<b>3 lentelė.</b> Etanolio ir vandenilio peroksidų charakteristikų palyginimas [41] .....	35
<b>4 lentelė.</b> Slėgio testų suvestinė. Žr. lentelę nr.5 dėl eksperimentų informacijos. ....	35
<b>5 lentelė.</b> Užpildo svėrimo rezultatai .....	40
<b>6 Lentelė.</b> Rinkoje esančios ir projektuotinos cheminės traukos sistemos palyginimas [20].....	53



## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Paleistų palydovų, kurių masė <500 kg istorinis kiekio grafikas[34] .....	12
<b>2 pav.</b> Vienkomponenčio kuro variklio schema [12] .....	14
<b>3 pav.</b> Amonio dinitro amido (ADN) kuro traukos sistema (variklis). UAB "Nanoavionika" produktas [38] .....	15
<b>4 pav.</b> Lavalio tūtos schema ir pagrindinės charakteristikos [27] .....	15
<b>5 pav.</b> Klasikinis vienos angos kuro purkštuvas [21] .....	16
<b>6 pav.</b> Vidutinio kūgio skersmens ir atgalinio slėgio priklausomybė nuo skylių skaičiaus [21] ..	16
<b>7 pav.</b> Atviro kūgio ir užpildyto kūgio purkštukai bei jų projekcijos [21] .....	17
<b>8 pav.</b> Katalizatoriaus matricos pavyzdžiai. Monolitinė struktūra .....	17
<b>9 pav.</b> Granulinis katalizatorius [11] .....	18
<b>10 pav.</b> Skirtingų geometrinių figūrų tūrio ir paviršiaus ploto santykis [42] .....	18
<b>11 pav.</b> Galimos katalizatoriaus tinklelio struktūrinės dalys [8] .....	19
<b>12 pav.</b> ADN skilimo reakcija [23] .....	22
<b>13 pav.</b> HAN skilimo reakcijos [2] .....	23
<b>14 pav.</b> Suspaustu oru varoma "Haskel" pompa .....	25
<b>15 pav.</b> Katalitinės kameros užpildymas aukštame slėgyje .....	26
<b>16 pav.</b> Principinis kameros brėžinys. 1,2 – filtrai; 3 – kameros vamzdelis, 4 – sandarinamoji veržlė. ....	27
<b>17 Pav.</b> Eksperimentinės kameros vaizdas, be viršutinės veržlės. ....	28
<b>18 pav.</b> Katalizatoriaus matricos dalelės. Kairėje: 50 – 200 mikronų, dešinėje : 600 – 1200 mikronų .....	28
<b>19 pav.</b> Elektroninio mikroskopo veikimo principo schema [7] .....	29
<b>20 pav.</b> Katalizatoriaus matricos dalelės 600 – 1200 mikronų SEM mikroskopu, x50 didinimas ...	29
<b>21 pav.</b> Katalizatoriaus matricos dalelės 600 – 1200 mikronų SEM mikroskopu, x150 didinimas .	30
<b>22 pav.</b> Katalizatoriaus matricos dalelės 600 – 1200 mikronų SEM mikroskopu, x5500 didinimas	30
<b>23 pav.</b> Katalizatoriaus matricos dalelės 50 – 200 mikronų SEM mikroskopu, x50 didinimas .....	31
<b>24 pav.</b> Katalizatoriaus matricos dalelės 500 – 200 mikronų SEM mikroskopu, x200 didinimas ...	31
<b>25 pav.</b> Katalizatoriaus matricos dalelės 50 – 200 mikronų SEM mikroskopu, x3000 didinimas ...	32
<b>26 pav.</b> Eksperimentų: 1,2,3,4 rezultatai .....	33
<b>27 pav.</b> Eksperimentų 4a(kairėje) ir 1a rezultatai .....	34
<b>28 pav.</b> Priešingo poliškumo dalelių ir tirpalo sąveikos pavyzdys (nepageidaujamas). Maišymasis nevyksta .....	34
<b>29 pav.</b> p2 (užpildyta naudojant aukštą slėgį, vidutinis dalelių dydis – 0,125 mm) ir p3 (užpildyta bėrimo metodu, vidutinis dalelių dydis – 0,125 mm) slėgio kreivių palyginimas .....	36
<b>30 pav.</b> p5 (užpildyta naudojant aukštą slėgį, vidutinis dalelių dydis – 0,125 mm) ir p2 (užpildyta naudojant aukštą slėgį, vidutinis dalelių dydis – 0,125 mm) slėgio kreivių palyginimas .....	36
<b>31 pav.</b> p5 bei p2 kartu palyginimas su (užpildyta naudojant aukštą slėgį, vidutinis dalelių dydis – 0,125 mm) p3 (užpildyta bėrimo metodu, vidutinis dalelių dydis – 0,125 mm) slėgio kreivių palyginimas .....	37
<b>32 pav.</b> p1 (užpildyta naudojant aukštą slėgį, vidutinis dalelių dydis – 0,9 mm) ir p4 (užpildyta bėrimo metodu, vidutinis dalelių dydis – 0,9 mm) slėgio kreivių palyginimas .....	37
<b>33 pav.</b> Katalizatoriaus dalelės 600 – 1200 mikronų SEM mikroskopu, x52 didinimas. Po užpildymo .....	38

<b>34 pav.</b> Katalizatoriaus dalelės 600 – 1200 mikronų SEM mikroskopu, x200 didinimas. Po užpildymo .....	39
<b>35 pav.</b> Katalizatoriaus dalelės 50 – 200 mikronų SEM mikroskopu, x50 didinimas. Po užpildymo .....	39
<b>36 pav.</b> Katalizatoriaus dalelės 50 – 200 mikronų SEM mikroskopu. x200 didinimas. Po užpildymo .....	40
<b>37 pav.</b> Prognozuotina masės debitas ir kameros slėgio skirtumo priklausomybė .....	44
<b>38 pav.</b> PC104 skylių geometrija [26] .....	45
<b>39 pav.</b> Pagrindinės bako dimensijos .....	46
<b>40 pav.</b> Bako įtvirtinimo ir apkrovos vaizdas, su pjūviu. ....	46
<b>41 pav.</b> „Solidworks simulation“ įtempių analizė esant skirtingiems bako sienelių storiams .....	47
<b>42 pav.</b> „Solidworks simulation“ atsargos koeficientų analizė esant skirtingiems bako sienelių storiams.....	48
<b>43 pav.</b> Poslinkių analizės rezultatai. ....	48
<b>44 pav.</b> Slegiančiųjų dujų tūrio ir misijos galo slėgio/debito priklausomybė .....	49
<b>45 pav.</b> Principinė sistemos schema. 1 - Katalitinė degimo kamera, su tūta ir purkštuvu – variklis; 2 - Jungtis tarp kuro padavimo vožtuvo ir variklio; 3 - Kuro ir slegiančiųjų dujų bakas; 4 – M3 montavimo strypai; 5 – M3 veržlės; 6 – Kuro padavimo solenoidinis vožtuvas; 7 – Atbulinis vožtuvas slegiančiųjų dujų pildymui; 8 – Atbulinis vožtuvas kuro pildymui .....	50
<b>46 pav.</b> Izometrinis sistemos vaizdas .....	50
<b>47 pav.</b> Principinis variklio brėžinys. 1, 2 – filtrai; 3 – katalizatoriaus/degimo kamera; 4 – prisukamos purkštuvai; 5 – prisukama tūta .....	51
<b>48 pav.</b> Izometrinis variklio vaizdas .....	52
<b>49 pav.</b> Purkštuvo vaizdas iš vidaus.....	52

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Terminai:

**Naudingoji krovinių masė (angl. *payload*)** – į orbitą ar kosminį kūną keliamas krovinys, kuris nėra raketos ar erdvėlaivio dalis [31].

**Egzoterminis efektas** – cheminės reakcijos metu išsiskirianti šiluma [31].

**3D spausdinimas** – gamybos būdas, naudojant aukštoje temperatūroje išlydytą formuojamą medžiagą, ekstruzijos būdu stumiant per purkštuką. Tokiu principu formuojamos dalys, visose trijose geometrinėse plokštumose [8].

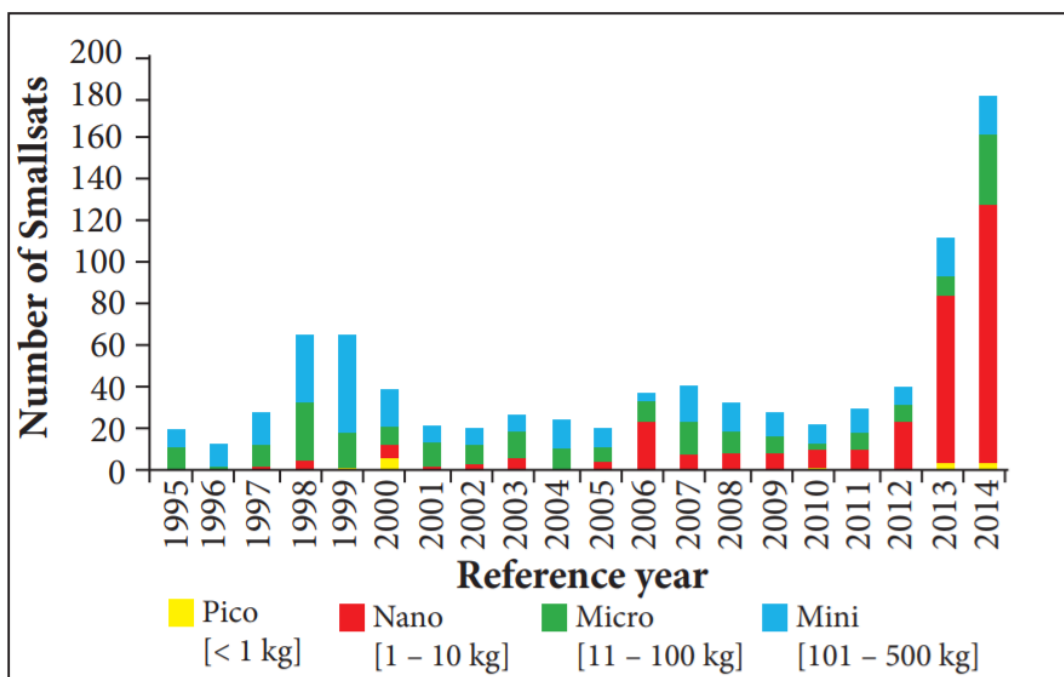
**SDS** – Natrio laurilsulfatas (angl. *Sodium dodecyl sulfate*).

**TKS** – Tarptautinė kosminė stotis.

**Atgalinis slėgis** – Didžioji dalis darbo šaltinių yra anglų kalba, tad ten naudojamas terminas yra *backpressure*, kurio tiesioginis vertimas ir taikomas. Visgi, lietuviškoje literatūroje artimiausias atitikmuo būtų hidrauliniai slėgio nuostoliai arba praradimai.

## Įvadas

Modernūs palydovai teikia informaciją, kuri turi mokslinį, karinį ir komercinį pritaikymą įvairiuose sektoriuose: žemdirbystė, klimato ir vandenynų stebėseną, lėktuvų skrydžio kontrolė, komunikacijos, navigacija, žemėlapiai, žvalgyba, ir kiti. Randant vis daugiau pritaikymo sričių palydovams, jų skaičius orbitoje taip pat sparčiai auga. Per pastaruosius 20 metų (imant 2017 m. duomenis) į orbitą buvo paleista virš 2500 palydovų. 1/3 šių palydovų masė buvo mažesnė už 500 kg [34]. Palydovai yra skirstomi į 2 plačias grupes pagal jų masę. Didieji – virš 500 kg ir mažieji – iki 500 kg. Mažieji toliau yra suskirstyti į sub-kategorijas: mikropalydovai – 10:100 kg, nanopalydovai – 1:10 kg, pikopalydovai – 0,1:1 kg. Kadangi sparčiai besivystant elektronikai, medžiagų mokslui ir IT vis daugiau komponentų tampa mažesni ir lengvesni, nanopalydovai pasidaro tinkami vis platesniam misijų pasirinkimui (1 pav.). Nanopalydovuose galima sutalpinti daugumą pagrindinių komponentų, reikalingų atlikti įprastas palydovų misijas: mokslinius tyrimus, žemosios orbitos stebėjimą, komunikacijas ir t.t., tuo pačiu išlaikant nedidelę įrenginio masę ir dydį. Šie komponentai įprastai būna matomųjų bangų kameros, infra-raudonųjų ar UV spindulių kameros, masių spektrometrai, antenos ir kt. Kadangi keliamo į kosmosą krovinio (angl. *payload*) masė yra pagrindinis parametras, apibūdinantis pakėlimo kainą, vis daugiau įmonių ir institucijų renkasi lengvuosius nanopalydovus savo reikmėms [12] [18].



1 pav. Paleistų palydovų, kurių masė <500 kg istorinis kiekio grafikas[34]

Nepaisant to, jog nanopalydovo iškėlimo į orbitą kaina yra sąlyginai maža, siekiama prailginti jo gyvavimo trukmę ir galimybę orientuotis orbitoje. Tai galima pasiekti palydove įmontavus variklį (angl. *thruster*). Naudojantis variklio pagalba, palydovas gali pakoreguoti savo orbitą, pasisukti reikiama kryptimi, taip pat baigus savo misiją išsikelti į „šiukšlių“ orbitą, ar nukreipti save į žemės atmosferą [12]. Būtent vienkomponenčio kuro tipo varikliai dažniausiai yra naudojami mažuose palydovuose dėl sąlyginai paprastos konstrukcijos, kontroliuojamo darbinio režimo ir išvystomos jėgos [14] [19]. Tokio tipo varikliai nanopalydovuose yra pagrindiniai traukos šaltiniai, tačiau kitokio tipo įrenginiuose jie gali būti pagalbinais. Pvz. raketose koreguoti jų apsisukimo aplink ašį kampus,

polinkio kampus, žmones gabenančiose kapsulėse, kaip susijungimo su TKS ar kitomis stotimis, priemonė (angl. *docking*), nusileidimo ant kietų planetų priemonė ir kt. [22] [16].

Vienkomponenčio kuro varikliai priskiriami cheminės traukos klasės sistemoms. Pastaraisiais metais populiarėja elektrinės traukos sistemos. Šios sistemos įprastai naudoja elektrinę šilumą ar magnetinį lauką, jog įgreitintų kuro daleles, dažniausiai dujas. Elektrinės sistemos yra labai ekonomiškos kuro atžvilgiu, užima nedaug vietos. Visgi, tokios sistemos nesukuria didelės traukos, ypač per trumpą laiko tarpą, tad nėra tinkamos greitiems manevrams [37] [32] [17]. Atsižvelgus į šiuos faktus, matoma jog cheminės traukos sistemos dar ilgą laiką bus aktualios.

**Tikslas** – ištirti vienkomponenčio kuro raketinio variklio katalizatoriaus kameros savybes ir pagal tai sumodeliuoti konceptualią traukos sistemą.

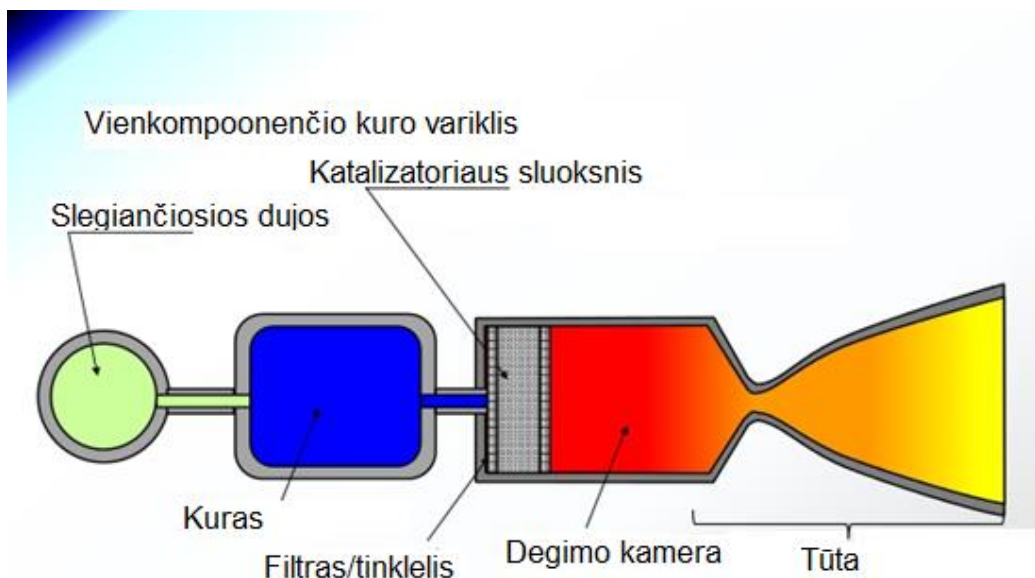
Uždaviniai:

1. Ištirti vienkomponenčio kuro variklio veikimo principą, pagrindinius projektinius kriterijus ir jų įtaką galutiniam sistemos veikimui;
2. Apibūdinti ir ištirti naujo tipo siūlomą katalizatoriaus įkrovos užpildymo metodą;
3. Palyginti naujo siūlomo būdo rezultatus su įprastais, bei randamais literatūroje;
4. Remiantis gautais rezultatais, sumodeliuoti galimą konceptualią traukos sistemą.

## 1. Vienkomponenčio kuro variklio veikimo principo analizė

Vienkomponenčio kuro variklis veikia trečiojo Niutono dėsnio principu, kuris nurodo jog dviejų kūnų sąveikos jėgos yra lygaus dydžio ir priešingų krypčių. Karštos išmetamosios dujos, generuoja trauką, priešingai savo išmetimo krypčiai.

### 1.1. Struktūrinė schema



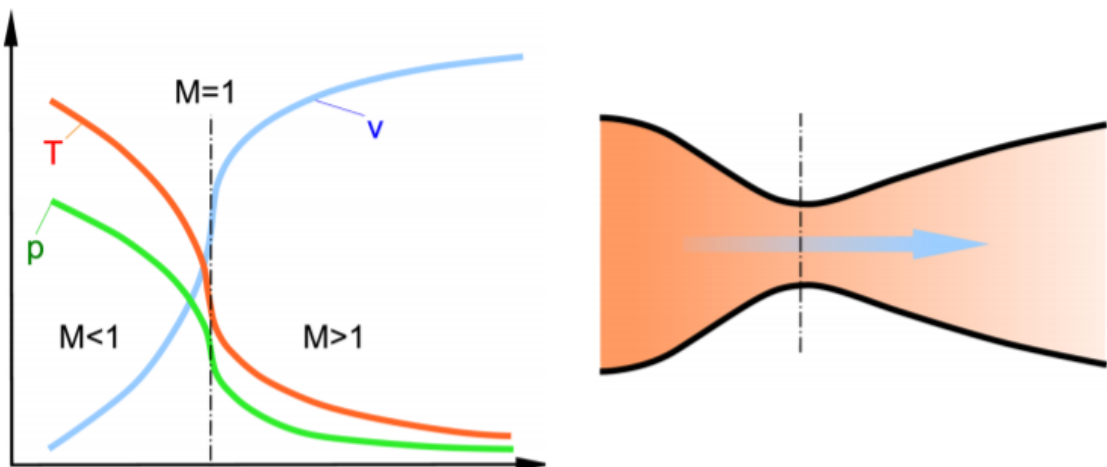
2 pav. Vienkomponenčio kuro variklio schema [12]

Vienkomponenčio kuro variklio schema pavaizduota 2 pav., ji susideda iš 5 pagrindinių dalių. 1 – slegiančiųjų dujų rezervuaras, 2 – vienkomponenčio kuro bakas, 3 – katalizatoriaus tinklelis, 4 – degimo kamera, 5 – išmetimo tūta. Inertinės dujos naudojamos slėgiui sudaryti ir kuroi dozuoti. Pats kuras laikomas bake, kuris įprastai būna iš vidaus padengtas teflonu. Kuras per solenoidinį vožtuvą, stumiančiųjų dujų pagalbą, leidžiamas į degimo kamerą. Joje įrengtas katalizatoriaus tinklas, kuris sumažina skilimo reakcijos pradžios temperatūrą ir skatina kuro skilimo reakciją. Jeigu katalizatorius yra granulines formos, jo ribos uždaromos metaliniais tinkleliais, jog nevyktų katalizatoriaus praradimas jam išskrendant lauk kartu su išmetimo dujomis. Vykstant katalizinei skilimo reakcijai, susidaro dujos, kurios dėl egzoterminio efekto įkaista ir yra išmetamos per de Lavalio arba konverguojančią - diverguojančią tūtą, 4 pav. Ši tūta padaryta taip jog dujos keliautų siaurėjančia sritimi iki kol pasiekia garso greitį ( $M=1$ ), ir po to – platėjančia sritimi, kai šis greitis yra pasiektas. Visos šios sudedamosios dalys įprastai yra montuojamos vientisoje struktūroje, su metalinėmis apsaugomis. Jeigu variklis naudoja vandenilio peroksida, tada išmetamųjų dujų temperatūra yra sąlyginai nedidelė ir konstrukcijoms renkamosi 316 SS metalas. Jeigu renkamosi kurai, kurie didina darbinę temperatūrą, tada išmetimo tūta gaminama iš iridžiu ar reniu dengtais metalais [5]. Vienkomponenčio kuro varikliai būna kuriami specifinėms misijoms, t.y. – vienetiniai, arba serijinių versijų konstruojami ir parduodami atskirai, pavyzdžiui tokių įmonių, kaip „ArianeGroup“, „NanoAvionics“. Pagrindiniai specifikuojami parametrai: „šlapia“ masė (angl. *wet mass*) su kuru ir „sausą“ masė (angl. *dry mass*) – be kuro, specifinis impulsas, traukos jėga, jėgos veikimo diapazonas, dujų ir skysčio debitas ir kt. [25][36].



**3 pav.** Amonio dinitro amido (ADN) kuro traukos sistema (variklis). UAB "Nanoavionika" produktas [38]

Lietuviškos įmonės „Nanoavionics“ siūloma traukos sistema mažųjų palydovų misijoms, pavaizduota 3 pav.



**4 pav.** Lavalio tūtos schema ir pagrindinės charakteristikos [27]

Ypatingai didelis dėmesys yra skiriamas tiksliam ir stabiliam kuro įpurškimui į katalizatoriaus tinklelį, užtikrinant didelę kuro sklaidą. Vienas iš optimaliausių sprendimų tai pasiekti, yra kuro garinimas, ir įpurškimas dideliu greičiu naudojant purkštuvus, jog katalizatoriaus tinklelį pasiektų žemo tankio kuro garai. Galimi skirtingi tokios sistemos dizainai. Vienas paprasčiausių - klasikinis vienos angos purkštuvai, pavaizduotas 5 pav. Išmetamo kūgio skersmuo apskaičiuojamas pagal formulę

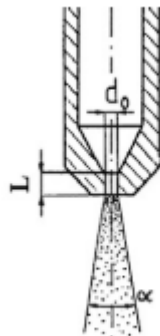
$$d_{con} = 0.75 \cdot d_{cb} \cdot \tan \alpha/2 \quad (1)$$

Čia:  $d_{con}$  - purškiamo kuro kūgio pagrindo skersmuo;

$d_{cb}$  – skylutės skersmuo;

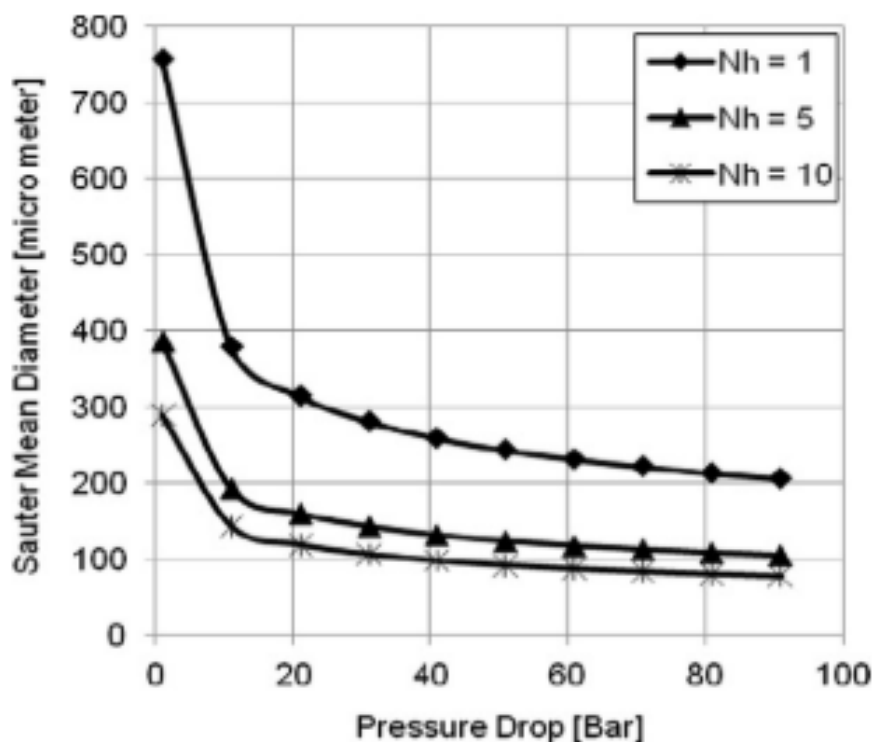
$\alpha$ – išeinančių dujų kampas.

Tai yra svarbus dizaino parametras, kadangi šis dydis turi sutapti su katalizatoriaus tinklelio skersmeniu.



5 pav. Klasikinis vienos angos kuro purkštuvas [21]

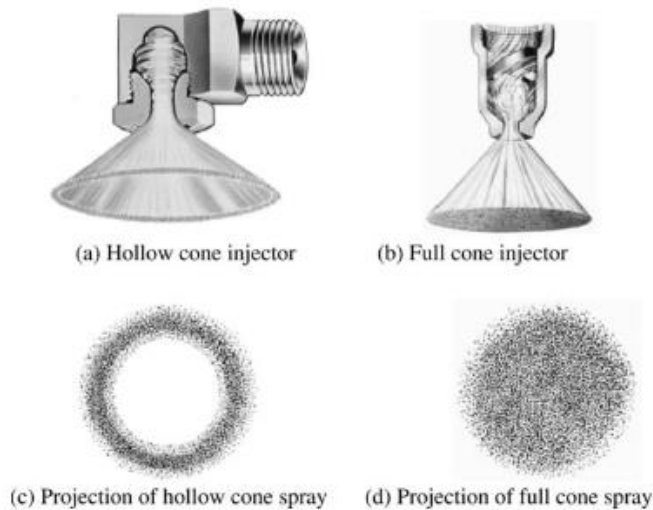
Norint mažinti išmetimo kūgio skersmenį ir taip pat sumažinti atgalinį slėgį, gali būti projektuojami purkštuvai su keliomis skylėmis išmetimui ( $N_h$ ). Didinant purkštuvą skylių kiekį, galima mažinti jų skersmenį (6 pav. ).



6 pav. Vidutinio kūgio skersmens ir atgalinio slėgio priklausomybė nuo skylučių skaičiaus [21]

Dar vienas svarbus parametras purkštuvą projektavime yra jo purkštuko kūgio užpildymas arba atviros geometrijos palikimas, pavyzdžiai pateikti 7 pav.

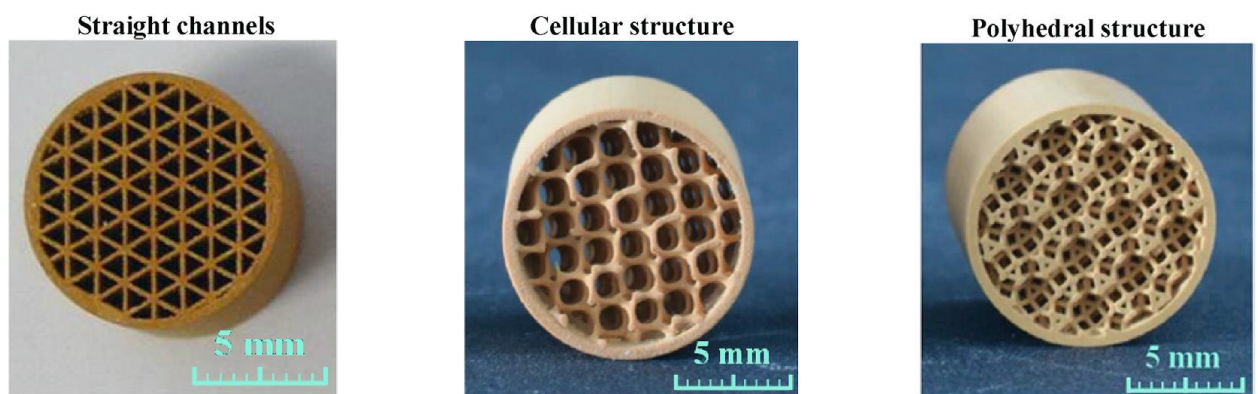




**7 pav.** Atviro kūgio ir užpildyto kūgio purkštukai bei jų projekcijos [21]

Vienkomponenčio kuro varikliuose yra pageidaujamas užpildyto kūgio tipo purkštukas, kadangi jis užpildo visą katalizatoriaus skerspjūvio plotą. Tai padidina kontaktinį paviršiaus plotą su katalizatoriumi, greitina reakciją ir didina kuro išėigą [21].

Katalizatoriaus tinklelis arba granulių sluoksnis projektuojamas ir gaminamas taip, jog jo matrica sudarytų kiek įmanoma didesnę paviršiaus plotą, jog padidintų kuro kontakto plotą su aktyviaisiais metalais ar medžiagomis. Šios struktūros įprastai sudaromas iš aliuminio arba silicio oksido ( $Al_2O_3/SiO_2$ ) ir yra skirtos tik aktyvioms medžiagoms laikyti. T.y. – aliuminio ar silicio oksidas savaime nėra katalizatorius, o tik matrica, kuri yra padengiama katalizatoriaus veikliosiomis medžiagomis kitame gamybos etape. Vieni dažniausių katalizatorių, kuriais yra dengiamos matricos: iridis(Ir), rutenis(Ru), manganas (Mn), paladis (Pd). Konkretus pasirinkimas priklauso nuo naudojamo kuro. Pagal savo struktūrą ir gamybos principus, katalizatoriaus struktūra skirstoma į du tipus: granules ir monolitinę struktūrą. Abi turi pranašumų ir trūkumų, tačiau tobulėjant medžiagų mokslui ir 3D spausdinimo technologijoms (angl. *additive manufacturing* – AM), vis labiau populiarėja monolitinės struktūros (8, 9 pav.) [23] [19].

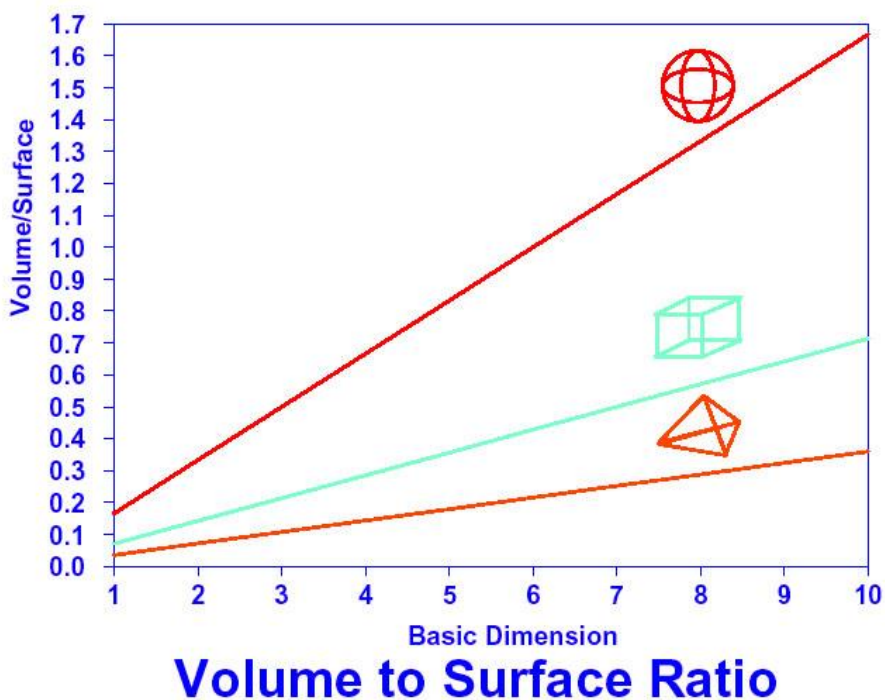


**8 pav.** Katalizatoriaus matricos pavyzdžiai. Monolitinė struktūra .

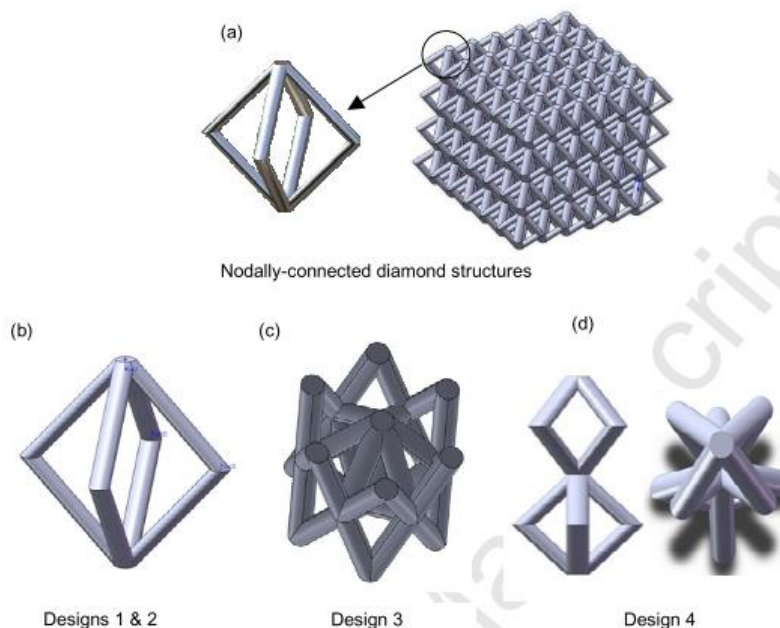


9 pav. Granulinis katalizatorius [11]

Monolitinės struktūros leidžia kontroliuoti sudaromos matricos porų skersmenį, konstrukcijos geometriją. Tokiu būdu lengviau kontroliuoti katalizatoriaus sluoksnio parametrus – paviršiaus plotą, pralaidumą, atgalinį slėgį (angl. *back pressure*). Įprastai monolitinėse struktūrose renkamosi trikampė ar kita daugiakampė geometrinė jungiamoji figūra tinkleliui sudaryti, jog būtų maksimizuojamas paviršiaus plotas, lyginant su užimamu tūriu (10, 11 pav.).



10 pav. Skirtingų geometrinių figūrų tūrio ir paviršiaus ploto santykis [42]



**11 pav.** Galimos katalizatoriaus tinklelio struktūrinės dalys [8]

Dar vienas svarbus monolitinės struktūros privalumas yra didesnis mechaninis atsparumas išeinančių dujų poveikiui. Monolitinė struktūra yra tvirtesnė, nejudanti. Granulės katalizinės reakcijos metu gali persigrupuoti ar net išlėkti pro išmetimo tūną. Tai mažina variklio stabilumą ir bendrą naudojimo resursą.

Pagrindinis granulinio katalizatoriaus privalumas yra kaina ir lengvesnis paviršiaus padengimas aktyviaisiais metalais [28] [23].

## 1.2. Specifinio impulso samprata

Specifinis impulsas yra matas, kaip efektyviai reaktyviniai varikliai naudoja kurą. Pagal klasikinį apibrėžimą tai yra jėgos padidėjimas per laiko vienetą.

$$I = \int F \cdot dt \quad (2)$$

Čia:  $F$  – jėga;

$dt$ - laiko pokytis .

Raketų moksle, specifinis impulsas naudojamas variklių efektyvumui apibūdinti. Jo dydis yra lygus išmetamų dujų greičiui padalintam iš gravitacinės traukos konstantos ( $g$ ).

$$I_{sp} = \frac{v_e}{g} \quad (3)$$

Čia:  $v_e$  - dujų ištekėjimo iš variklio greitis;

$g$  – laisvojo kritimo pagreitis.

Kuo specifinis impulsas didesnis, tuo kuro srautas sukuria didesnę jėgą. Matuojamas sekundėmis [s] [31]. Raketiniuose varikliuose, specifinis impulsas dažnai pateikiamas dviejose formose. Atmosferinis – raketai dar nepalikus žemės atmosferos ir vakuuminis, kai atsiskiria raketos pirmoji pakopa ir variklis pradeda veikti vakuume [15].

## 2. Naudojamų vienkomponenčių kūrų apžvalga

Vienkomponenčio kuro varikliai yra kuriami veikimui tik su vieno tipo kuru, kadangi nuo to priklauso koks katalizatoriaus tinklelis bus parenkamas, bei kokia aktyvioji medžiaga bus naudojama jo padengimui. Taip pat, kuro viskoziškumo, tankio, lakumo parametrai, turi įtakos koks padavimo purkštuvus bus projektuojamas. Reikalinga numatyti galimą kuro cheminę sąveiką su sistemos metaliniais elementais – kuro bako sienelėmis, vožtuvais, vamzdiniais. Svarbu jog variklio konstrukcija nesideformuotų kuro degimo temperatūroje. Taigi, kuro pasirinkimas norimam projektuoti varikliui yra vienas iš pagrindinių ir svarbiausių uždavinių [30] [22]. 2015 metais buvo pradėta tarptautinė iniciatyva „RHEFORM“, kurios tikslas atsisakyti toksiškų ir kancerogeniškų medžiagų traukos srityje. Iki šios iniciatyvos vienkomponenčių kūrų srityje ilgą laiką dominavo hidrazinas, tačiau kadangi jis yra toksiškas ir kancerogeniškas, jo vietą sparčiai užima kitos „žaliosios“ alternatyvos. T.y. medžiagos, kurios sukelia žymiai mažesni neigiamą poveikį žmogaus sveikatai ir aplinkai [20] [24] [29].

### 2.1. Vandenilio peroksidas (HTP)

Istoriškai tai vienas iš pirmųjų vienkomponenčių kūrų, panaudotas traukos srityje. Vokiečių naudotas reaktyviniams lėktuvams „Me 163“, torpedoms ir kt. Šis kuras taip pat naudojamas ne tik tiesioginei reaktyvinei jėgai išgauti, bet ir turbinos mentėms varyti – kontaktuojant su katalizatoriumi peroksidas skyla į deguonį ir vandens garus, kurie dėl aukštos temperatūros turi daug kinetinės energijos ir suka turbinas [9] [15]. Šis principas buvo naudojamas torpedose, taip pat pompoms varyti. Pvz. žymiojoje V2 raketoje, peroksidas taip pat buvo naudojamas kaip kuras sukurti pompai, kuri perdavė raketos kurą (etanolį ir deguonį) į degimo kamerą [1] [4] [13] [35].

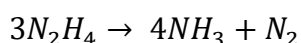
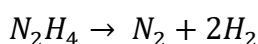


Pagrindinės charakteristikos:

- Apytikslis specifinis impulsas – 160 s. Apie 20% mažesnis nei hidrazino (priklausomai nuo katalizatoriaus).
- Stabilesnis kylant koncentracijai, dėl to traukos srityje naudojamas >80 %
- Virimo taškas : 114 °C ; lydymosi taškas : – 2 °C (grynos medžiagos).
- Priskiriamas „žaliesiems“ vienkomponenčiams kurams, kadangi nėra kancerogeniškas, palyginus stabilesnis, mažiau pavojingas įrenginių komponentams (korozija) [6].

### 2.2. Hidrazinas N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>

Taip pat, istoriškai seniai naudojamas kuras. Antrojo pasaulinio karo metais naudotas panašiais tikslais kaip vandenilio peroksidas. Plačiai naudojamas dar ir dabar kaip mažų palydovų pagrindinis variklių kuras. Taip pat, naudojamas ir įvairių nusileidimo ant kietųjų kūnų įrenginių (angl. *landers*) varikliuose, pvz. : „Viking“, „Phoenix“, „Curiosity“. Europos kosmos agentūros „ESA“ iniciatyva (projektas „RHEFORM“) , hidrazinas sparčiai keičiamas „žaliomis“ alternatyviomis, kurios būtų mažiau kenksmingos aplinkai ir žmonėms. Skilimo reakciją taip pat sužadina katalizatorius [11].



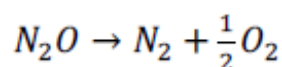
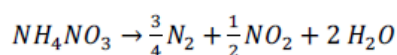
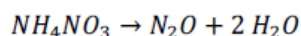
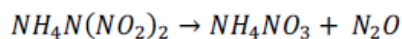
Pagrindinės charakteristikos:

- Apytikslis specifinis impulsas – 220 s.
- Virimo taškas : 150 °C; lydimosi taškas : 0,43 °C.
- Priskiriamas labai pavojingoms medžiagoms – kancerogeniškas, nestabilus, kenksmingas įrenginio elementams [11].

### 2.3. ADN (Amonio dinitro amidas) $H_4N_4O_4$

1971 buvo atrastas Sovietų Sąjungoje. Likusiam pasauliui tapo žinomas tik 1989, kai buvo susintetintas „SRI International“ JAV. Patentai gauti 1990-tais. Tuo metu, buvusios sovietų sąjungos mokslininkai atskleidė, jog šį kurą naudojo beveik 20 metų anksčiau.

Šiuo metu tai vienas iš perspektyviausių „žaliųjų“ vienkomponenčių kurų, kurie gali pakeisti hidraziną. Naudojamas ir lietuviškuose „Nanoavionics“ traukos varikliuose (4 pav.), „LITUANICASAT-2“ palydove.



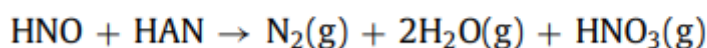
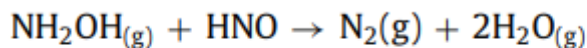
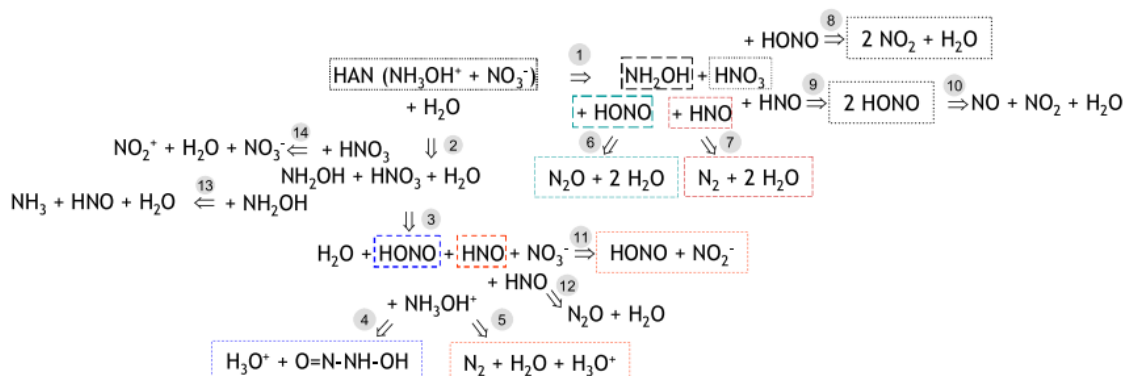
12 pav. ADN skilimo reakcija [23]

Pagrindinės charakteristikos:

- Apytikslis specifinis impulsas – 230 s. (apie 6% didesnis nei hidrazino)
- Virimo taškas (ir skilimo) – 127 °C ; lydimosi taškas – 93 °C (grynos medžiagos).
- Sprogus, nestabilus, pavojingas žmonėms. Tačiau žymiai mažiau nei hidrazinas [23].

### 2.4. HAN (hidroksilamonio nitratas) $H_4N_2O_4 \rightarrow NH_2OH \cdot HNO_3$

Dar vienas potencialus „žalias“ kandidatas pakeisti hidrazinui. Pirmą kartą panaudotas JAV, karinio laivyno reikmėms.



13 pav. HAN skilimo reakcijos [2]

HAN skilimo reakcija susideda iš daug tarpinių skilimo reakcijų ir yra sunkiai aprašoma, kadangi realiai kuras turi priemaišų ir yra tirpalo būsenoje. Tad jo elementai turi būti vertinami kaip atskiri jonai.

Pagrindinės charakteristikos:

- Apytikslis specifinis impulsas – 276 s. (apie 10% didesnis nei hidrazino).
- Virimo taškas (ir skilimo) : -(nerasta informacijos) °C ; lydimosi taškas : -35 °C (grynos medžiagos).
- Sprogus, nestabilus, pavojingas žmonėms. Tačiau žymiai mažiau nei hidrazinas [2].

## 2.5. Azoto oksidas N<sub>2</sub>O

„Žalias“ raketinis kuras. Gali būti naudojamas ir kaip „šaltų“ dujų kuras, raketinis kuras (oksidatorius), dvikomponentis kuras. Nekorozyvus, netoksiškas, palyginus stabilus. Skykla kaitinant aukštesnėje nei 520°C temp. Naudojamas mėgėjiškuose raketų projektuose, taip pat UoSAT-12 mikro-palydove. Tolimesnės savybės bus apžvelgtos naudojant kaip vienkomentį kurą [19].



Kaip ir visi kiti vienkomentiniai kurai, reakcijos greičiui padidinti ir skilimo temp. sumažinti, naudojami katalizatoriai:

Ir, Rh, Ru, Ni, Co, Cu, Zr.

Pagrindinės charakteristikos:

- Apytikslis specifinis impulsas – 206 s. (apie 16% mažesnis nei hidrazino)
- Virimo taškas : – 88 °C ; lydimosi taškas – 90 °C (grynos medžiagos).
- Stabilus, nereikalauja specialių apsaugos priemonių, netoksiškas, nekorozyvus [19].

## 2.6. Kiti galimi vienkomponenčiai kuro variantai

Šios cheminės medžiagos taip pat gali būti naudojamos kaip vienkomponentis kuras, tačiau dėl informacijos stokos nebus detaliai apžvelgtos [15] [33].

- Etilen oksidas  $C_2H_4O$
- Nitrometanas  $CH_3NO_2$



### 3. Katalitinio sluoksnio analizė ir eksperimentai

#### 3.1. Tiriamasis objektas

Dėl pirmame skyriuje pateiktų priežasčių, akivaizdu jog katalitinio sluoksnio matricos geometrija ir įkrovos konfigūracija turi didžiulę reikšmę viso raketinio variklio veikimo režimui. Atlikus literatūros analizę, rasta jog praktikoje įprastai taikomi du katalizatoriaus matricos įkrovos metodai :

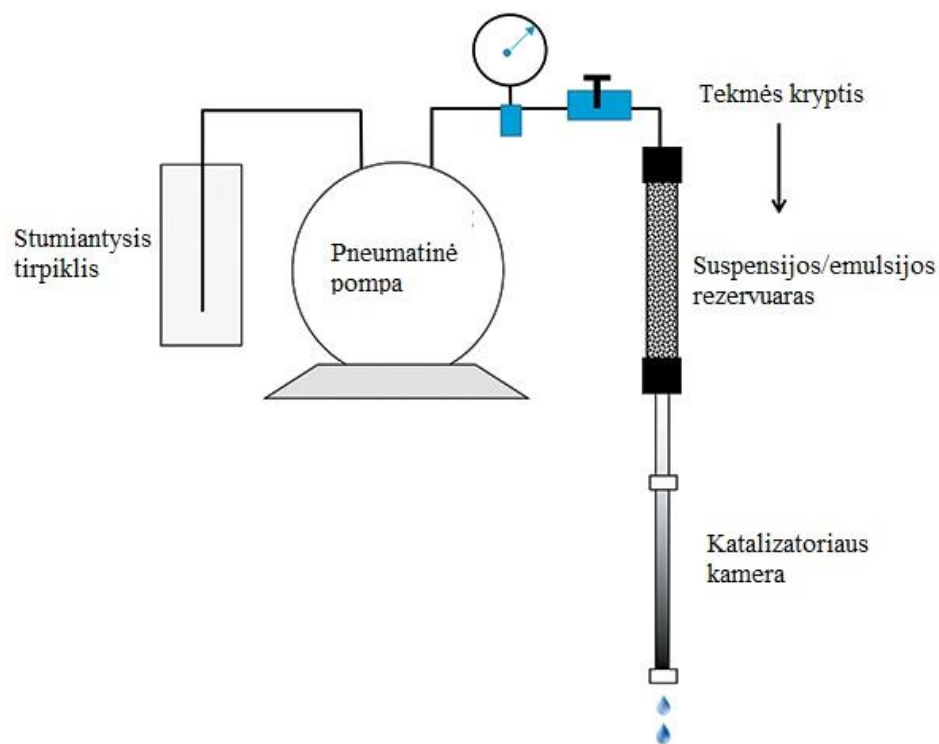
- palaidų, birių granulių užpylimas
- vientisos monolitinės struktūros sudarymas

Šiame skyriuje yra siūlomas trečiasis, katalitinės matricos įkrovos metodas – birių granulių ar sferų supylimas į katalizatoriaus kamerą naudojant aukštą slėgį, sudaromą hidrauliniu būdu. Toks metodas yra naudojamas chromatografinių kolonėlių gamyboje, tad nuspręsta įvertinti jo tinkamumą ir vienkomponenčio kuro variklio veikime.



14 pav. Suspaustu oru varoma "Haskel" pompa

Naudojant tokį būdą yra siekiama jog katalizatoriaus įkrova sudarytų tankų, nepaslankų, didelio paviršiaus ploto sluoksnį. Norint atlikti tokio tipo užpildymą, pirmiausia reikia paruošti norimą įkrauti medžiagą – t.y. katalizatoriaus matricos daleles. Tam tikslui, paranku sudaryti tirpalo suspensiją arba emulsiją. Tokiu būdu katalizatoriaus matricos kietosios dalelės yra suspenduojamos skystoje terpėje, ir visas mišinys gali būti dozuojamas, iš viršaus slegiančiuoju skysčiu, kaip pavaizduota 15 pav. schemoje, naudojant pompą (14 pav.). Šiam tikslui, pirmiausia reikia paruošti ir išbandyti skirtingų konfigūracijų suspensijas/emulsijas, kurios labiausiai suspenduotų katalizatoriaus daleles. Sėkmingai sudarius suspensiją/emulsiją, atliekamas kameros užpildymas katalizatoriaus matrica. Turint aukštame slėgyje užpildytą katalizatoriaus kamerą, ją galima ištestuoti ir palyginti su tokios pat geometrijos ir tokiomis pat dalelėmis užpildyta katalizatoriaus kamera, kuri buvo užpildyta nenaudojant aukšto slėgio.



**15 pav.** Katalitinės kameros užpildymas aukštame slėgyje

Katalitinės kameros našumą apibūdinantys parametrai parinkti šie :

- Tokio pačio tūrio kameroje esančio katalizatoriaus matricos dalelių masė (g)
- Katalitinės kameros atgalinis slėgis (pasipriešinimas) (bar)

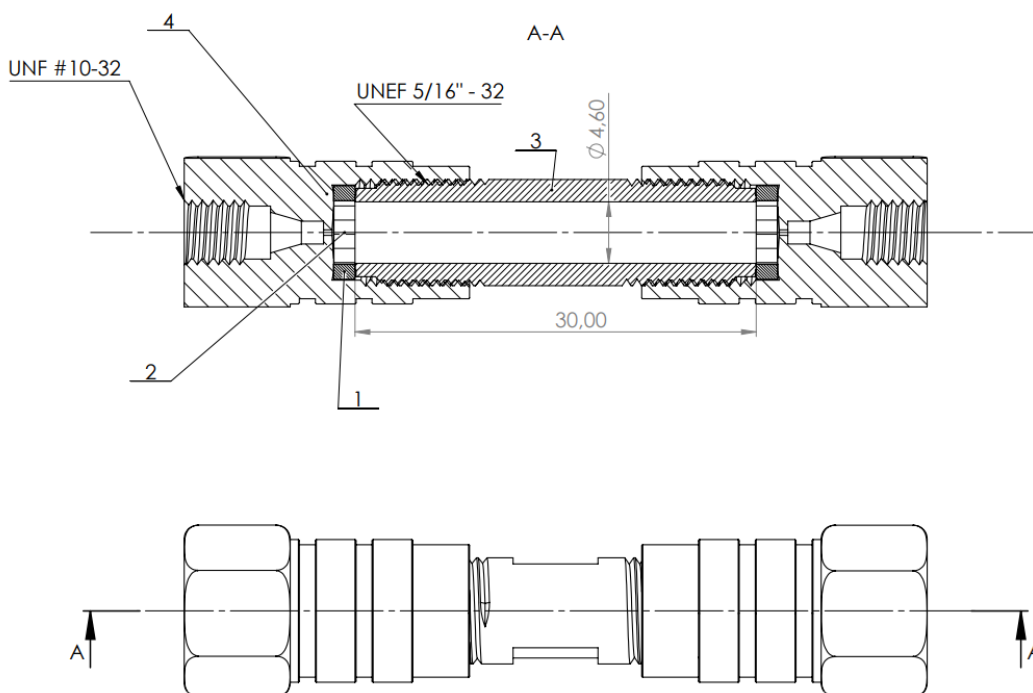
Kadangi darbe naudojama tik katalizatoriaus matrica, o ne aktyvios medžiagos, nebuvo galimybės realiai išbandyti variklio veikimo ir išmatuoti jo generuojamą traukos jėgą. Remiantis literatūroje pateiktas pavyzdžiais, bei turimos įrangos galimybėmis, buvo parinktos tolimesnės katalitinių kamerų konfigūracijos, pateikiamos 1 lentelėje:

**1 lentelė.** Eksperimentų apžvalga

Eksperimento numeris	1	2	3	4	Literatūros pvz. 1
Kameros ilgis, mm	30	30	30	30	60
Kameros vidinis skersmuo, mm	4,6	4,6	4,6	4,6	15
L/ID	6,52	6,52	6,52	6,52	4,00
Katalizatoriaus dalelių sferų skersmuo, mm (aritmetinis vidurkis)	0,9	0,125	0,125	0,9	2,5
ID/Dp	5,1	36,8	36,8	5,11	6,00
Apskaičiuotas kameros tūris, cm <sup>3</sup>	0,498	0,498	0,498	0,498	10,598
Dalelių tankis, g/cm <sup>3</sup>	0,645	0,8	0,8	0,645	-
Apskaičiuota teorinė reikalinga dalelių masė, g	0,322	0,399	0,399	0,322	-
Užpildymo slėgis manometrinis, bar	207	207	0	0	0

### 3.2. Kamrų mechaninės savybės ir geometrija

Eksperimentinės kameros buvo sudarytos iš 316 nerūdijančio plieno srieginių vamzdelių, tankesnių nei katalizatoriaus dalelių filtrų abiejuose galuose, bei sandarinimo veržlių. Filto korpusas yra padarytas iš vientiso titano, o viduryje yra perforuota sritis. Porų dydis yra iki 20 mikronų. Realus eksperimentinės kameros vaizdas, be veržlės, pateiktas 17 pav. Brėžinys su išmatavimais, pateikiamas 16 pav.



**16 pav.** Principinis kameros brėžinys. 1,2 – filtrai; 3 – kameros vamzdelis, 4 – sandarinamoji veržlė.



**17 Pav.** Eksperimentinės kameros vaizdas, be viršutinės veržlės.

### **3.3. Suspensijos ar emulsijos sudarymas katalizatoriaus dalelėms**

Eksperimentams atlikti buvo įsigyta dviejų tipų katalizatoriaus matricos sudarymui reikalingų aliuminio oksido dalelių iš „alfa aesar“:

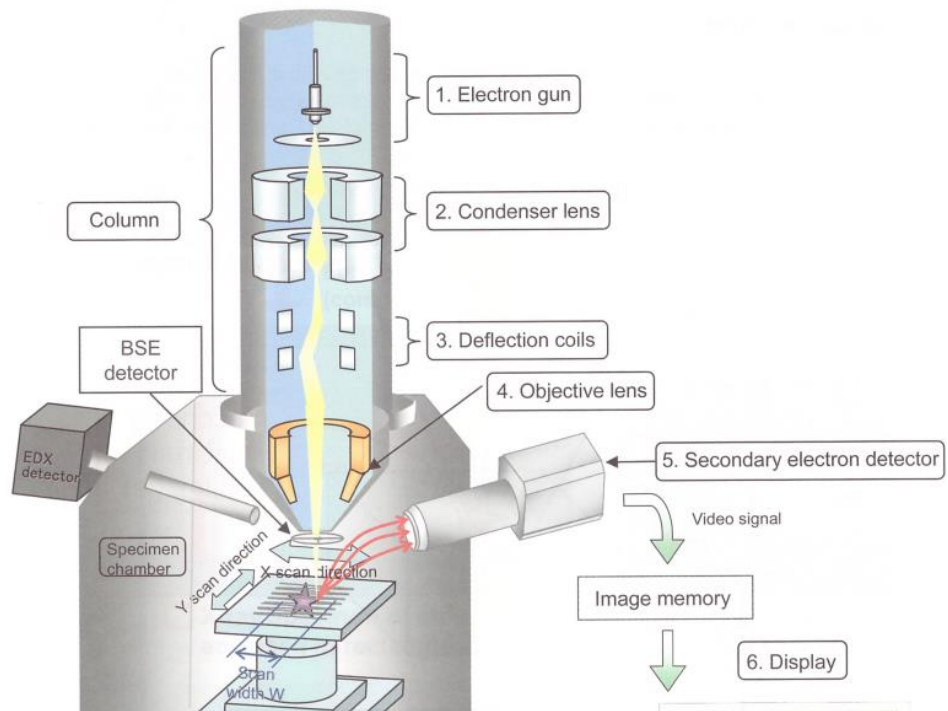
1. 45901 Aluminum oxide, super activated, neutral, Grade I . 50 – 200  $\mu\text{m}$ . 200  $\text{m}^2/\text{g}$  . Tankis: 0,8-0,92  $\text{g}/\text{cm}^3$
2. 46105 Aluminum oxide, for Process Cleanup (Scavenger) . 600 – 1200  $\mu\text{m}$ . Paviršiaus plotas : 293  $\text{m}^2/\text{g}$  . Tankis: 0,646  $\text{g}/\text{cm}^3$



**18 pav.** Katalizatoriaus matricos dalelės. Kairėje: 50 – 200 mikronų, dešinėje : 600 – 1200 mikronų

#### **3.3.1. Analizė elektroniniu mikroskopu**

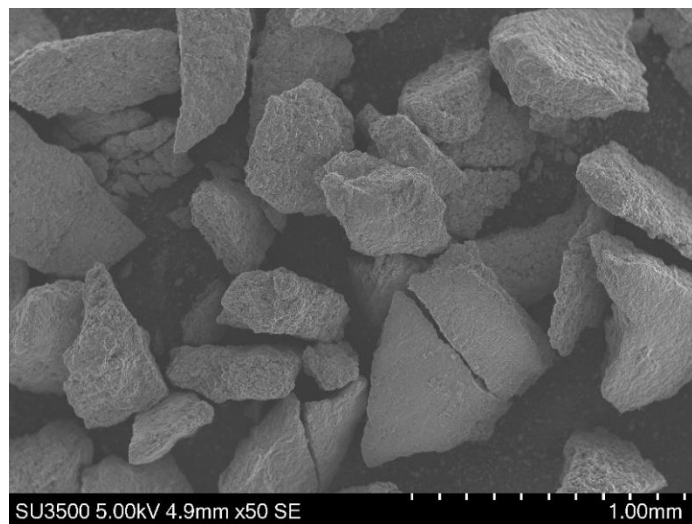
Detalesnė katalizatoriaus matricos dalelių analizė buvo atliekama naudojantis elektroniniu mikroskopu (angl. *SEM – scanning electron microscope*). Tokio tipo mikroskopas naudoja elektronų srautą vietoje šviesos. Šių elektronų generavimui yra naudojami tam skirti elektronų šaltiniai, dažnai vadinami „*elektronų patrankomis*“. Jų veikimo principas yra pagrįstas volframo pakaitinimu iki itin aukštos temperatūros (min. 2200  $^{\circ}\text{C}$ ), naudojant elektros srovę. Išspinduliuoti elektronai, sąveikauja su tiriamojo objekto atomais, kurie išspinduliuoja antrinius elektronus. Šie elektronai yra detektuojami ir sukuriama tiriamojo objekto topografijos vaizdas. Elektroniniu mikroskopu galima pasiekti didinimo gebą iki 3000000 kartų. Didinimo geba gali būti keičiama reguliuojant išspinduliuojamų elektronų srautą, fokusą. Dažniausiai analizė yra atliekama vakuume, jog nebūtų elektronų sąveikos su oro dalelėmis. Vakuumas sukuriamas vakuumine pompa, tad tiriamojo ruošinio ertmė turi būti itin sandari. Ruošiant pavyzdžius analizei elektroniniu mikroskopu, reikia griežtai laikytis švaros taisyklių ir tinkamai sufokusuoti tiriamąjį plotą [7] [40].



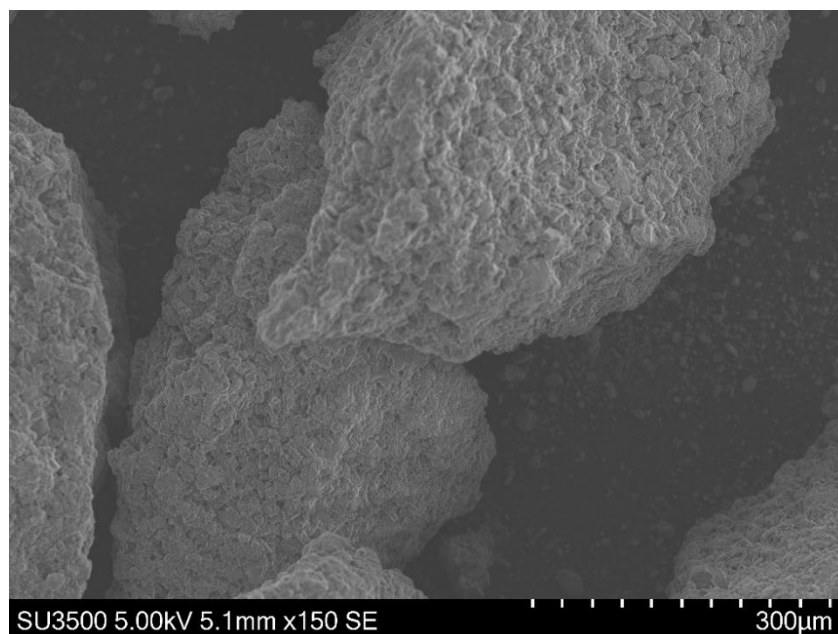
**19 pav.** Elektroninio mikroskopo veikimo principo schema [7]

### 3.3.2. Pirminių pavyzdžių analizės elektroniniu mikroskopu rezultatai

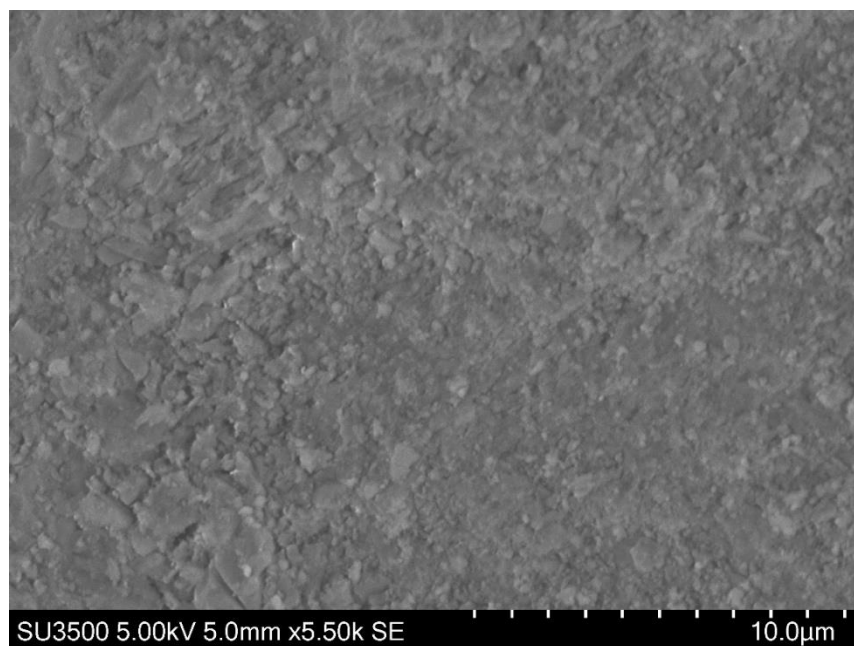
Šiame darbe mėginių analizė buvo atliekama naudojantis „Hitachi“ vakuuminio elektroniniu mikroskopu. Elektroniniu mikroskopu užfiksuoti vaizdai pateikiami 20 – 25 pav.



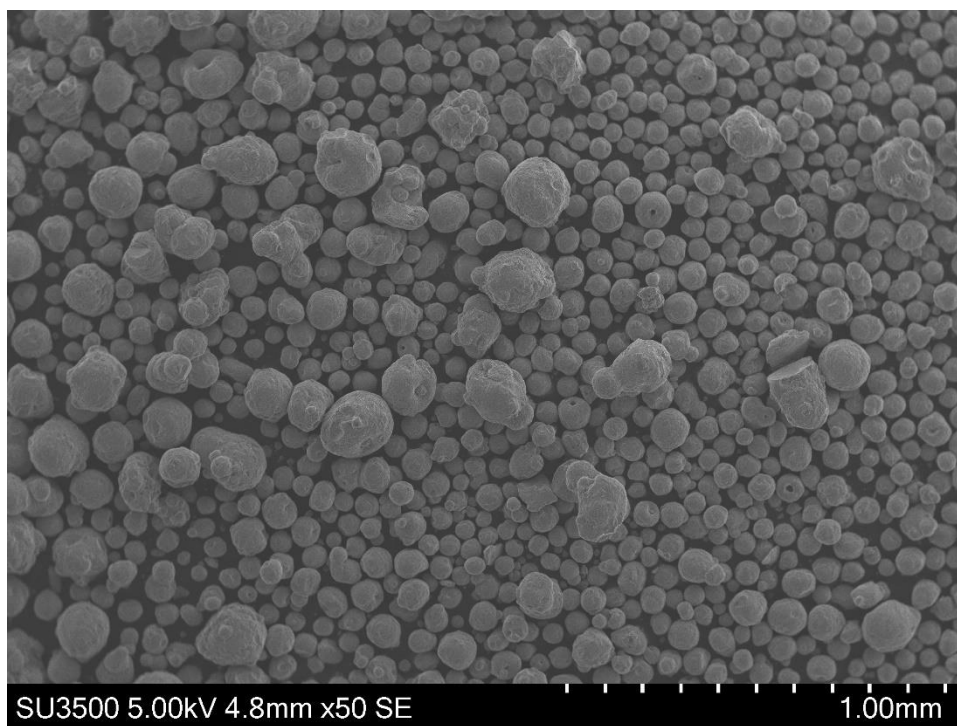
**20 pav.** Katalizatoriaus matricos dalelės 600 – 1200 mikronų SEM mikroskopu, x50 didinimas



**21 pav.** Katalizatoriaus matricos dalelės 600 – 1200 mikronų SEM mikroskopu, x150 didinimas



**22 pav.** Katalizatoriaus matricos dalelės 600 – 1200 mikronų SEM mikroskopu, x5500 didinimas

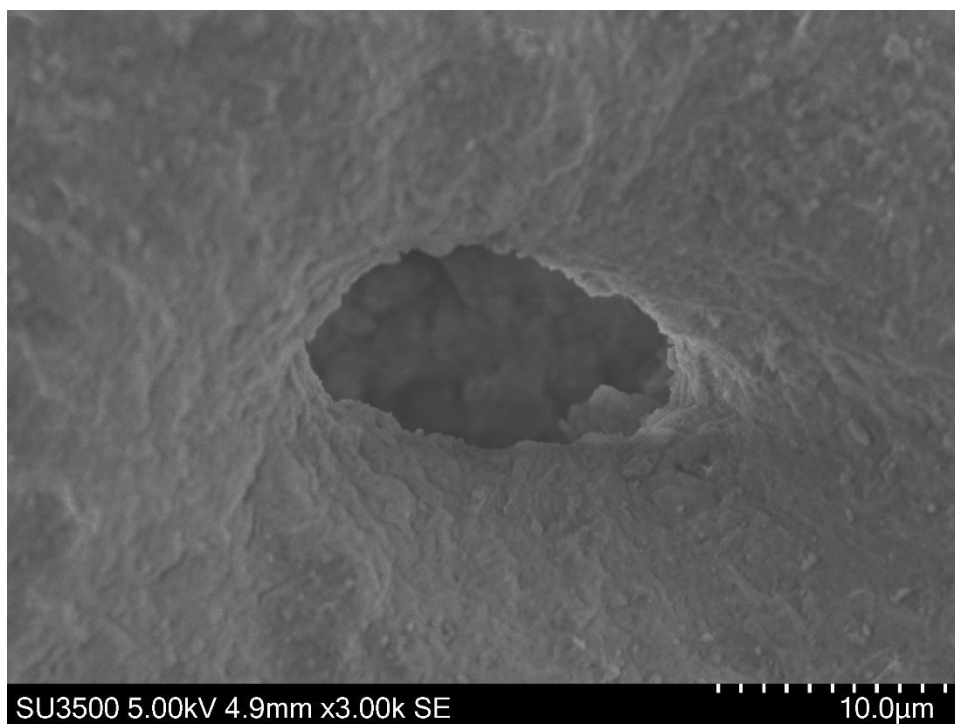


**23 pav.** Katalizatoriaus matricos dalelės 50 – 200 mikronų SEM mikroskopu, x50 didinimas



**24 pav.** Katalizatoriaus matricos dalelės 500 – 200 mikronų SEM mikroskopu, x200 didinimas





**25 pav.** Katalizatoriaus matricos dalelės 50 – 200 mikronų SEM mikroskopu, x3000 didinimas

Vizualiai matoma jog katalizatoriaus dalelės nėra taisyklingų sferų formos (20, 23 pav.). Ypatingai didesnės, 600 – 1200 mikronų. Mikroskopu taip pat, gana gerai pavyko pamatyti jog dalelės turi nemažai porų, ertmių (25 pav.). Katalizatoriaus matricai tai yra pageidautinas reiškinys, kadangi didina kuro ir katalizatoriaus sąveikos paviršiaus plotą. Pastebėta jog dalelės turi gana nemažą dydžio pasiskirstymą, yra randama nenaudingos smulkmės.

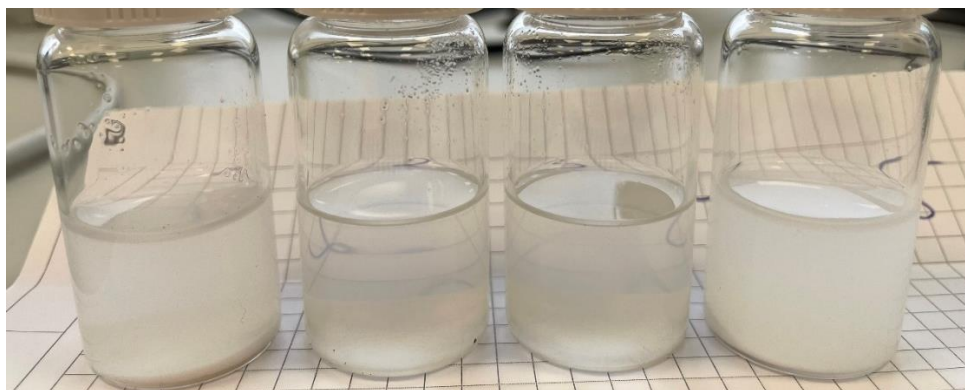
### **3.4. Suspenzijos ir emulsijos ruošimas, kamerų užpildymui**

Siekiant nustatyti geriausias sąlygas suspensijai arba emulsijai paruošti, buvo atliekami eksperimentai su laboratorijoje turimais tirpikliais. Tirpikliai kandidatai buvo parenkami pagal praktinę patirtį, tirpiklių tankius, cheminį inertiškumą. Kiekvienu atveju suspensija/emulsija buvo tikrinama naudojant 10 – 11 ml tirpiklio, bei 0,5 g katalizatoriaus dalelių. Prieš įvertinant suspensijos/emulsijos sedimentaciją ir dispergavimą, buvo atliekamas mišinio maišymas „Vortex“ purtykle, bei homogenizavimas ultragarso vonelėje. Svarbu pabrėžti jog eksperimentai buvo atliekami su grynu aliuminio oksidu – t.y. neaktyvuota katalizatoriaus įkrova. Priklausomai nuo to koks kuras būtų naudojamas galutiniame variklyje, aliuminio oksido dalelės turėtų prisijungti aktyviausias katalizines medžiagas: rutenį/iridį/kalio jodidą ar kt. Katalizatoriaus aktyvavimas galimas prieš atliekant jo įkrovą į kamerą arba po to. Literatūroje randama abiejų scenarijų pavyzdžių. Aktyvuojant katalizatoriaus matricą prieš ją užpildant į kamerą, reikėtų išnagrinėti ar užpildymo slėgis neturės neigiamos įtakos aktyvaus katalizatoriaus paviršiui. Šiame etape tikslas buvo paruošti kiek įmanoma stabilesnę suspensiją ar emulsiją, kurioje katalizatoriaus matricos dalelės išsilaikytų nesedimentuodamos kuo ilgesnį laiko tarpą. Per šį laiką, kol dalelės nesedimentuoja, turi būti atliekamas slėginis jų užpildymas į kamerą. Šiam tikslui, buvo suplanuoti 6 eksperimentai, su skirtingais tirpikliais, priedais ir tiriamomis katalizatoriaus matricomis. Šių eksperimentų, su neaktyvuotu katalizatoriumi, suvestinė pateikiama toliau 2 lentelėje:



**2 lentelė.** Tirpiklių parinkimas

Eksperimento numeris	1	1b	2	3	4	4a
Vidutinis dalelių skersmuo $D_p$ , mm	0,125	0,125	0,125	0,125	0,9	0,9
Naudotų dalelių masė $m_{km}$ , g	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Tirpiklio tūris $V_t$ , ml	10	10,5	10	10	10	11
Tirpiklis	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O;SDS;ETOH	10% MeOH/90% CHCl <sub>3</sub>	54% CHCl <sub>3</sub> /6% MeOH/40% IPA	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O;SDS;ETOH
Rezultatas	Suspensija susidaro, bet dalelės greitai pradeda sėsti, nustojus judinti buteliuką.	Susidaro emulsija. SDS oro burbulai neblogai suspenduoja daleles.	Suspensija susidaro, dalelės sėda lėčiau nei H <sub>2</sub> O tirpale.	Suspensija susidaro, dalelės sėda lėčiau nei H <sub>2</sub> O tirpale.	Suspensija susidaro, bet dalelės greitai pradeda sėsti, nustojus judinti buteliuką.	Susidaro emulsija. SDS oro burbulai neblogai suspenduoja daleles.

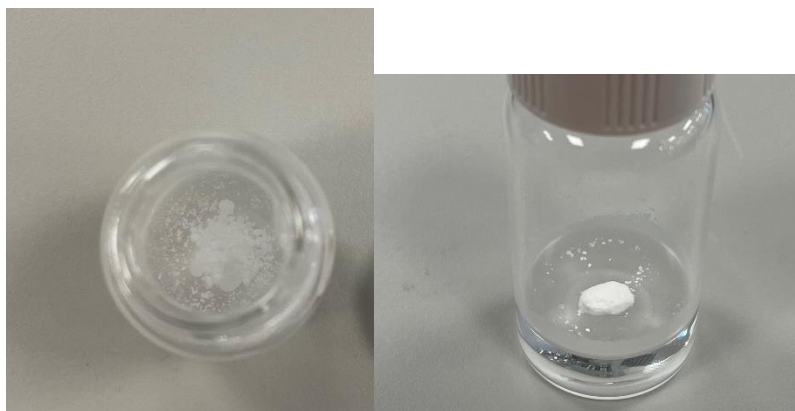


**26 pav.** Eksperimentų: 1,2,3,4 rezultatai



**27 pav.** Eksperimentų 4a(kairėje) ir 1a rezultatai

Eksperimentuose (1 - 4) matoma jog dalelių ir tirpalo sąveika yra gana gera (26 pav.). Nestebimas hidrofobiškumas ar priešingo poliškumo sąveika (28 pav.) – dalelės tolygiai pasiskirsto tirpiklyje. Pagrindinė problema, jog stambesnės dalelės gana greitai sedimentuoja. Siekiant to išvengti, buvo išbandyti tirpalai su pridėtu SDS ( 27 pav.), ir tai davė teigiamų rezultatų. Remiantis vizualiniais eksperimentų duomenimis nuspręsta jog tinkamiausi tirpikliai suspensijos/emulsijos sudarymui yra H<sub>2</sub>O arba H<sub>2</sub>O+SDS. Tokiuose tirpikliuose suspenduotos dalelės, ilgiausią laiko tarpą išbūna nesedimentuodamos. Tolimesniuose eksperimentuose bus naudojami tik šie tirpikliai.



**28 pav.** Priešingo poliškumo dalelių ir tirpalo sąveikos pavyzdys (nepageidaujamas). Maišymasis nevyksta

Sėkmingai suspendavus daleles tirpale, buvo atliekamas jų užpildymas į kamerą, naudojant „Haskel“ pneumatinę pompą (14 pav.), palaikant 207 bar, 15 min. Po to, ant kamerų uždedami filtrai ir jos užveržiamos veržlėmis.

### 3.5. Eksperimentinių katalitinių kamerų analizė

Siekiant patikrinti eksperimentiškai užpildytų katalitinių kamerų savybes, buvo atliekami slėgio testai, bei užpildo svėrimas. Rezultatai lyginami su standartiškai užpildytais kameromis – rankinio bėrimo metodu. Slėgio testai buvo atliekami naudojant stūmoklinę skysčio pompą, parinktas tirpiklis – etanolis. Etanolio klampumas yra artimas aukštos koncentracijos vandenilio peroksidui – kurui, kurį nuspręsta naudoti kito skyriaus koncepciniam traukos sistemos projektavimui. Pagrindinės medžiagų savybės palyginamos 3 lentelėje:

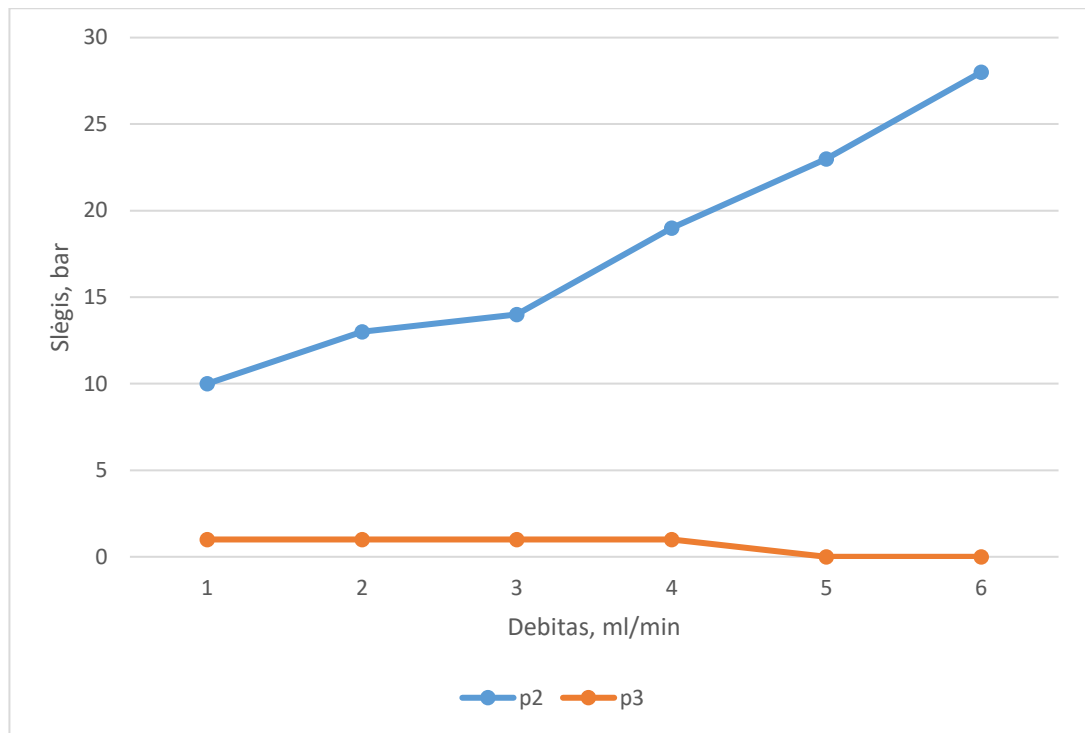
**3 lentelė.** Etanolio ir vandenilio peroksidų charakteristikų palyginimas [41]

Medžiaga	Etanolis	Vandenilio peroksidas
Dinaminė klampa, esant 20 °C, cP	1,2	1,245
Tankis, esant 20 C °C, g/cm <sup>3</sup>	0,78945	1,11
Molekulinė masė, g/mol	46,07	34

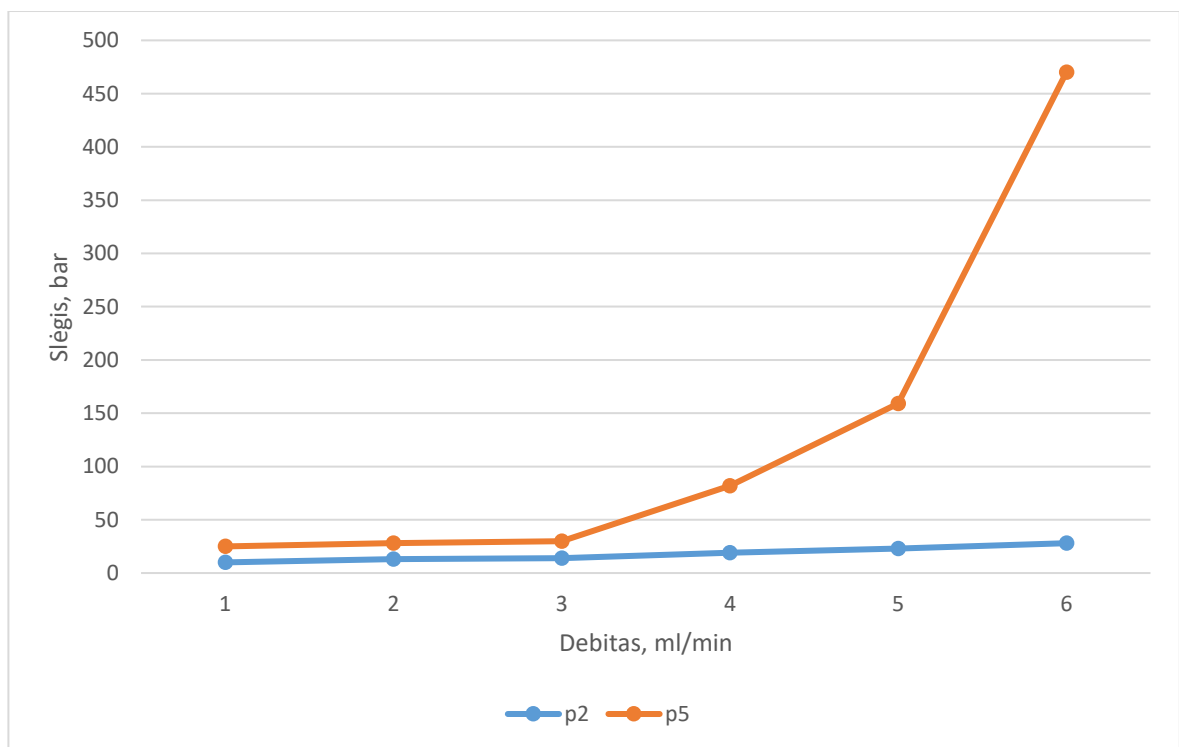
Atgalinio slėgio matavimas remiasi hipoteze, jog tankiau supakuotos ir suspaustos dalelės, sudarys didesnę hidraulinį pasipriešinimą per jį tekančiam skysčio ar dujų srautui. Dėl šios priežasties atgalinis slėgis pasirinktas kaip vienas pagrindinių kamerų vertinimo kriterijų. Didesnis atgalinis slėgis savaime nėra pageidaujamas, tačiau tai indikuoja tankesnę, patvaresnę bei našesnę katalizatoriaus matricą [7] [10]. Slėgio matavimų rezultatai pateikiami 4 lentelėje, o grafikai 29 – 32 pav.

**4 lentelė.** Slėgio testų suvestinė. Žr. lentelę nr.5 dėl eksperimentų informacijos.

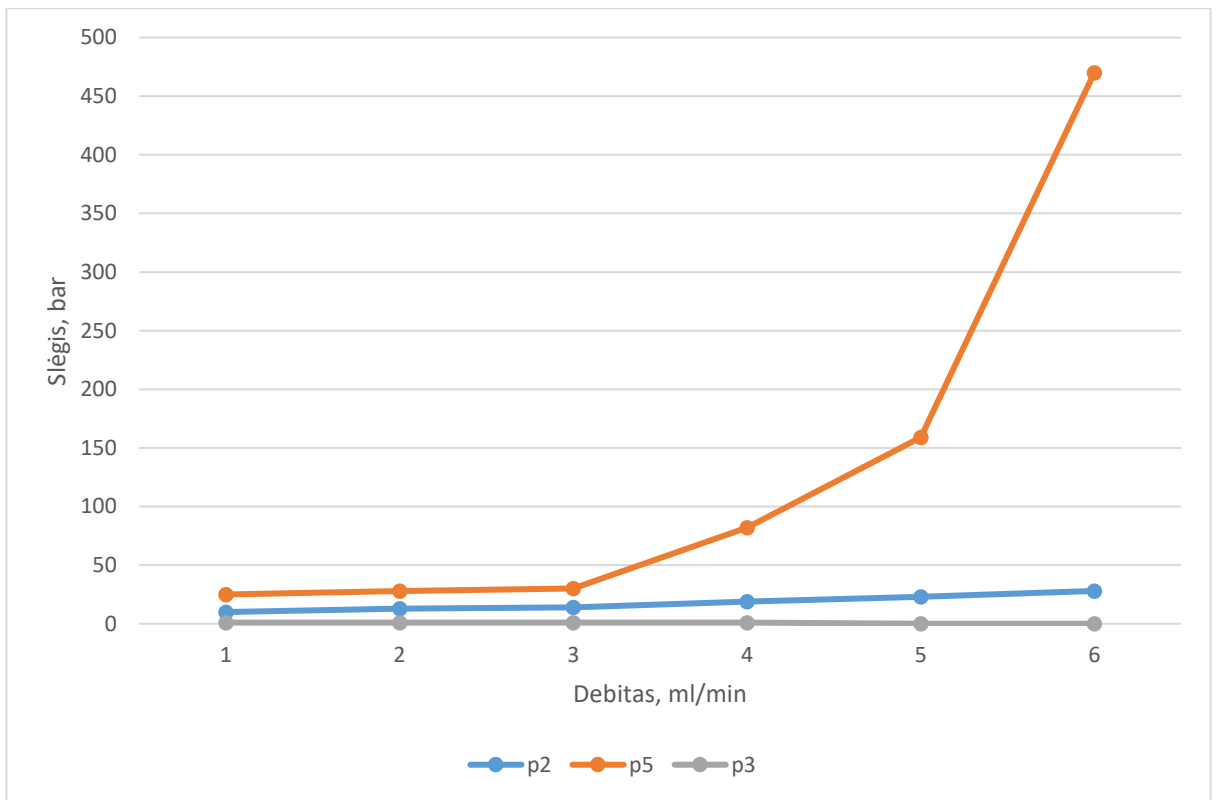
Debitas D, ml/min.		0,5	0,6	0,7	1,5	2	3	
Sistemos slėgis Ps, bar		13	14	16	34	45	70	
Slėgio eksperimento numeris	1	Bendras slėgis Pt, bar	14	15	17	36	49	76
		Kameros slėgis, Pk	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>
	2	Bendras slėgis Pt, bar	23	27	30	53	68	98
		Kameros slėgis, Pk	<b>10</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>19</b>	<b>23</b>	<b>28</b>
	3	Bendras slėgis Pt, bar	14	15	17	35	45	70
		Kameros slėgis, Pk	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	4	Bendras slėgis Pt, bar	13	15	17	35	47	72
		Kameros slėgis, Pk	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
	5	Bendras slėgis Pt, bar	38	42	46	116	204	540
		Kameros slėgis, Pk	<b>25</b>	<b>28</b>	<b>30</b>	<b>82</b>	<b>159</b>	<b>470</b>



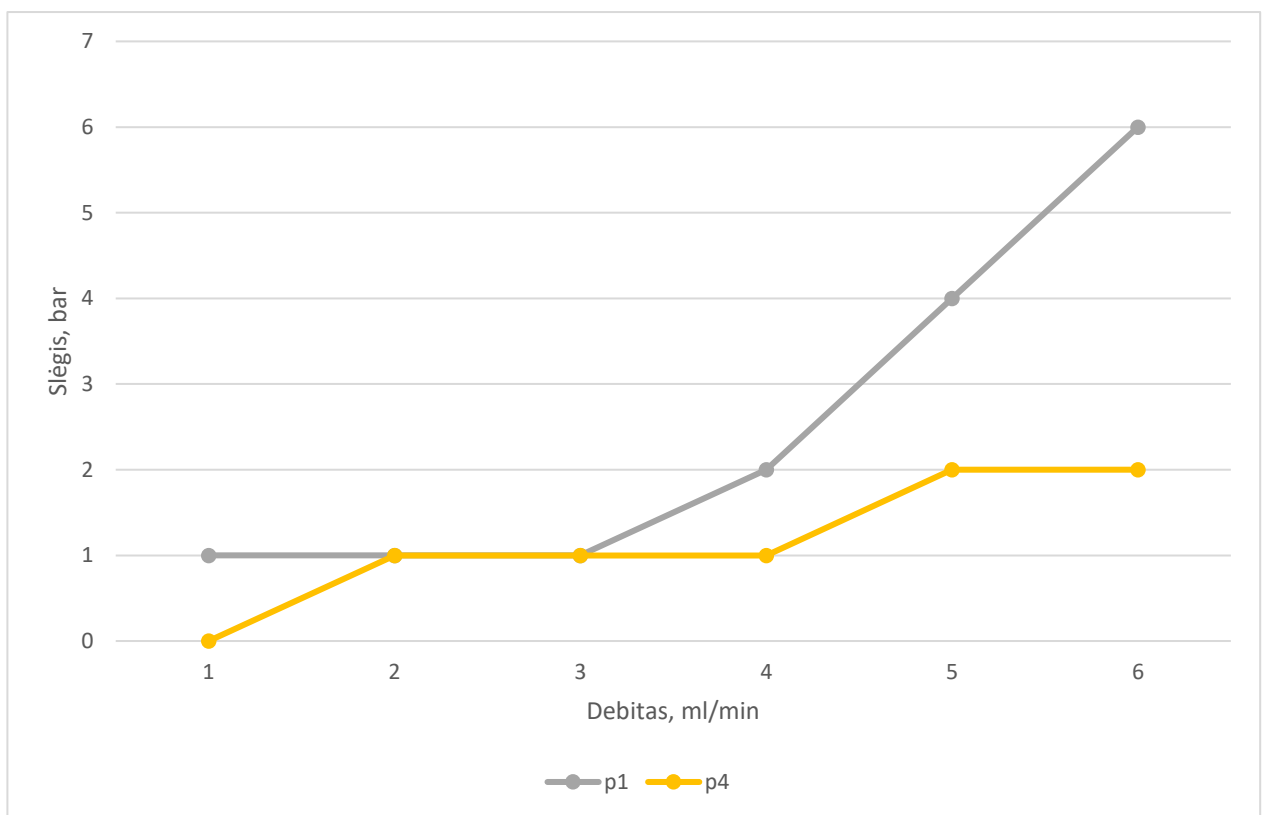
**29 pav.** p2 (užpildyta naudojant aukštą slėgį, vidutinis dalelių dydis – 0,125 mm) ir p3 (užpildyta bėrimo metodu, vidutinis dalelių dydis – 0,125 mm) slėgio kreivių palyginimas



**30 pav.** p5 (užpildyta naudojant aukštą slėgį, vidutinis dalelių dydis – 0,125 mm) ir p2 (užpildyta naudojant aukštą slėgį, vidutinis dalelių dydis – 0,125 mm) slėgio kreivių palyginimas



**31 pav.** p5 bei p2 kartu palyginimas su (užpildyta naudojant aukštą slėgį, vidutinis dalelių dydis – 0,125 mm) p3 (užpildyta bėrimo metodu, vidutinis dalelių dydis – 0,125 mm) slėgio kreivių palyginimas

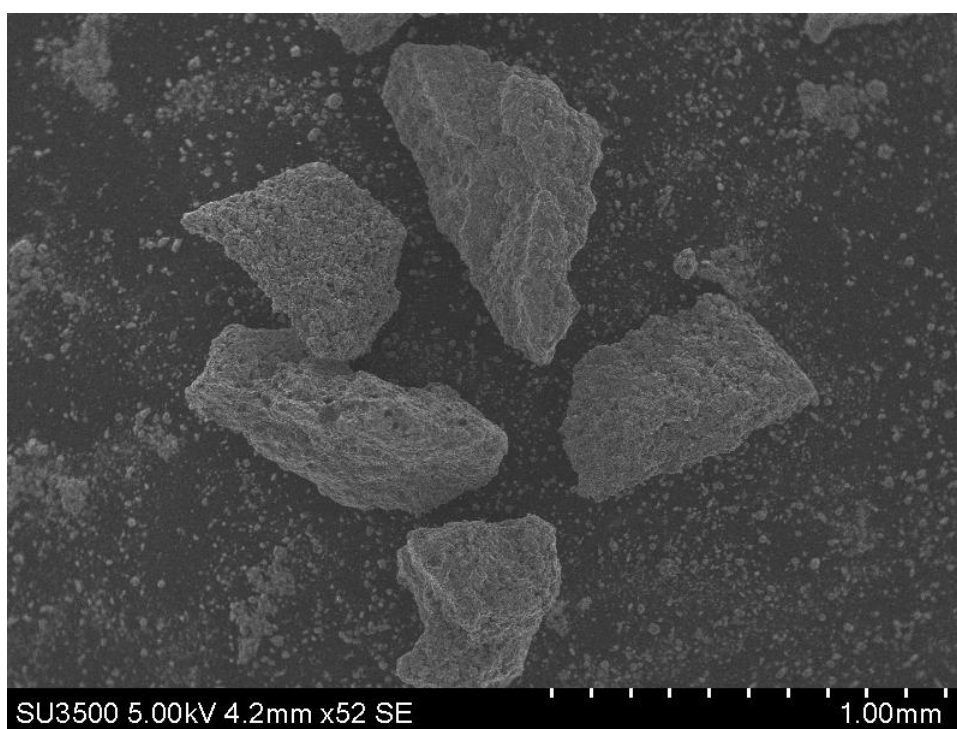


**32 pav.** p1 (užpildyta naudojant aukštą slėgį, vidutinis dalelių dydis – 0,9 mm) ir p4 (užpildyta bėrimo metodu, vidutinis dalelių dydis – 0,9 mm) slėgio kreivių palyginimas

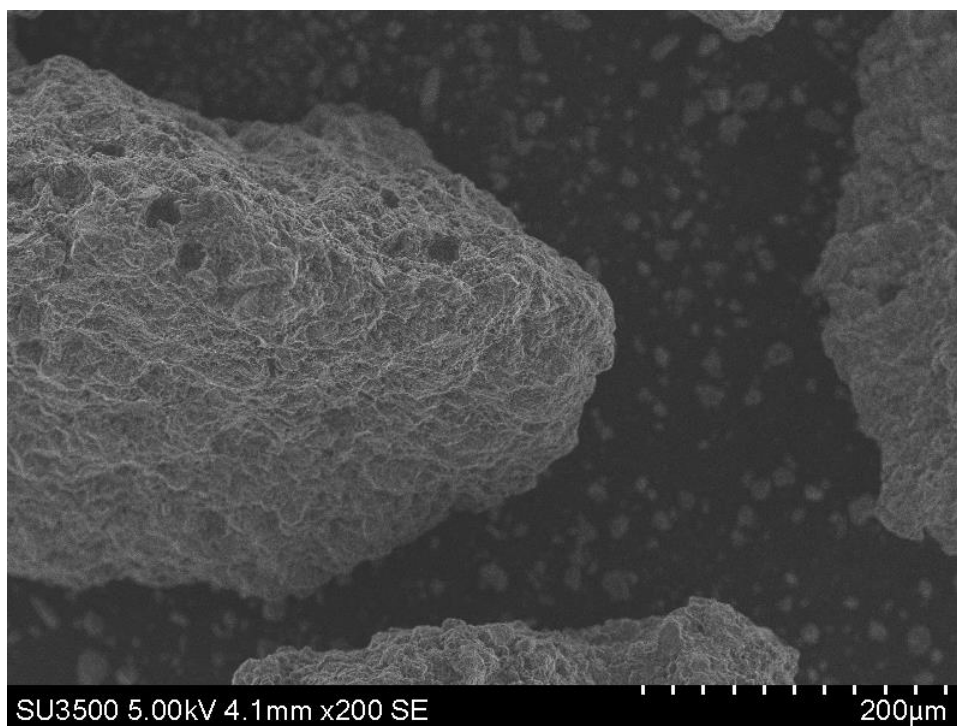
Vertinant slėgio matavimo rezultatus, išskiriami keli pastebėjimai:

1. 5 eksperimento atveju (30 – 31 pav.) greičiausia stebimas filtro užsikimšimas, dėl labai didelio pasipriešinimo padidėjimo. Esant 3 ml/min. debitui, slėgis pakyla iki 470 bar. Dėl to, buvo pakartotas tos pačios konfigūracijos eksperimentas su eksperimentu nr. 2, tik be SDS tirpale.
2. Kameros, kurios buvo užpildytos katalizatoriaus matrica aukštame slėgyje, kurių vidutinis dalelių dydis – 0,125 mm, turi 28 kartus didesnį atgalinį slėgį, lyginant su tokiomis pat kameromis, užpildytomis biriu metodu.
3. Kameros, kurios buvo užpildytos katalizatoriaus matrica aukštame slėgyje, kurių vidutinis dalelių dydis – 0,9 mm, turi 3 kartus didesnį atgalinį slėgį, lyginant su tokiomis pat kameromis, užpildytomis biriu metodu.

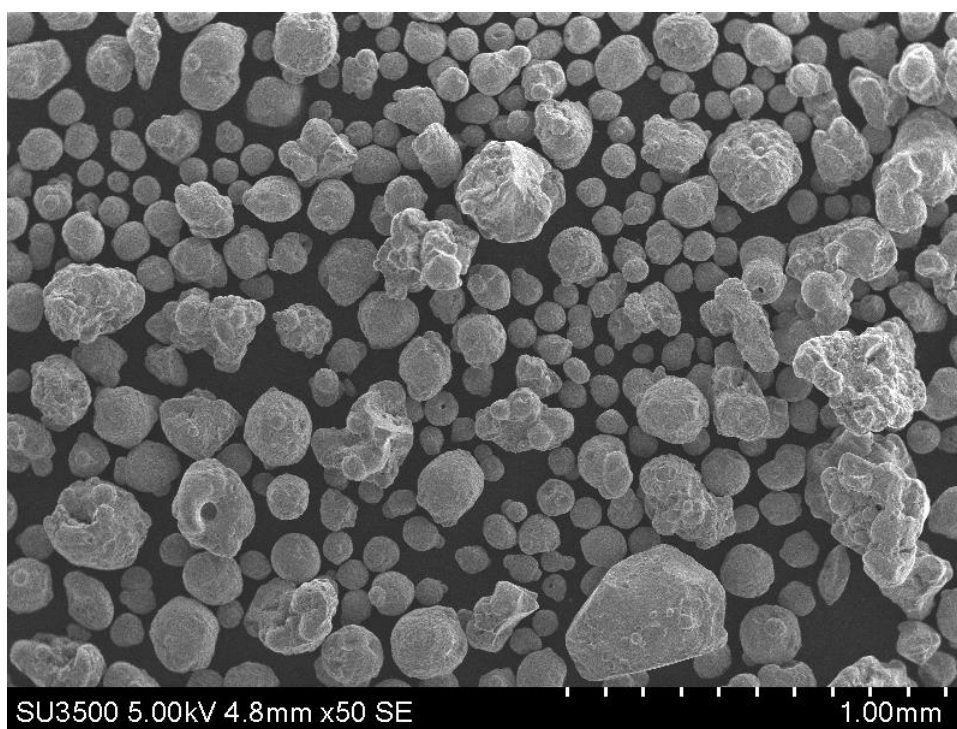
Atlikus kolonėlių užpildymus ir slėgio eksperimentus, kameroje naudotas katalizatorius buvo išstumtas naudojant etanolį. Išstumtas katalizatorius buvo išdžiovintas ir pakartotinai patikrintas SEM mikroskopu. Dalelių vaizdai pateikiami 33 – 36 pav.



**33 pav.** Katalizatoriaus dalelės 600 – 1200 mikronų SEM mikroskopu, x52 didinimas. Po užpildymo



**34 pav.** Katalizatoriaus dalelės 600 – 1200 mikronų SEM mikroskopu, x200 didinimas. Po užpildymo



**35 pav.** Katalizatoriaus dalelės 50 – 200 mikronų SEM mikroskopu, x50 didinimas. Po užpildymo



**36 pav.** Katalizatoriaus dalelės 50 – 200 mikronų SEM mikroskopu. x200 didinimas. Po užpildymo

Remiantis 33 – 36 pav. matoma, jog užpildymas aukštu slėgių bei testavimas iki 3 ml/min. debitu struktūrinės žalos katalizatoriaus matricos dalelėms nepadarė. Neužfiksuota mechaniškai ištrupėjusių dalelių, ar reikšmingai padidėjusios smulkmės kiekio.

Taip pat, buvo atliekami užpildo svėrimo rezultatai, kurie pateikiami 5 lentelėje:

**5 lentelė.** Užpildo svėrimo rezultatai

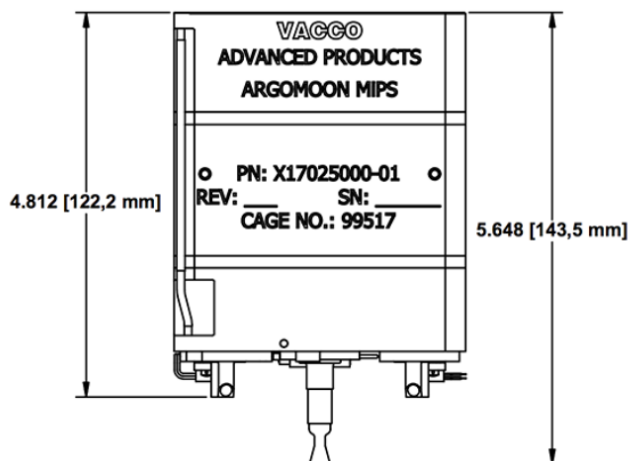
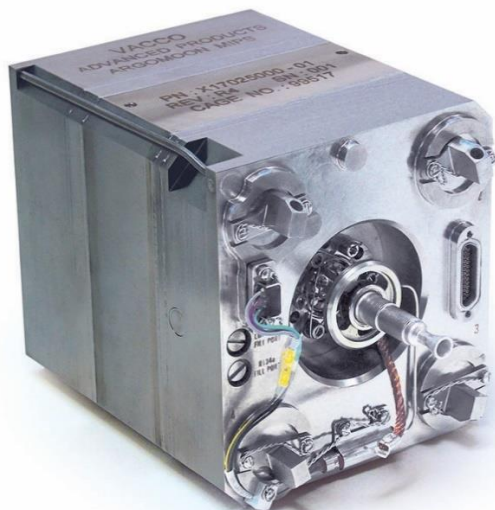
Ekspimento numeris	1	2	3	4	5
Naudotas tirpiklis suspensijai/emulsijai	H <sub>2</sub> O+SDS	H <sub>2</sub> O	Užpildyta be slėgio	Užpildyta be slėgio	H <sub>2</sub> O+SDS
Kameros ilgis, mm	30	30	30	30	30
Kameros vidinis skersmuo, mm	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
L/ID	6,52	6,52	6,52	6,52	6,52
Katalizatoriaus dalelių sferų skersmuo, mm	0,9	0,125	0,125	0,9	0,125
ID/Dp	5,1	36,8	36,8	5,11	36,8
Užpildymo slėgis manometrinis, bar	207	207	0	0	207
Apskaičiuotas tūris, cm <sup>3</sup>	0,499	0,499	0,499	0,499	0,499
0,125 mm katalizatoriaus tankis, g/cm <sup>3</sup>		0,860	0,860		0,860
0,125 mm katalizatoriaus apskaičiuota masė, g		0,429	0,429		0,429
0,9 mm katalizatoriaus tankis, g/cm <sup>3</sup>	0,646			0,646	
0,9mm katalizatoriaus apskaičiuota masė, g	0,322			0,322	
gauta masė po užpildymo, g	0,3025	0,3332	0,382	0,2161	0,2884



Užpildo svėrimas atliekamas siekiant patikrinti hipotezė, jog užpildžius kamerą dalelėmis, esant aukštam slėgiui, bus suspaudžiamas didesnis dalelių kiekis, dėl to bus stebima didesnė jų masė. Deja, tačiau svėrimo eksperimentai pasirodė esą netikslūs. Kadangi pakrovus kolonėlę, joje esančio katalizatoriaus kiekį tiksliai galima sužinoti, tik jį vėl išstūmus ir išdžiovinus, atsiranda katalizatoriaus sausumo faktorius. Pastebėta, jog katalizatoriaus dalelių svoris labai svyruoja nuo to, kiek laiko jos buvo džiovinamos, ar po to paliekamos standartinėje aplinkoje. Stebima, jog dalelės labai greitai sugeria drėgmę iš oro. Taip pat, sveriant dešimtosiomis ir šimtosiomis gramo tikslumu, atsiranda paklaidos dėl dalelių nuostolių išstūmimo metu, dalelių užstrigimo filtre ir kt. Atsižvelgus į šiuos faktorius ir gautus skaičius, svorio reikšmės išvadoms formuoti vertinamos nebus.

#### 4. Inžinerinės traukos sistemos projektavimas

Šiame darbe tirtos katalitinės kameros dydžio varikliai, būtų tinkamiausi nedidelės masės, mažos geometrijos kosminiams aparatams. Viena iš tokių sričių būtų mažieji nanopalydovai, dar vadinami „Cubesat“ arba mikropalydovai.



39 pav. „ArgoMoon” 1.3U traukos sistema mažiesiems palydovams [39]

Priimant literatūroje ir komerciniuose kataloguose randamą informaciją, toliau bus suformuluojami preliminarūs projektiniai kriterijai traukos sistemai, kuri naudotų darbe aprašytu metodu užpildytą katalizatoriaus kamerą ir vandenilio peroksidą kaip kurą. Katalizatoriaus veikloji medžiaga – kalio jodidas. Remiantis 2 skyriaus slėgio testų rezultatais, projektuojamai sistemai bus naudojama eksperimento nr.1 (užpildyta 600 – 1200 mikronų dalelėmis, naudojant H<sub>2</sub>O + SDS) slėgio tendencija. Ši konfigūracija parinkta, dėl sąlyginai nedidelio (2-3 k.) slėgio skirtumo nuo biriu metodu užpildytos kameros ir siekiant jog projektuotinai sistemai nereikėtų labai didelio slegiančiųjų dujų kiekio. Įvertinus tai, bus atliekami skaičiavimai, slegiančiųjų dujų ir kuro bako preliminarus projektavimas, bei principinis hidraulinės schemos sudarymas.

##### 4.1. Traukos jėgos ir specifinio impulso vertinimas

Kadangi šiame darbe buvo dirbama tik su katalizatoriaus matrica, t.y. neaktyvuota medžiaga, neįmanoma nustatyti realios variklio traukos ar specifinio impulso eksperimentiniu būdu. Be to, tai priklausytų ir nuo kitų sistemos dalių – purkštuvo, tūtos parametrų. Patikimai sumodeliuoti viduje vykstančią cheminę reakciją, antrines reakcijas, bei nustatyti išlekiančių dujų greitį ir kiekį, taip pat beveik neįmanoma. Literatūroje apžvelgti straipsniai, rėmėsi realiais eksperimentiniais traukos jėgos matavimais, ar išeinančių dujų temperatūros ir slėgio matavimais. Visgi, pagal rinkoje esančius produktus, su panašios geometrijos varikliais, galima prognozuoti jog esant apie 0,5 g/s masės debitui, trauka galėtų būti apie 1 N, misijos pradžioje (angl. ” *BOL* ” – *beginning of life* ).

##### 4.2. Kuro ir katalizatoriaus parinkimas

Šio darbo režiuose priimama, jog būtų naudojamas aukštos koncentracijos vandenilio peroksidas (>98%), kurio tankis 1,44 g/ml . Aktyvusis katalizatorius būtų kalio jodidas , kuriuo būtų padengta darbe aprašyta aliuminio oksido matrica. Kuras pasirinktas, pagal tai jog, atitinka projekto

„RHEFORM“ aplinkosaugos ir žmogaus saugos kriterijus, taip pat, jam tinka sąlyginai paprastas ir lengvai gaunamas aktyvusis katalizatorius – kalio jodidas. Taip pat, vandenilio peroksidas yra bendrinė medžiaga, kurios naudojimas varikliams nėra apsaugotas patentais. Taip pat, galima sąlyginai paprasta procedūra, jog išsigręnti komerciškai prieinamos koncentracijos vandenilio peroksidą iki reikalingų 98 %.

#### 4.3. Masės debitas

Apžvelgiant rinkoje esančias traukos sistemas, įvertinta jog prognozuotinas masės debitas, reikalingas išgauti apie 1 N trauką, būtų apie 0,5 g/s.

#### 4.4. Sistemos slėgis

$$\Delta p = \frac{8\mu L Q}{\pi R^4} = \frac{8\pi\mu L Q}{A^2} \quad (7)$$

Čia:  $\Delta p$  – slėgių skirtumas (atgalinis slėgis) vamzdyje;

L – vamzdžio ilgis;

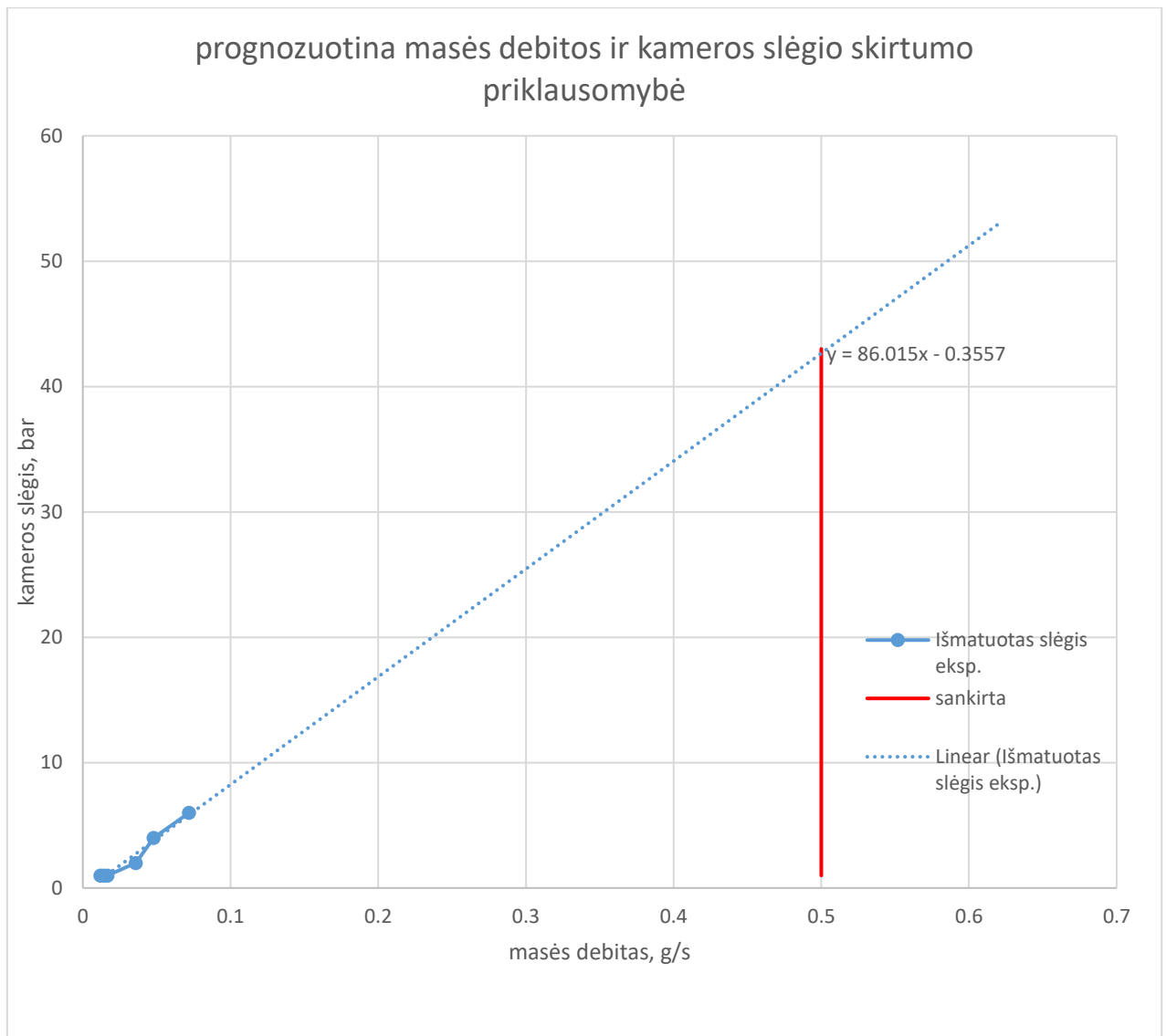
$\mu$  – dinaminė klampa (viskoziškumas) ;

Q – tūrinis debitas;

R – vamzdžio spindulys;

A – vamzdžio skerspjūvio plotas

Remiantis Hagen–Poiseuille lygtimi (7), galima teigti jog atgalinis slėgis dėl fluido dinaminės klamos yra tiesiogiai proporcingas fluido tūriniam debitui ir ši proporcija yra linijinė. Pasinaudojant šia teorine priklausomybe, buvo atlikta aproksimacija pagal išmatuotą katalizatoriaus kameros slėgio kitimo tendenciją esant žemesniems debitams, ir nustatyta koks slėgio skirtumas būtų reikalingas, norint pro katalizatoriaus kamerą prastumti 0,5 g/s kuro (37 pav.). Linijinis proporcingumas taip pat grindžiamas ir literatūroje randamais eksperimentiniais pavyzdžiais.



**37 pav.** Prognozuotina masės debitas ir kameros slėgio skirtumo priklausomybė

Šiuo būdu apskaičiuotas reikalingas slėgio skirtumas :

$$\Delta p_{aprok} = 86,015 \times 0,5 - 0,3557 \approx 44,6 \text{ bar}$$

Kadangi toks aproksimacijos metodas nėra labai tikslus, atsargai padauginama iš 1.1 koeficiento ir turime:

$$\Delta p_{koef} = 44,6 \times 1.1 = 49,06 \text{ bar}$$

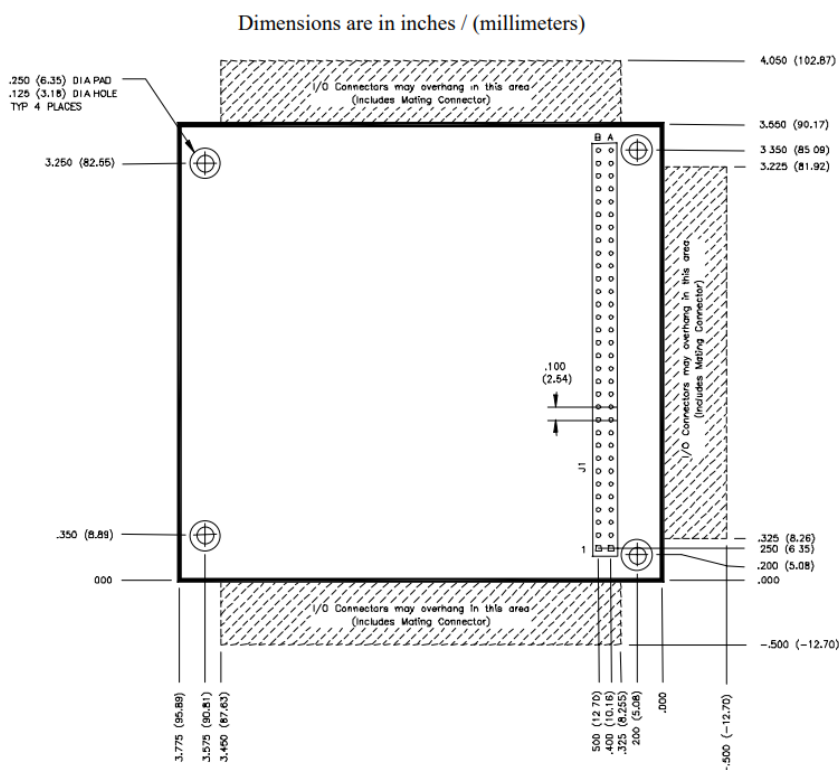
Taip pat, naudojantis Hagen–Poiseuille lygtimi nustatyta jog vamzdynui, reikalingu kurui atvesti iki degimo kameros, būtų reikalingas apie 0,4 bar, vertinant kad vamzdyno vidinis skersmuo yra 1 mm, ilgis 2 m, o kuro dinaminė klampa 0,001249 Pa·s . Kadangi srauto režimas yra laminarinis, sienelės šiuurkštumo įtaka nevertinama.

Taigi, sumoje reikalingas sistemos slėgis, norint išgauti pradinį 0,5 g/s vandenilio peroksido masės debitą yra:

$$\Delta p = 49,06 + 0.4 \approx 50 \text{ bar}$$

#### 4.5. Kuro bako talpos ir sienelių storio nustatymas

Siekiant jog bakas tilptų į standartinių nanopalydovų korpusą, pagal „Cubesat Design Specification“ [3], bako dimensijos neturi viršyti ~90 x 90 mm. Taip pat, nanopalydovuose neretai taikomas PC104 standartas, tad nuspręsta jog bako tvirtinimas būtų atliekamas naudojantis taip pat šį standartą [26].



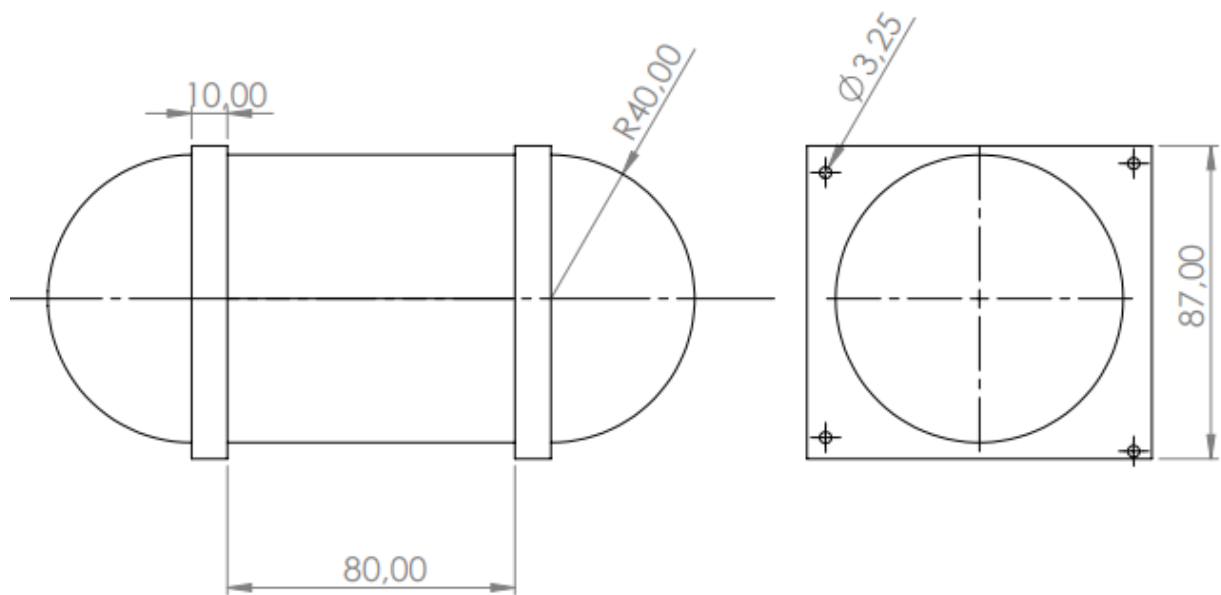
38 pav. PC104 skylių geometrija [26]

Išdėscius tvirtinimo skylės pagal PC104 standartą, taip kaip parodyta 38 pav., komponentas gali būti tvirtinimas tik viena puse. Taip yra todėl, jog skylės išdėstytos nesimetriškai. Tokiu būdu, neįmanoma komponentų pritvirtinti neteisinga kryptimi.

Esant tokiems išoriniams bako geometrijos ribojimams, dar vienas likęs kintamasis yra bako sienelės storis, nuo kurios taip pat priklausys bako talpa. Šis parametras bus patikrinamas naudojantis „Solidworks Simulations“ programinę įrangą.

#### 4.6. Sienų storio patikra

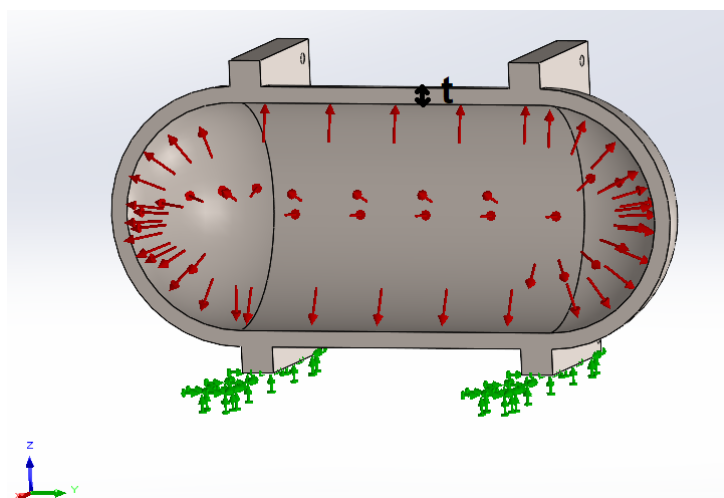
„Solidworks“ programoje buvo sumodeliuota preliminari bako geometrija. Bako geometrija parinkta cilindrinė su sferiniais gaubtais, dėl sąlyginai paprastos gamybos, patogios geometrijos pozicionavimui palydove ir patogaus laikiklių tvirtinimo (39 pav.). Parinkta medžiaga AISI 316L nerūdijantis plienas, kadangi tai yra tvirta, bei chemiškai atspari medžiaga. Šios medžiagos neigiamas aspektas yra, jog jos tankis ganėtinai didelis, tad išauga kosminio aparato masė.



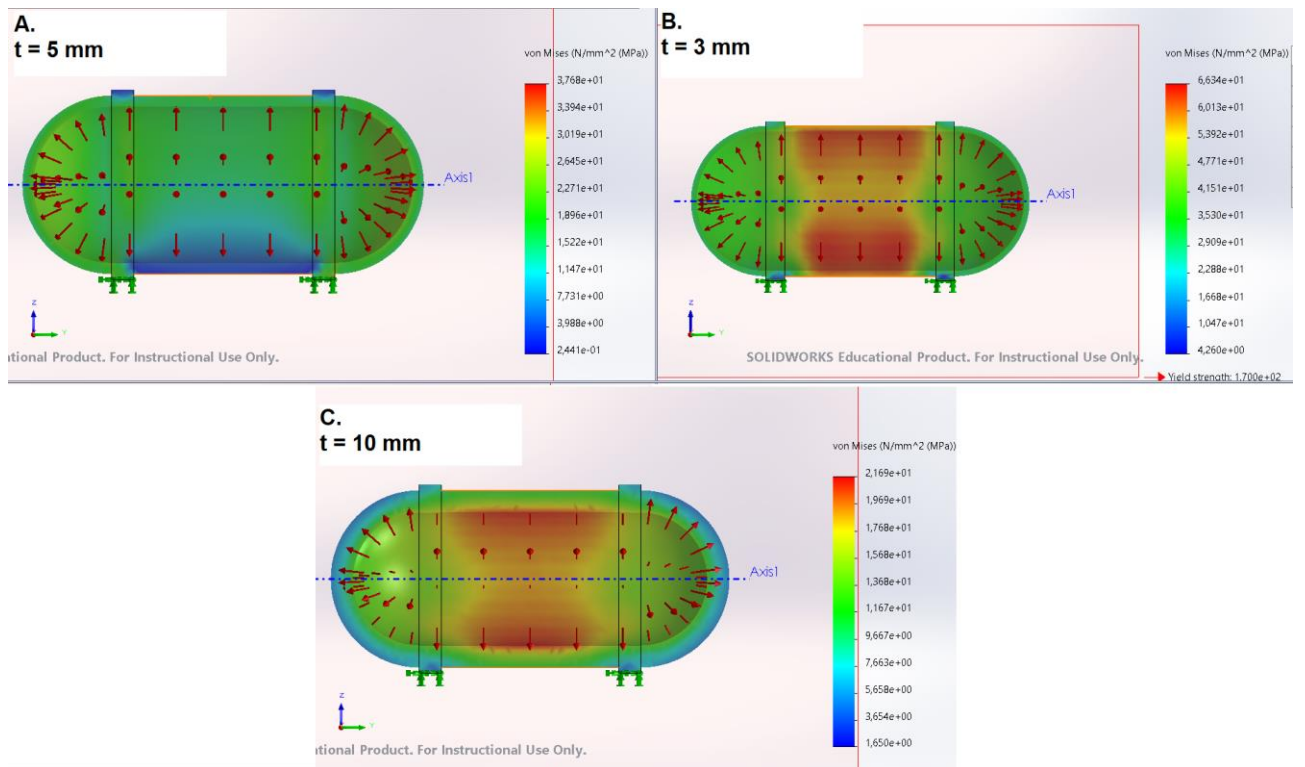
39 pav. Pagrindinės bako dimensijos

Sumodeliavus pirminę geometriją, buvo sukurtos 3 skirtingos konfigūracijos, kuriose skiriasi tik sienų storis, vidinio tūrio sąskaita. Parinkti galimi sienelių storiai: 10 mm; 5 mm; 3 mm. Tada buvo atliekama baigtinių elementų analizė, naudojantis „Solidworks Simulation“ programine įranga. Pirmiausia, sudaromas tinklelis analizei atlikti. Tinklelio tankis parinktas didžiausias, kokį leidžia studentiška programos versija. Tinklelio elementų dydis – 3,24 mm, kiekis – 60427. Didžiausias elemento kraštinių santykis – 11,805. Mazgų (angl. *nodes*) kiekis – 100017. Analizėje naudoto AISI 316L nerūdijančio plieno mechaninės savybės naudotos esamos „Solidworks“ standartinėje bibliotekoje. Tamprumo modulis – 200 GPa, takumo riba – 170 MPa, Puasono koeficientas – 0,265.

Bakas įtvirtinamas ties stačiakampiais laikikliais, ir iš vidaus uždedama 50 MPa slėgio apkrova visu vidiniu paviršiumi, kaip parodyta 40 pav. Šiame paveiksle parodytas bako pjūvis per dešinę plokštumą. Raudonos rodyklės žymi slėgio apkrovas iš vidaus, o žalios – bako įtvirtinimą. Visais atvejais apkrovos, įtvirtinimas ir analizės tinklelis paliekamas vienodas. Skiriasi tik sienelių storis t.

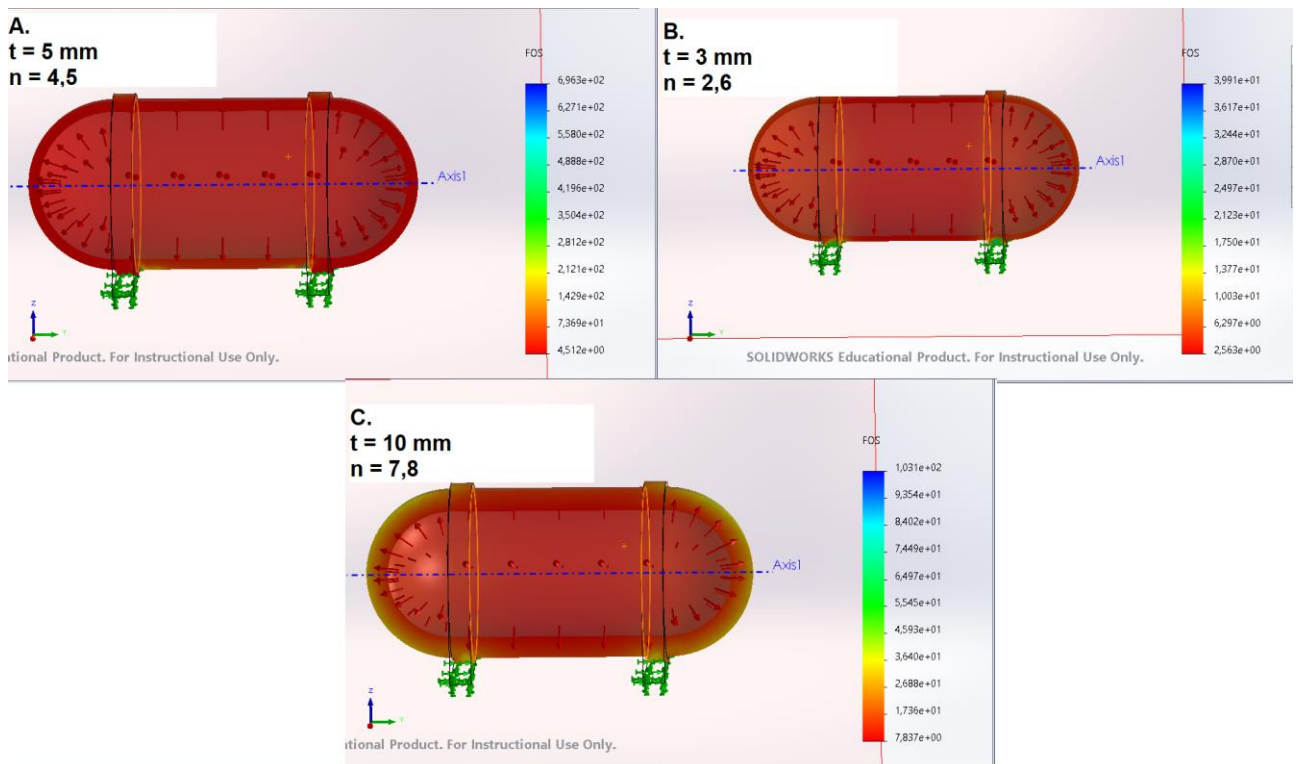


40 pav. Bako įtvirtinimo ir apkrovos vaizdas, su pjūviu.



**41 pav.** „Solidworks simulation“ įtempimų analizė esant skirtingiems bako sienelių storiams

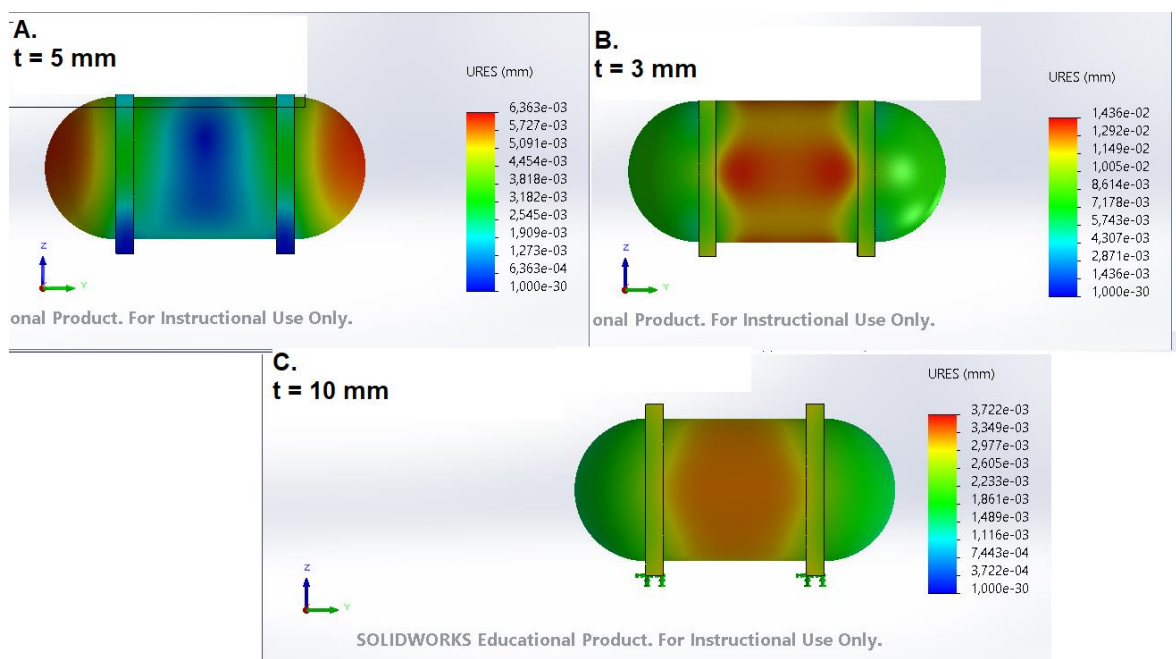
41 pav. matoma kur, kiekvienu atveju susidaro maksimalūs Mizeso įtempiai. B ir C atveju tai yra cilindro vidurys, o A atveju tai gaubtų kraštai. A konfigūracijos maksimalūs Mizeso įtempiai – apie 38 MPa, B – 66 MPa, C – 22 MPa. Stebima aiški atvirkštinė sienelių storio ir Mizeso įtempių priklausomybė. Takumo riba (170 MPa) nei vienu variantu nėra pasiekama, tad sekanti analizė atliekama nustatyti atsargos koeficientams, esant skirtingiems sienelių storiams. Rezultatai atvaizduojami 42 pav. Viso bako atsargos koeficientas parenkamas, pagal mažiausią gautą reikšmę. T.y. – koeficientas parenkamas pagal silpniausią bako sritį.



42 pav. „Solidworks simulation“ atsargos koeficientų analizė esant skirtingiems bako sienelių storiams

Gautos atsargos koeficientų reikšmės: 10mm – 7,8; 5mm – 4,5; 3mm – 2,6 . Atsižvelgiant į tai jog, slėginiams indams rekomenduojama 3 – 4 saugos koeficientas, nuspręsta jog 5 mm sienelių storis būtų tinkamas. Esant tokiam sienelių storiui gaunamas bako vidinis tūris – 0,56 l .

Taip pat, 43 pav. pateikiama bako konstrukcijos poslinkių pasiskirstymas. Visais atvejais poslinkiai yra maži – šimtosios arba tūkstantosios milimetro dalys.



43 pav. Poslinkių analizės rezultatai.



#### 4.7. Galutinės traukos schemos sudarymas

Remiantis prieš tai atliktais skaičiavimais, bako tūris yra 0,56 l . Norint pasiekti 0.5 g/s kuro basės debitą, yra reikalingas 50 bar slėgis. Šis slėgis gali būti sukeliamas slegiančiosiomis inertinėmis dujomis, pavyzdžiui Azotu. Reikalingas slegiančiųjų dujų kiekis paskaičiuojamas pagal idealiųjų dujų būsenos lygtį :

$$pV = nRT \quad (8)$$

Čia: p – slėgis;

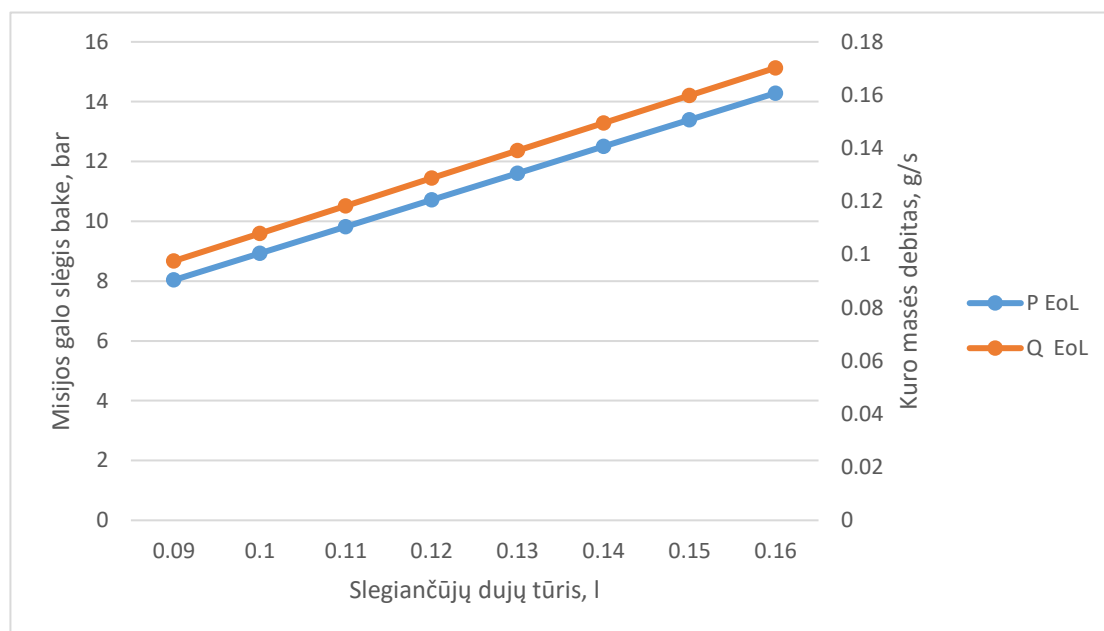
V – tūris;

N – dujų kiekis;

R – universalioji dujų konstanta (8,314 J/mol K);

T – temperatūra.

Remiantis šios lygties skaičiavimais, galime nesunkiai apskaičiuoti reikalingą slegiančiųjų dujų kiekį moliais, o po to apskaičiuoti slėgį, kai bako visiškai nebeliks kuro. Žinant likutinį slėgį, galima prognozuoti beveik tuščio bako kuro masės debitą ( angl. „*EoL*“ – *end of life*) (44 pav.).



44 pav. Slegiančiųjų dujų tūrio ir misijos galo slėgio/debito priklausomybė

Grafike matoma, jog EoL slėgis ir debitas yra tiesiogiai proporcingi pradiniam slegiančiųjų dujų kiekiui. Visgi, šis kiekis yra atvirkščiai proporcingas liekančiam naudingam kuro kiekiui. Siekiant turėti bent apie 0,1 g/s EoL debitą ir maksimalų naudingą kuro kiekį, šiai projektuotinai sistemai parenkamas 0,1 l slegiančiųjų dujų kiekis, ir atitinkamai 0,46 l kuro kiekis.

Skaičiavimai atliekami priimant 20 °C temperatūrą:

$$n_{steg.d.} = \frac{pV}{RT} = \frac{50 \times 100000 \times 0,1}{8,314 \times 293} \approx 0,205 \text{ mol}$$

$$p_{EoL} = \frac{nRT}{V} = \frac{0,2 \times 8,314 \times 293}{0,56} / 1000 \approx 8,93 \text{ bar}$$

$$Q_{EOL} = \frac{8,93+0,3557}{86,015} \approx 0,108 \text{ g/s}$$

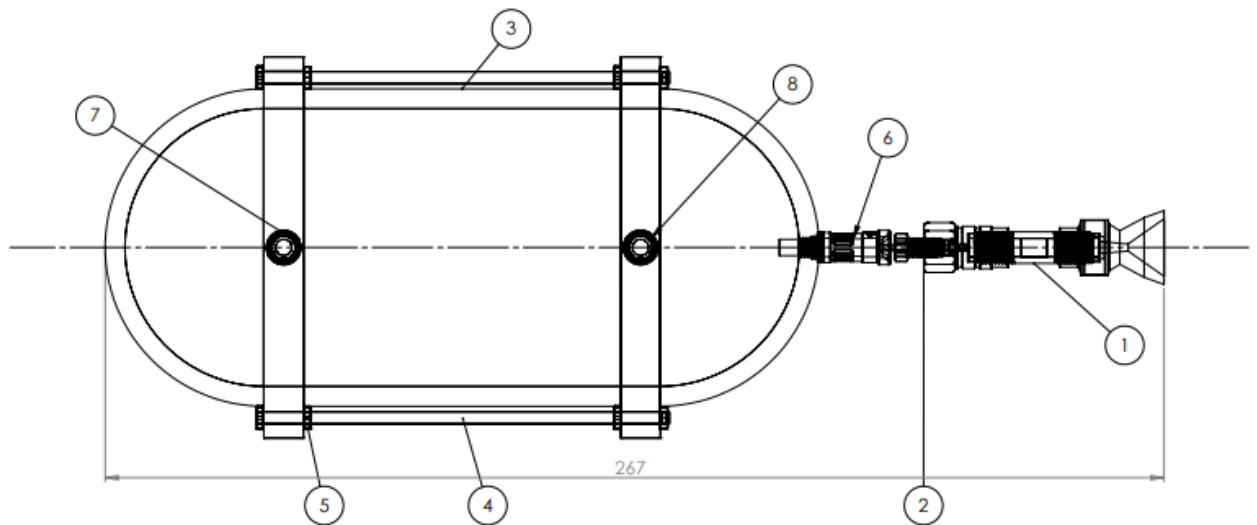
Debito skaičiavimui konstantos naudotos iš tos pačios grafinės lygties 37 pav.

Likęs bako tūris – kurui:

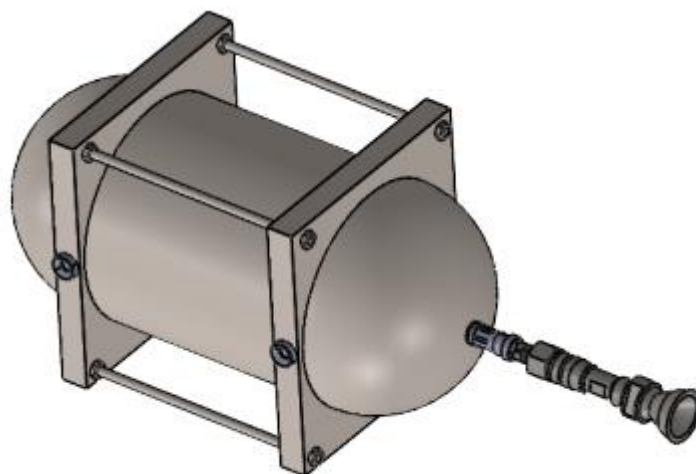
$$V_{kuro} = 0,56 - 0,1 = 0,46 \text{ l}$$

Kuro kiekis kilogramais :

$$m_{kuro} = 0,46 \times 1,44 = 0,6624 \text{ kg}$$

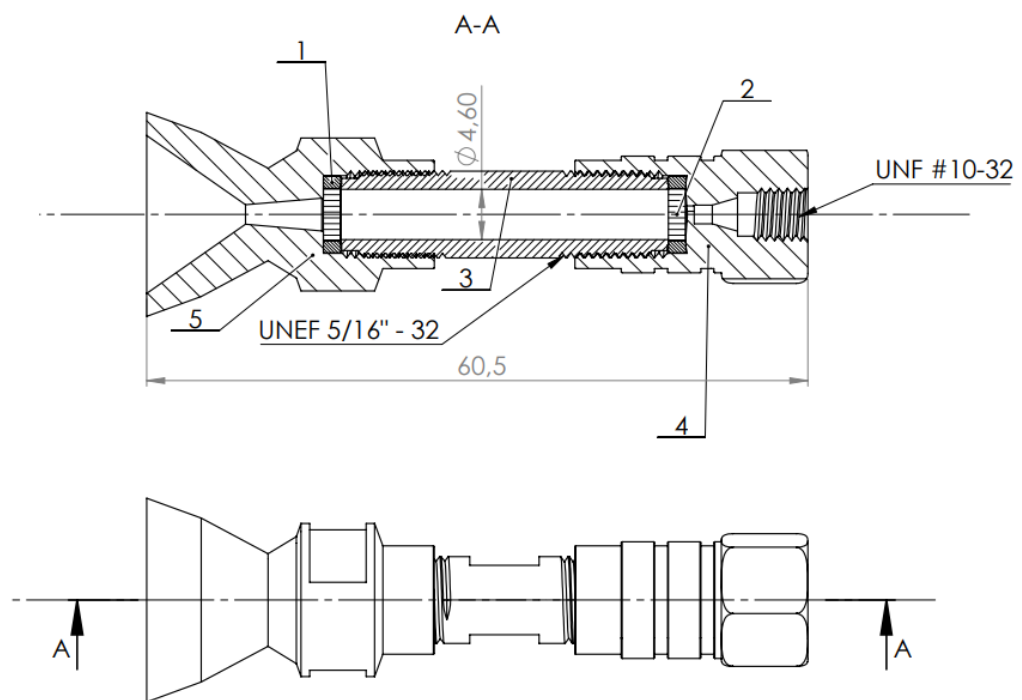


**45 pav.** Principinė sistemos schema. 1 - Katalitinė degimo kamera, su tūta ir purkštuvu – variklis; 2 - Jungtis tarp kuro padavimo vožtuvo ir variklio; 3 - Kuro ir slegiančiųjų dujų bakas; 4 – M3 montavimo strypai; 5 – M3 veržlės; 6 – Kuro padavimo solenoidinis vožtuvas; 7 – Atbulinis vožtuvas slegiančiųjų dujų pildymui; 8 – Atbulinis vožtuvas kuro pildymui

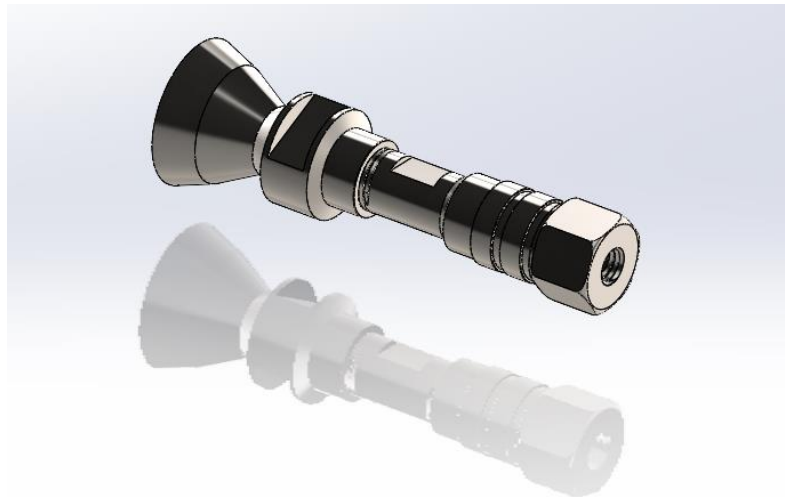


**46 pav.** Izometrinis sistemos vaizdas

46 ir 45 pav. pavaizduota koncepcinė traukos sistema, suprojektuota pagal prieš tai skyriuje aprašytus ir apskaičiuotus parametrus. Ši schema yra supaprastinta, neturi pagalbinių tvirtinimo konstrukcijų, atsarginių vožtuvų, debitomačių, slėgio ir temperatūros matuoklių, elektroninių valdymo sistemų. Čia atvaizduotas vamzdynas yra žymiai trumpesnis negu būtų tikroje sistemoje su prieš tai išvardintais elementais. Visgi, svarbiausi funkciniai komponentai schemeje pavaizduoti. Bakas (3) būtų gaminamas 3D spausdinimo būdu arba suvirinamas iš dalių. Jo viduje reikalinga membrana, jog būtų atskiriamos slegiančiosios dujos ir skystas kuras. M3 montavimo strypai (4) fiksuojami veržlėmis (5) prie bako korpuso (3) ir tuo pačiu prie palydovo rėmo. Prieš naudojant sistemą, bakas (3) užpildomas vandenilio peroksidu per atbulinį vožtuvą (8), tada suslegiamas Azotu per vožtuvą (7). Kai norima variklį panaudoti, kuras dozuojamas atidarant solenoidinį vožtuvą (6), ir dėl slėgių skirtumo, yra dozuojamas per jungtį (2) į variklį (1). Visos konstrukcinės dalys projektuojamos naudojant nerūdijantį plieną 316, dėl didelio stiprumo ir atsparumo korozijai, cheminiam poveikiui. Variklio brėžinys matomas 47 pav. ir jo modelio vaizdas 48 pav.



**47 pav.** Principinis variklio brėžinys. 1, 2 – filtrai; 3 – katalizatoriaus/degimo kamera; 4 – prisukamos purkštuvai; 5 – prisukama tūta



**48 pav.** Izometrinis variklio vaizdas

Šio darbo apimtyje buvo suprojektuoti tik preliminarūs purkštuvai ir tūta. Jie prisukami sriegiais, UNEF 5/16" – 32, naudojant filtro metalinius kraštus kaip tarpines. Tūta suprojektuota su 9 mm išpjovomis raktui. Purkštuvai projektuotini su prisukama feruline jungtimi, per kurią būtų prijungiama jungtis kuriai paduoti. Taip pat, purkštuvai turi penkias apskritimu išdėstytas 0,5 mm skersmens skyles kuro padavimui ir išsklaidymui, parodytas 49 pav.



**49 pav.** Purkštuvo vaizdas iš vidaus

Variklio veikimo principas: per purkštuvą (4), vandenilio peroksidas išsklaidomas į katalizatoriaus ir degimo kamerą (3), kurioje vyksta intensyvi cheminė reakcija, susidaro dujiniai vandens ir deguonies garai, kurie išlekia pro tūtą (5) ir taip generuoja trauką.

#### **4.8. Prognozuojami suprojektuotos sistemos rezultatai.**

Kadangi eksperimentiniuose tyrimuose buvo naudotas neaktyvuotas katalizatorius, neįmanoma realiai įvertinti kokio našumo būtų projektuotina traukos sistema. Visgi, apžvelgus rinkoje esančias sistemas, ir įvertinus išmatuotą katalitinės kameros atgalinį slėgį, galima prognozuoti jog siūloma sistema sugeneruotų didesnę nei 200 s specifinį impulsą ir daugiau nei 1 N trauką, esant 0.5 g/s kuro debitui. Papildomi prognozuojami sistemos privalumai: stabilesnis degimo režimas, mažesnė katalizatoriaus degradacija.

**6 Lentelė.** Rinkoje esančios ir projektuotos cheminės traukos sistemos palyginimas [20]

Traukos sistemos pavadinimas	“NanoAvionics“ [38]	Projektuotina sistema
Plotis (mm)	100	87
Gylis (mm)	100	87
Aukštis (mm)	200	267
Kuras	ADN	Vandenilio peroksidas (HTP)
Trauka( N)	1	>1
Sistemos masė su kuru (kg)	2,6	2,7
Sistemos slėgis BOL (bar)	25	50
Sistemos slėgis EOL (bar)	5,5	8,9
Kuro masė (kg)	0,8	0,664
Masės debitas (g/s) BOL	0,5	0,5
Masės debitas (g/s) EOL	0,12	0,11
Specifinis impulsas (s)	220	>220

Šiame darbe nebuvo skirta daug dėmesio ir laiko likusiems sistemos komponentams, tad jie paimti standartiniai, neoptimizuojant ar neanalizuojant jų projektinių parametrų. Dėl šios priežasties sistema yra tik principinio pobūdžio, ir jos geometriniai parametrai nėra konkurencingi, lyginant su rinkoje esančiais pavyzdžiais. Tikimasi, jog traukos sistema, naudojanti tokio tipo katalizatoriaus matricos užpildymą, veiks našiau ir stabiliau. Patvaresnį katalizatoriaus matricos išsidėstymą atspindi didesnis atgalinis slėgis (hidraulinis pasipriešinimas). Šio efekto kaina yra ta, jog sistemai reikalingas didesnis slegiančiųjų dujų kiekis. Tai reiškia, jog reikia arba didinti sistemos bako tūrį, arba mažinti kuro kiekį, lyginant su įprasta traukos sistema. Šiame darbe tai atspindi lyginant koncepcines sistemos parametrus su rinkoje esančia sistema (6 lent.). Matoma, jog koncepcinė sistema turi apie 17% mažiau kuro masės, bei didesnius matmenis.

## Išvados

1. Apžvelgus literatūrą, nustatyta jog pagrindinis vienkomponenčio kuro raketinio variklio projektinis kriterijus yra naudojamas kuras. Nuo kuro pasirinkimo priklausys specifinis impulsas, išvystoma trauka, katalizatoriaus pasirinkimas, reikalingas slegiančiųjų dujų kiekis, variklio korpuso ir tarpinių medžiagos. Kiti identifikuoti svarbūs kriterijai - katalizatoriaus dalelių dydis, morfologija, užpildymo būdas, katalitinės kameros ilgis, skersmuo. Taip pat, purkštuvo tipas, angų skersmuo ir skaičius, išmetimo tūtos konverguojančios ir diverguojančios dalių geometriniai parametrai. Kadangi būtent katalizatoriaus ir degimo kamera turi didžiausią reikšmę variklio veikimui, buvo nuspręsta šias dalis išnagrinėti itin detaliai.
2. Darbe aprašytas naujo tipo katalizatoriaus įkrovos metodas, naudojant aukšto slėgio stūmoklinę hidraulinę pompą. Darbe kaip matrica buvo naudojamos aliuminio oksido dalelės. Norint taikyti šį metodą, reikia katalizatoriaus daleles disperguoti, sudarant emulsiją arba suspensiją. Tinkamiausi tirpikliai iš tirtų, rasti šie : grynas distiliuotas vanduo; distiliuoto vandens bei SDS mišinys.
3. Eksperimentiniu būdu, bei biriu būdu, užpildytos kameros buvo ištirtos išmatuojant jose susidarantį slėgį, leidžiant fiksuotą skysčio debitą. Didžiausias atgalinis slėgis (pasipriešinimas) iš tirtų konfigūracijų, stebimas naudojant 50 – 200 mikronų dydžio daleles, aukšto slėgio užpildyme. Ši konfigūracija turi 28 kartus didesnę atgalinį slėgį, nei tos pačios kameros, su tą pačia įkrova, užpildytos biriu metodu. Kameros, užpildytos aukštu slėgiu 600 – 1200 mikronų dalelėmis, turi 3 kartus didesnę atgalinį slėgį, nei tos pačios kameros, su tą pačia įkrova, užpildytos biriu metodu.
4. Remiantis gautais rezultatai buvo sumodeliuota konceptuali traukos sistema, naudojanti autoriaus siūlomu būdu užpildytą katalizatoriaus kamerą. Tokios sistemos pagrindiniai projektiniai parametrai būtų konkurencingi su rinkoje esančiais produktais. Projektinės sistemos slegiančiųjų dujų ir kuro bakas turėtų 5 mm storio nerūdijančio plieno sienelės, atsargos koeficientas – 4,5. Kurui dozuoti naudojamos 50 bar slėgio azoto dujos. Tokia sistema, misijos pradžioje, generuotų 0,5 g/s kuro debitą.

## Informacijos šaltinių sąrašas

1. AMRI, R. et al. The design, development and test of one newton hydrogen peroxide monopropellant thruster. In *Aerospace Science and Technology* [interaktyvus]. 2013. Vol. 25, no. 1, p. 266–272. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2012.02.002>>.
2. AMROUSSE, R. et al. Hydroxylammonium nitrate (HAN)-based green propellant as alternative energy resource for potential hydrazine substitution: From lab scale to pilot plant scale-up. In *Combustion and Flame* [interaktyvus]. 2017. Vol. 176, p. 334–348. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.11.011>>.
3. CALPOLY Cubesat design specification. In *The CubeSat Program, California Polytechnic State ...* [interaktyvus]. 2009. Vol. 8651, no. June 2004, p. 22. Prieiga per internetą: <[http://www.cubesat.org/images/developers/cds\\_rev12.pdf%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:CubeSat+Design+Specification#0](http://www.cubesat.org/images/developers/cds_rev12.pdf%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:CubeSat+Design+Specification#0)>.
4. CAVALLO, A. et al. Simulation Model for Catalytic Monopropellant Hydrazine Thrusters. In *IFAC Proceedings Volumes* [interaktyvus]. 1992. Vol. 25, no. 6, p. 491–494. Prieiga per internetą: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)50954-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1474-6670(17)50954-4)>.
5. CERVONE, A. et al. Development of hydrogen peroxide monopropellant rockets. In *Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/SAE/ASEE 42nd Joint Propulsion Conference* . 2006. Vol. 11, p. 8786–8796. .
6. CERVONE, A. et al. Development of hydrogen peroxide monopropellant rockets. In *Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/SAE/ASEE 42nd Joint Propulsion Conference* . 2006. Vol. 11, no. July, p. 8786–8796. .
7. COORPORATION, H.H.-T. 2009. .
8. ESSA, K. et al. Development and testing of an additively manufactured monolithic catalyst bed for HTP thruster applications. In *Applied Catalysis A: General* [interaktyvus]. 2017. Vol. 542, p. 125–135. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apcata.2017.05.019>>.
9. GUSEINOV, S.L. et al. Hydrogen Peroxide Decomposition Catalysts Used in Rocket Engines. In *Russian Journal of Applied Chemistry* . 2020. Vol. 93, no. 4, p. 467–487. .
10. HAWKER, P. et al. Effect of a continuously regenerating diesel particulate filter on non-regulated emissions and particle size distribution. In *SAE Technical Papers* . 1998. Vol. 107, no. May 2022. .
11. HINCKEL, J.N. et al. Low cost catalysts for hydrazine monopropellant thrusters. In *45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit* . 2009. no. August 2009. .
12. KAKAMI, A. No Title. In [interaktyvus]. 2018. Prieiga per internetą: <<https://www.slideshare.net/akirakakami/a-brief-history-of-chemical-rocket-engines-thrusters-for-spacecraft-89078229>>.
13. KRISHNAN, S. - LEE, C.W. Design and development of a hydrogen-peroxide rocket-engine facility. In . no. September 2015. .
14. LEE, D. et al. High performance microthruster with ammonium-dinitramide-based monopropellant. In *Sensors and Actuators, A: Physical* [interaktyvus]. 2018. Vol. 283, no. April 2017, p. 211–219. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.09.047>>.
15. LIANG, T. et al. A hydrogen peroxide electric pump for throttleable hybrid rocket motor. In *Acta Astronautica* [interaktyvus]. 2022. Vol. 192, no. December 2021, p. 409–417. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.12.050>>.
16. MANENTE, M. et al. REGULUS: A propulsion platform to boost small satellite missions. In *Acta Astronautica* [interaktyvus]. 2019. Vol. 157, no. December 2018, p. 241–249. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.12.022>>.
17. MANI, K.V. et al. Chemical propulsion system design for a 16U interplanetary cubeSat. In *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC* . 2018. Vol. 2018-October, no. May. .
18. MARSHALL, W.M. - DEANS, M.C. Recommended figures of merit for green monopropellants. In *49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference* . 2013. Vol. 1 PartF, p. 1–13. .

19. MARTINO, G.D. DI et al. Design and testing of a monopropellant thruster based on N<sub>2</sub>O decomposition in Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pellets catalytic bed. In *Acta Astronautica* [interaktyvus]. 2021. Vol. 180, no. March 2020, p. 460–469. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.12.016>>.
20. MONETTE, M. et al. 5 N Scale Preliminary Thruster Test with an ADN-based Monopropellant. In *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers* . 2018. Vol. 22, no. 2, p. 29–37. .
21. NADA, T.R. - HASHEM, A.A. Geometrical characterization and performance optimization of monopropellant thruster injector. In *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* [interaktyvus]. 2012. Vol. 15, no. 2, p. 161–169. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2012.09.001>>.
22. NASA 5. PROPULSION SYSTEMS. In [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <<https://history.nasa.gov/conghand/propulsn.htm>>.
23. NEGRI, M. et al. New technologies for ammonium dinitramide based monopropellant thrusters – The project RHEFORM. In *Acta Astronautica* . 2018. Vol. 143, no. July 2017, p. 105–117. .
24. NEGRI, M. et al. New technologies for ammonium dinitramide based monopropellant thrusters – The project RHEFORM. In *Acta Astronautica* . 2018. Vol. 143, no. April 2018, p. 105–117. .
25. OSMAN, A.H. et al. CFD Analysis of De Laval Nozzle Geometry &. In . 2019. Vol. 5, no. March, p. 129–134. .
26. PC/104 EMBEDDED CONSORTIUM PCI-104 Specification. In *PC104 Organisation* . 2008. no. Version 2.6, p. 3–10. .
27. ROBINSON, C. Flow Through a de Laval Nozzle. In . 2016. .
28. ROSSETTI, I. et al. Structured monolithic catalysts vs. Fixed bed for the oxidative dehydrogenation of propane. In *Materials* . 2019. Vol. 16, no. 6. .
29. SHIROMA, W.A. et al. CubeSats: A bright future for nanosatellites. In *Central European Journal of Engineering* . 2011. Vol. 1, no. 1, p. 9–15. .
30. SUN, D. chuan et al. Numerical simulation of the transient process of monopropellant rocket engines. In *Aerospace Science and Technology* [interaktyvus]. 2020. Vol. 103, p. 105921. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105921>>.
31. TAYLOR, T.S. *Introduction to rocket science and engineering: Second edition*. . 2017. 1–319 p. ISBN 9781498772334.
32. TUMMALA, A.R. - DUTTA, A. An overview of Cube-Satellite propulsion technologies and trends. In *Aerospace* . 2017. Vol. 4, no. 4, p. 1–30. .
33. WARREN, W.C. - PETERSON, D.E.L. Experimental Techniques for the Study of Liquid Monopropellant Combustion. In *Mechanical Engineering* . 2012. Vol. Master of, no. May, p. 84. .
34. WEKERLE, T. et al. Status and trends of smallsats and their launch vehicles - An up-to-date review. In *Journal of Aerospace Technology and Management* . 2017. Vol. 9, no. 3, p. 269–286. .
35. WERNIMONT, E. et al. Past and present uses of rocket grade hydrogen peroxide. In *General Kinetics, LLC ...* . 2005. p. 1–15. .
36. YU, N. et al. Analysis of De-Laval nozzle designs employed for plasma figuring of surfaces. In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [interaktyvus]. 2016. Vol. 87, no. 1–4, p. 735–745. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8502-y>>.
37. Chemical Propulsion Systems. In [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <<https://www1.grc.nasa.gov/research-and-engineering/chemical-propulsion-systems/>>.
38. CubeSat Propulsion System EPSS. In [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <<https://nanoavionics.com/cubesat-components/cubesat-propulsion-system-epss/>>.
39. No Title. In [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <<http://dev.cubesat-propulsion.com/cubesat/test-product-1-cubesat/>>.
40. Principles of Scanning Electron Microscopy. In [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <<https://www.thermofisher.com/lt/en/home/materials-science/learning->



center/applications/scanning-electron-microscope-sem-electron-column.html>.

41. pubchem.ncbi.nlm.nih.gov. In [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
<<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Hydrogen-peroxide>>.

42. Surface Area to Volume Ratio. In [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
<<https://www.csun.edu/science/ref/math/geometry/surface-area-vol.html>>.