



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Vandenilio peroksidu varomo raketinio variklio projektavimas ir vidinės balistikos tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Ažuolas Paulikas
Projekto autorius

Prof. Sigitas Kilikevičius
Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Vandenilio peroksidu varomo raketinio variklio projektavimas ir vidinės balistikos tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Aeronautikos inžinerija (6211EX024)

Ažuolas Paulikas

Projekto autorius

Prof. Sigitas Kilikevičius

Vadovas

Asist. Kristina Liutkauskienė

Recenzentė

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Ažuolas Paulikas

Vandenilio peroksidu varomo raketinio variklio projektavimas ir vidinės balistikos tyrimas

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.

Ažuolas Paulikas

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Išduota studentui (-ei) – Ažuolui Paulikui

1. Projekto tema

Vandenilio peroksidu varomo raketinio variklio projektavimas ir vidinės balistikos tyrimas

(Lietuvių kalba)

Design and Internal Ballistics Study of a Hydrogen Peroxide-Powered Rocket Engine

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: Sudaryti vidinės balistikos matematinį modelį ir juo remiantis suprojektuoti vandenilio peroksidu varomą 20 N raketinį variklį.

Uždaviniai:

1. Išanalizuoti mažos traukos raketinius variklius, veikimo principus, taikymo sritis bei naudojamus kurus ir sudaryti projektuojamo raketinio variklio techninių reikalavimų sąrašą;
2. Sukurti vandenilio peroksidu varomo raketinio variklio vidinės balistikos matematinį modelį;
3. Atlikti vidinės balistikos modeliavimą ir nustatyti projektuojamo variklio stiprumo charakteristikas;
4. Remiantis atliktų tyrimų rezultatais suprojektuoti raketinį variklį ir jo gamybos technologiją.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Įvertinti katalizatoriaus parametrų, tokių kaip, kiekis, fiziniai matmenys, akytumas ir kt. įtaką 20 N traukos jėgą generuojančiam raketiniam varikliui. Atlikti rinkos analizę, parenkant komponentus ir taip siekiant suplanuoti gamybos technologiją. Remiantis rinkos informacija sukurti erdvinį raketinio variklio modelį. Pasiūlyti, galimus, antžeminius raketinio variklio bandymus.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

„Netaikoma“

Projekto autorius	Ažuolas Paulikas <i>(Vardas, Pavardė)</i>	2026-02-15 <i>(Data)</i>
Projekto vadovas	Sigitas Kilikevičius <i>(Vardas, Pavardė)</i>	2026-02-15 <i>(Data)</i>
Krypties studijų programų vadovas	Artūras Keršys <i>(Vardas, Pavardė)</i>	2026-02-15 <i>(Data)</i>

Paulikas, Ažuolas. Vandenilio peroksidu varomo raketinio variklio projektavimas ir vidinės balistikos tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. Sigitas Kilikevičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: raketinis variklis, vandenilio peroksidas, žalioji varos jėga, vidinės balistikos matematinis modelis, variklio projektavimas.

Kaunas, 2026. 65 p.

Santrauka

Šiame darbe yra projektuojamas 20 N traukos jėga generuojantis raketinis variklis, varomas aukštos koncentracijos (98 %) vandenilio peroksidu. Siekiant įvertinti raketinio variklio vidinę balistiką yra pritaikomas matematinis modelis, kuris yra sudarytas remiantis Koopmans'o ir kt. bei Fogler'io darbais. Matematiniam modeliui pritaikyti yra naudojama *Python* programavimo kalba. Matematinis vidinės balistikos modelis vertina dviejų katalizatoriaus sluoksnių su skirtingais katalizatoriaus granulių dydžiais įtaką vandenilio peroksido skilimui. Pasinaudojant matematiniu modeliu yra apskaičiuojama vandenilio peroksido skilimo reakcijos sparta, išskirta šiluma bei slėgio kritimas per visą katalizatoriaus sluoksnio ilgį. Remiantis gautais vidinės balistikos matematinio modelio rezultatais yra suprojektuojamas raketinis variklis, pagal eksploatacinius reikalavimus. Projektavimo metu yra apibrėžiamas kiekvienas raketinio variklio komponentas atskirai. Atsižvelgiant į suderinamumą su vandenilio peroksidu yra parenkamos raketinio variklio konstrukcinės medžiagos. Palyginant skirtingų gamintojų siūlomus solenoidinius vožtuvus, yra atrenkamas kompanijos „Parker“ impulsinis kuro padavimo vožtuvas. Kurui iš vožtuvo į vandenilio peroksido skilimo kamerą paduoti yra panaudojamas vienas kapiliarinis vamzdelis, kuris yra parenkamas pagal raketinio kuro tekėjimo greitį ir slėgio kritimą. Parinkus kapiliarinio vamzdelio ilgį yra apskaičiuojamas vamzdelio pailgėjimas dėl temperatūros įtakos bei slėgio kritimas dėl kapiliarinio vamzdelio formos. Projektuojant vandenilio peroksido skilimo kamerą, buvo parinkta tinkama katalizatoriaus granulių medžiaga – aliuminio oksidas padengtas platina. Įvertinus katalizatoriaus sluoksnio medžiagas buvo apskaičiuoti slėgio nuostoliai per katalizatoriaus pertvaras. Buvo įvertintos raketinio variklio hermetizavimo galimybės. Šiam tikslui įgyvendinti buvo parinkti *Swagelok* mechaniniai bei specialūs srieginiai sujungimai. Taip pat buvo parinkti metaliniai sandarinimo žiedai. Apibūdinus visus projektuojamo raketinio variklio komponentus buvo suprojektuota, atmosferos slėgiui jūros lygyje pritaikyta raketinė tūta, kurios kaklelio skersmuo – 3,5 mm ir galinis tūtos skersmuo – 7,6 mm. Apskaičiuotas bendras slėgio kritimas per visą raketinio variklio ilgį – 28,4 bar, esant tokiam bendram slėgio kritimui buvo apskaičiuotas 43,54 bar dydžio raketinio variklio įvadinis slėgis. Remiantis matematinio modelio bei variklio projektavimo rezultatais buvo atlikti stiprumo skaičiavimai naudojantis baigtinių elementų metodu, *Solidworks* aplinkoje. Supaprastinus erdvinius modelius, atskirai, buvo įvertintos variklio korpuso, galinės katalizatoriaus pertvaros bei kapiliarinio vamzdelio stiprumo savybės. Darbo pabaigoje yra pasiūlomi galimi bandymai, kurie padėtų patvirtinti projektavimo rezultatus.

Paulikas, Ažuolas. Design and Internal Ballistics Study of a Hydrogen Peroxide-Powered Rocket Engine. Masters's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Sigita Kilikevičius; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: Rocket Engine, Hydrogen Peroxide, Green Propulsion, Mathematical Model of Internal Ballistics, Thruster Design.

Kaunas, 2026. 65 p.

Summary

In this thesis, a rocket thruster generating a thrust of 20 N, powered by high concentration (98 %) hydrogen peroxide, is designed. To evaluate the internal ballistics of the rocket engine, a mathematical model is applied, which is based on the works of Koopmans et al. and Fogler. The Python programming language is used to apply the mathematical model. The mathematical model of internal ballistics evaluates the influence of two catalyst bed layers with different catalyst granule sizes on the decomposition of hydrogen peroxide. Using the mathematical model, the reaction rate of hydrogen peroxide decomposition, the released heat and the pressure drop over the entire length of the catalyst bed are calculated. Based on the results of the internal ballistics mathematical model, a rocket engine is designed according to operational requirements. During the design, each component of the rocket engine is defined separately. Considering the compatibility with hydrogen peroxide, the structural materials of the rocket engine are selected. When comparing solenoid valves offered by different manufacturers, a Parker pulse valve is selected. A single capillary tube is used to feed fuel from the valve to the hydrogen peroxide decomposition chamber, which is selected based on the flow rate of the propellant and the pressure drop. After selecting the length of the capillary tube, the elongation of the tube due to temperature and the pressure drop due to the shape of the capillary tube are calculated. When designing the hydrogen peroxide decomposition chamber, a suitable catalyst granule material was selected – aluminium oxide coated with platinum. After evaluating the materials of the catalyst layer, pressure losses through the catalyst bed retainers were calculated. The possibilities of sealing the rocket engine were also evaluated. Swagelok mechanical and special threaded connections were selected for this purpose. Metal sealing rings were also selected. After describing all the components of the designed rocket engine, a rocket nozzle was designed, adapted to atmospheric pressure at sea level, with a throat diameter of 3,5 mm and a nozzle end diameter of 7,6 mm. The total pressure drop over the entire length of the rocket engine was calculated to be 28,4 bar, with such a total pressure drop, the rocket engine inlet pressure was calculated to be 43,54 bar. Based on the results of the mathematical model and engine design, strength calculations were performed using the finite element analysis method in the SolidWorks environment. After simplifying the spatial models, the strength properties of the engine housing, the rear catalyst bed retainer and the capillary tube were evaluated separately. At the end of the work, possible tests are proposed that would help confirm the design results.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Raketinių variklių analizė.....	13
1.1. Žalieji raketiniai kurai	13
1.2. Vandenilio peroksido privalumai bei trūkumai	14
1.3. Raketinių variklių projektų palyginimas ir tyrimo aktualumas	15
1.4. Literatūros apžvalgos apibendrinimas	16
2. Raketinio variklio vidinės balistikos tyrimas.....	17
2.1. Pradinės sąlygos	17
2.2. Vidinės balistikos matematinis modelis	18
2.2.1. Molių pusiausvyra	18
2.2.2. Medžiagos pokytis ir stochiometrija.....	19
2.2.3. Vandenilio peroksido skilimo reakcija	20
2.2.4. Temperatūra.....	21
2.2.5. Slėgio kritimas.....	22
2.3. Raketinė tūta	23
2.3.1. Tūtos pagrindinių parametų skaičiavimas.....	23
2.3.2. Konverguojanti (siaurėjanti) zona	24
2.3.3. Diverguojanti (platėjanti) zona.....	25
2.4. Matematinio modelio rezultatai.....	26
3. Raketinio variklio projektavimas	29
3.1. Struktūrinės medžiagos	29
3.2. Impulsiniai vožtuvai	29
3.2.1. Vožtuvų parinkimas.....	29
3.2.2. Slėgio kritimas.....	31
3.3. Kapiliariniai vamzdeliai	33
3.3.1. Kapiliarinio vamzdelio dydžio nustatymas	33
3.3.2. Kapiliarinio vamzdelio forma.....	34
3.3.3. Vamzdelio pailgėjimas	34
3.3.4. Slėgio kritimas.....	35
3.4. Purkštukas.....	36
3.5. Vandenilio peroksido skilimo kamera.....	38
3.5.1. Katalizatorius.....	39
3.5.2. Katalizatoriaus pertvaros	40
3.5.3. Vandenilio peroksido skilimo kameros gamyba	41
3.6. Hermetizavimas	41
3.6.1. Swagelok sujungimai.....	41
3.6.2. Srieginiai sujungimai.....	42
3.6.3. Sandarinimo žiedai	43
3.7. Šiluminė atrama.....	44
3.8. Raketinė tūta	45
3.9. Bendras raketinio variklio slėgio kritimas.....	46

3.10. Galutinis erdvinis modelis	47
3.11. Apibendrinimas	48
4. Baigtinių elementų metodo matematiniai modeliai.....	49
4.1. Vandens peroksido skilimo kamera.....	49
4.2. Katalizatoriaus sluoksnio pertvara	52
4.3. Kapiliarinis vamzdelis	54
5. Bandymų planas	57
5.1. Kuro padavimo sistemos bandymas	57
5.2. Veikimo režimo bandymas.....	58
Išvados	60
Literatūros sąrašas	61
Priedai.....	66
1 priedas. Reikalavimai projektuojamam varikliui	66
2 priedas. Vidinės balistikos matematinio modelio <i>Python</i> kodas	68
3 priedas. Įlinkio nuostolių koeficientai vamzdžiams [44]	81

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Pradiniai parametrai.....	17
2 lentelė. Potencialių vožtuvų pasirinkimai	31
3 lentelė. Slėgio kritimo rezultatai kiekvienam segmentui	36
4 lentelė. Raketinio variklio komponentų slėgio kritimų reikšmės	46

Paveikslų sąrašas

1 pav. „Dawn Aerospace B20“ raketiniai varikliai [10]	13
2 pav. Nano Avionics EPSS [11]	14
3 pav. „Łukasiewicz“ aviacijos instituto 1N traukos raketinis variklis [20].....	15
4 pav. Raketinės tūtos kaklelio formos grafikas	25
5 pav. Raketinės tūtos Bezjė kreivės taškų N, Q ir E vaizdas [30].....	26
6 pav. Skilimo reakcijos produktų molių dalies priklausomybės nuo katalizatoriaus ilgio grafikas	27
7 pav. Temperatūros priklausomybės nuo katalizatoriaus ilgio grafikas.....	27
8 pav. Slėgio kritimo priklausomybės nuo katalizatoriaus ilgio grafikas	28
9 pav. „Parker Pulse valve“ impulsinis vožtuvas [34]	30
10 pav. Projektuojamo kapiliarinio vamzdelio forma.....	34
11 pav. ΔP priklausomybė nuo vamzdelio ilgio	35
12 pav. ΔP priklausomybė nuo vamzdelio skersmens	35
13 pav. Kapiliarinio vamzdelio segmentai.....	36
14 pav. Kuro purkštuko forma	37
15 pav. Purkštuko angos skersmens nuo slėgio kritimo priklausomybė.....	37
16 pav. Ohnesorge'o skaičiaus priklausomybės nuo Reynolds'o skaičiaus, grafikas [46].....	38
17 pav. Vandenilio peroksido skilimo ant skirtingų medžiagų laikas [51].....	39
18 pav. Katalizatoriaus pertvara.....	40
19 pav. „Swagelok“ SS-100-6 sujungimas [54].....	41
20 pav. „Swagelok“ kapiliarinio vamzdelio mechaninis sujungimas	42
21 pav. „Swagelok“ sujungimo schema [53]	42
22 pav. Katalizatoriaus pertvaros (kairėje) srieginis sujungimas su variklio korpusu (dešinėje).....	43
23 pav. Raketinio variklio korpuso dalys.....	43
24 pav. Metaliniai sandarinimo žiedai [56].....	44
25 pav. Raketinio variklio šiluminė atrama	45
26 pav. Atmosferai optimizuota raketinė tūta	46
27 pav. Surinkto raketinio variklio vaizdas	47
28 pav. Surinkto raketinio variklio skerspjūvio vaizdas	47
29 pav. Supaprastintas vandenilio peroksido skilimo kameros modelio vaizdas	49
30 pav. Vandenilio peroksido skilimo kameros modelio kraštinės sąlygos.....	50
31 pav. Įtempių pasiskirstymas (kairėje variklio vidus, dešinėje išorė)	50
32 pav. Poslinkių pasiskirstymas (kairėje variklio išorė, dešinėje vidus).....	51
33 pav. Atsargos koeficientų pasiskirstymas (dangtelio apačia dešinėje, viršus kairėje).....	51
34 pav. Atsargos koeficientų pasiskirstymas (kamos vidus kairėje, išorė dešinėje)	52
35 pav. Supaprastintas katalizatoriaus pertvaros erdvinio modelio vaizdas	52
36 pav. Katalizatoriaus pertvaros kraštinės sąlygos.....	53
37 pav. Katalizatoriaus pertvaros įtempių pasiskirstymas	53
38 pav. Katalizatoriaus pertvaros poslinkių pasiskirstymas	53
39 pav. Katalizatoriaus pertvaros atsargos koeficiento pasiskirstymo vaizdas.....	54
40 pav. Kapiliarinio vamzdelio kevalinis modelis.....	54
41 pav. Kapiliarinio vamzdelio kraštinių sąlygų vaizdas.....	55
42 pav. Kapiliarinio vamzdelio įtempių pasiskirstymas	55
43 pav. Kapiliarinio vamzdelio poslinkių pasiskirstymas	56
44 pav. Kapiliarinio vamzdelio atsargos koeficiento pasiskirstymas	56

45 pav. Kuro padavimo sistemos bandymų stendo schema.....	57
46 pav. Kuro purkštuko bandymų stendo schema	58
47 pav. Projektuojamo raketinio variklio tyrimo schema	58
48 pav. Raketinių bandymų stendas.....	59

Santrumpų sąrašas

Santrumpos:

ADN – Amonio dinitramidas;

ASCENT – Pažangus erdvėlaivis, energingas, netoksiškas (angl. *Advanced Spacecraft Energetic NonToxic*);

EKA – Europos Kosmoso Agentūra;

EPSS – Mažų palydovų varos sistemos įgalinimas (angl. *Enabling Propulsion System for Small Satellites*);

HAN – Hidroksilamonio nitratas;

HPGP – Didelio našumo ekologiška varos jėgos sistema (angl. *High Performance Green Propulsion*);

MEOP – Didžiausias numatomas veikimo slėgis (angl. *Maximum Expected Operating Pressure*);

RKS – Reakcijos Kontrolės Sistema (angl. *Reaction Control System*);

RoHS – Pavojingų medžiagų apribojimas (angl. *Restriction of Hazardous Substances*)

WEP – Vandens elektrolizės varos jėgos sistema (angl. *Water Electrolysis Propulsion*);

Įvadas

Raketų istorija prasideda dar XIII amžiuje, Kinijoje, kai prie strėlių buvo pritvirtinami paraku užpildyti užtaisai. Šios strėlės gebėdavo skrieti kur kas toliau, nei įprastos iš lanko paleistos strėlės. Parakas, kaip kietas kuras raketinėje technikoje yra sutinkamas iki šių dienų, tačiau 1903-iais metais rusų mokslininko K. Ciolkovskio išleistame darbe „Kosmoso tyrinėjimas naudojant reaktyvinius prietaisus“ buvo pasiūlyta, jog skystas raketinis kuras yra kur kas pranašesnis. Autorius manė, jog skystas vandenilis gali būti panaudotas kaip kuras ir deginamas pasinaudojant skystu deguonimi, kaip oksidatoriumi [2]. Panašiu metu, apie vandenilį ir deguonį kaip raketinį kurą mąstė ir amerikiečių mokslininkas Robertas Goddard'as. Jis, 1923 metais, sukonstravo pirmąjį skystu kuru varomą raketinį variklį [3]. Antrojo pasaulinio karo metais, skystu kuru varomos raketos buvo panaudotos kariniais tikslais ir iškart po karo sąjungininkų pajėgos pastebėjo raketų potencialą. Tiek Jungtinės Valstijos, tiek ir Sovietų Sąjunga, šaltojo karo metais, savo raketų arsenalus kūrė remdamiesi vokiečių mokslininkų sukonstruota V2 raketa [4]. Greitai buvo pastebėta, jog ne visi skysti kurai yra tinkami raketoms, kai norima reaguoti greitai. Siekiant jog raketos galėtų būti pripildomos kuru ir sandėliuojamos, chemijos mokslininkai stengėsi sukurti sandėliuojamus raketinius kurus (angl. *Storable propellants*) [2]. Šiam tikslui skystas vandenilis ar deguonis netinka, nes šie yra linkę išgaruoti, todėl nuolat laikyti šiuos kurus šaltus nebuvo praktiška. Kiti potencialūs skysti kurai pasirodė arba per daug édrūs arba per daug toksiški. Galimų raketinių kurų sąrašą taip pat sumažino ir reikalavimas gebėti būti panaudotais tam tikruose temperatūrų režimuose bei būti savaime įsiliepsnojantys. Kitas svarbus, reikalavimas buvo padaryti raketos kuro sistemą kuo paprastesnę.

Kuro sistemą raketoje galima supaprastinti panaudojant tik vieną cheminį junginį, kaip kurą. Vienas iš tokių kurų buvo Hidrazinas [2]. Hidrazinas, kaip kuras yra pigus susintetinti, yra sąlyginai stabilus bei lengvai skyla panaudojant įvairius katalizatorius. Nors hidrazinas ir yra toksiškas ir gali sukelti vėžį, pasinaudojant tinkamomis apsauginėmis priemonėmis, yra gana saugus naudoti. NASA Kosminis Šatlas (angl. *Space Shuttle*) naudojo hidraziną savo reakcijos valdymo sistemos (angl. *Reaction control system*) varikliuose, atliekant orbitinius manevrus [5]. Šiomis dienomis hidrazino junginiai naudojami ir *SpaceX* „Dragon“ kapsulėje [6]. Europos Kosmoso Agentūra taip pat naudoja hidrazino junginius savo kosminėse misijose, tokiose kaip „Mars express“ ir „Venus express“ [7][8].

Šiomis dienomis, kosmoso industrija siekia atitolti nuo hidrazino ir jo junginių, dėl toksiškų kuro savybių. Tam pasiekti yra vystomos įvairios žaliųjų raketinių kurų technologijos. Vienas iš šių kurų yra aukštos koncentracijos vandenilio peroksidas. Šiame darbe yra siekiama suprojektuoti raketinį variklį, kuris būtų varomas vien aukštos koncentracijos vandenilio peroksidu, šitaip prisidedant prie pasaulyje vykstančio žaliųjų raketinių kurų kurso įgyvendinimo.

Baigiamojo magistro projekto tikslas – sudaryti vidinės balistikos matematinį modelį ir juo remiantis suprojektuoti vandenilio peroksidu varomą 20 N raketinį variklį.

Tam, kad šis tikslas būtų pasiektas, iškeliami šie uždaviniai:

1. Išanalizuoti mažos traukos raketinius variklius, veikimo principus, taikymo sritis bei naudojamus kurus ir sudaryti projektuojamo raketinio variklio techninių reikalavimų sąrašą;
2. Sukurti vandenilio peroksidu varomo raketinio variklio vidinės balistikos matematinį modelį;
3. Atlikti vidinės balistikos modeliavimą ir nustatyti projektuojamo variklio stiprumo charakteristikas;
4. Remiantis atliktų tyrimų rezultatais suprojektuoti raketinį variklį ir jo gamybos technologiją.

1. Raketinių variklių analizė

1.1. Žalieji raketiniai kurai

Hidrazinas, nepaisant savo patikimumo ir ilgos naudojimo istorijos, yra toksiškas kuras, su kuriuo dirbti pavojinga. Įvykus šio kuro nuotėkiui ar kosminio pritauso avarijai, padaroma didelė ekologinė žala aplinkai ar net žmonėms. Yra žinoma, jog hidrazinas gali sukelti vežinius susirgimus [9]. Dėl šių priežasčių valstybinės bei privačios kosminės organizacijos siekia nustoti naudoti hidraziną, pakeisdamos jį kitomis „žaliomis“ alternatyvomis [1]. Pastaruosius kelis dešimtmečius yra vystomos įvairios žaliosios varos jėgos technologijos, kurios netolimoje ateityje turėtų pakeisti hidraziną, kaip pagrindinį raketinį kurą.

Vienas iš pagrindinių šiomis dienomis aptinkamų hidrazino alternatyvų yra propilenas. Propilenas, tai alkenas su dviguba anglies-anglies nesočiąja jungtimi, kuris yra linkęs labiau chemiškai reaguoti, lyginant su propanu. Ši dviguba jungtis padaro propileną labiau degų nei jo alkano atitinkmuo. Dėl šios priežasties propilenas yra tinkamesnis naudoti kaip raketinis kuras nei propanas. Propilenas pasižymi panašiomis fizinėmis savybėmis kaip propanas. Jų masės tankis bei virimo temperatūra yra panašūs. Propileno ir azoto oksido mišinys kai propilenas yra panaudojamas kaip kuras, kol azoto oksidas kaip oksidatorius, yra sėkmingai pritaikomas Nyderlandų kosminės bendrovės „Dawn Aerospace“. Bendrovė atlieka orbitinius bandymus su šiuo raketiniu kuru nuo 2021 metų [10][14]. Jų gaminami B20 raketiniai varikliai pateikti 1-ame paveiksle.



1 pav. „Dawn Aerospace B20“ raketiniai varikliai [10]

Kiti du galimi raketiniai kurai yra ASCENT bei ADN pagrindo kurai. ASCENT (angl. *Advanced Spacecraft Energetic NonToxic*) kuras buvo sukurtas JAV karinių oro pajėgų remiantis sėkminga patirtimi dirbant su hidroksilamonio nitrato (HAN) pagrindo raketiniais kurais. ASCENT kuras yra vandens, HAN ir higroskopinių kurų mišinys. HAN pagrindo kurai yra potencialūs tiek saugumo, tiek ir pajėgumo sferose. Šis kuras yra apie 50 % tankesnis, masės atžvilgiu, lyginant su hidrazinu. ASCENT HAN raketiniai kurai taip pat pasižymi 5 % didesniu specifiniu impulsu [12].

Amonio dinitramido (ADN) pagrindo raketinio kuro tyrimai prasidėjo Švedijoje dar 1997 metais, bendradarbiaujant kelioms valstybinėms tyrimų organizacijoms. LMP-103S kuro mikstūra buvo sukurta bandant įgyvendinti HPGP programą (angl. *High Performance Green Propulsion*). Šį kurą sudaro 63 % ADN, 18,4 % metanolio, 4,6 % amoniako ir apie 14 % vandens. ADN druska yra

ištirpinama metanolio, vandens ir amoniako mišinyje, kur metanolis atstoja kuro komponentą, vanduo kaip temperatūros reguliatorius ir amoniakas kaip stabilizatorius. LMP-103S pasižymi 6 % didesniu specifiniu impulsu ir 30 % didesniu tankiu, lyginant su hidrazinu [12]. Tyrimai su ADN pagrindu kuru yra atliekami ir Lietuvoje. „Nano Avionics“ ADN raketinio kuro pagrindu buvo sukurta EPSS (angl. *Enabling Propulsion System for Small Satellites*) sistema, kuri pavaizduota 2-ame paveiksle. 2009 metais Vilniuje buvo suprojektuoti pirmieji raketiniai varikliai, kurie veikė pasinaudodami LMP-103S kuru ir 2017 metais sėkmingai išbandyti kosminėje aplinkoje „Lituanicasat 2“ misijos metu. [11][13].



2 pav. Nano Avionics EPSS [11]

Dar viena alternatyva hidrazinu varomai varos jėgos sistemai yra vandens elektrolizės varos jėgos sistema arba WEP (angl. *Water Electrolysis Propulsion*). Ši varos jėgos technologija naudoja vandenį kaip inertinį fluidą. Elektrolizės pagalba, vanduo būtų skaldomas į deguonį ir vandenilį ir tada sudeginamas, šitaip generuojant raketinę trauką. Vanduo pasižymi panašiu masės tankiu, bet didesniu specifiniu impulsu nei hidrazinas. Dideli šios sistemos privalumai yra tai, jog sistemą galima lengvai papildyti kuru ir, kad sistema nereikalauja didelių kuro bakų, jie turi būti tokie pat dideli, kokių reikia norint atlikti didžiausią orbitinį manevrą. Šią sistemą limituoja elektros energijos, skirtos elektrolizei, dydis, nes norint pasigaminti daug kuro gali prireikti skaldyti vandenį ilgą laiką [15]. Dėl šios priežasties, sistema labiau pritaikoma mažuose palydovuose, kurie nereikalauja didelių orbitinių manevrų.

1.2. Vandenilio peroksido privalumai bei trūkumai

Viena seniausių hidrazino alternatyvų yra didelės koncentracijos vandeninio peroksidas, dar žinomas, kaip HTP (angl. *High Test Peroxide*). Vandenilio peroksidas raketinėje technikoje yra naudojamas jau seniai. Antro pasaulinio karo metu, jis buvo panaudotas kaip kuras „Messerschmitt Me 163“ reaktyviniuose lėktuvuose. Po karo vandenilio peroksidas buvo naudojamas reakcijos kontrolei „X-1“ ir „X-15“ raketiniuose lėktuvuose bei „Centaur“ ir „Mercury“ raketose [16]. Didelės koncentracijos vandenilio peroksidas tapo pirmuoju pagrindiniu vienakomponenčiu raketiniu kuru panaudotu raketinėje technikoje. Kiek vėliau HTP buvo pakeistas į hidraziną naudojant vienakomponenčio kuro raketiniuose varikliuose dėl 25 % didesnio specifinio impulso vakuume [17].

Vandenilio peroksidas, tai raketinis kuras, kurį gana sudėtinga pritaikyti praktikoje. Jis yra nestabilus ir lengvai skyla į deguonį bei vandens garą. HTP skilimo reakcija yra egzotermine, o temperatūra daro stiprią įtaką vandenilio peroksido skilimo reakcijos spartai – kuo karštesnis skystis, tuo lengviau

jis skyla. Tai reiškia, jog didelės koncentracijos vandenilio peroksido skilimo reakcija yra savaime greitėjanti. Šios skilimo reakcijos katalizatoriumi gali būti pereinamieji metalai (Fe, Cu, Ag, Co ir kt.) ir daugelis organinių junginių [2]. Dėl savo skilimo produktų, HTP yra stiprus oksidatorius nusileidžiantis tik skystam deguoniui. Tai reiškia, jog vandenilio peroksidas yra ne kriogeninis oksidatorius pasižymintis geromis eksploatacinėmis savybėmis ir turintis skrydžio patirties [18]. Naudojant vandenilio peroksidą tiek kaip kurą, tiek kaip oksidatorių yra pasiekiamas panašus našumas, kaip naudojant hidraziną ir jo junginius.

Dėl šių faktorių vėl yra sparčiai tyrinėjamas, pastaruoju metu didelės koncentracijos vandenilio peroksidas, kaip mažiau toksiška alternatyva hidrazinui. Siekiant, jog kosmoso industrija laikytųsi žaliojo kurso, raketinių variklių, pritaikytų žaliesiems kurams, projektavimas, bandymai bei gamyba yra būtini. Šiuo metu Europoje yra vystomi įvairūs raketinių, vandenilio peroksidu varomų, variklių projektai. Projektai atliekami, valstybiniame, privačiame sektoriuje ir universitetinėje aplinkoje. Keli aktualūs projektai yra vystomi Norvegijos bendrovėje „Nammo“, kur yra gaminamas 220 N traukos raketinio variklio prototipas [19], „Łukasiewicz“ aviacijos institute Lenkijoje, kur yra vystomas 1 N traukos raketinis variklis [20], kuris yra pavaizduotas 3 paveiksle, Ispanijos kosmoso įmonėje „Arkadia Space“, kur taip pat dirbama prie raketinio variklio, kuris gali generuoti 1 N trauką [21]. Panašūs raketinių variklių projektai taip pat yra vystomi ir Delfto technologijos universitete, kur yra projektuojamas 1 N traukos raketinis variklis [22], Milano politechnikos institute, kur taip pat yra vystomas 1 N traukos raketinis variklis [23] ir Padujos universitete, kur vystomas variklis gali generuoti trauką iki 25 N [24].



3 pav. „Łukasiewicz“ aviacijos instituto 1N traukos raketinis variklis [20]

Dauguma šių raketinių variklių projektų yra mažos traukos jėgos. Taip yra todėl, jog šie varikliai būtų tinkami naudoti reakcijos kontrolės sistemoms (RKS) ir orbitinių manevrų atlikimui. Būtent šiose srityse iki šiol ir dominuoja hidrazinu paremtos varos jėgos sistemos. Didesnės traukos varikliai yra mažiau tyrinėjami, dėl vandenilio peroksido gana žemo specifinio impulso (iki 184 s). Tokie raketiniai varikliai dažniausiai naudoja vandenilio peroksidą, kaip oksidatorių.

1.3. Raketinių variklių projektų palyginimas ir tyrimo aktualumas

Apžvelgiant anksčiau minėtus aukštos koncentracijos vandenilio peroksidu varomų raketinių variklių projektus, galima išvelgti daug panašumų. Deja ne visa informacija, reikalinga išsamiam palyginimui, yra viešai prieinama. Atsižvelgiant į projektų panašumus, daroma prielaida, kad visi paminėti raketiniai varikliai turėtų veikti panašiomis arba artimomis eksploatacinėmis sąlygomis.

Paprastai, vandenilio peroksidu varomi vienakomponenčio kuro varikliai turi paprastą, konstrukciją bei nereikalauja sudėtingos kuro padavimo sistemos. Todėl daugiausiai yra dėmesio skiriama vidinės balistikos ir stiprumo skaičiavimams, taikant baigtinių elementų metodą, skaičiuojamąją fluidų dinamiką (CFD) ar kitus, viešai prieinamus skaitinius metodus. Visi ankščiau paminėti universitetuose vykdomi raketinių variklių projektai naudoja viengubą katalizatorių. Atsižvelgiant į generuojamą traukos jėgą, galima daryti prielaidą, jog viengubą katalizatorių turi ir raketinių variklių projektai vystomi „Łukasiewicz“ aviacijos institute Lenkijoje bei Ispanijos kosmoso įmonėje „Arkadia Space“. Tuo tarpu „Nammo“ variklyje greičiausiai yra taikomas dvigubas katalizatorius. Tokia prielaida daroma todėl, kad esant didelei masės tėkmei ir naudojant viengubą didelį katalizatorių kyla rizika ne pilnai suskaidyti vandenilio peroksidą, arba sukelti per didelius slėgio nuostolius pačiame katalizatoriuje. Abiem atvejais, yra sumažėja raketinio variklio našumas. Taikant dvigubo katalizatoriaus konfigūraciją šias problemas galima sumažinti arba išspręsti. Kadangi viešai prieinamoje medžiagoje dvigubų katalizatorių taikymas nėra išsamiai nagrinėjamas, šiame darbe bus kuriamas matematinis vandenilio peroksido skilimo modelis, kuriuo siekiama įvertinti dvigubo katalizatoriaus įtaką cheminei reakcijai ir slėgio nuostoliams. Norint suprojektuoti raketinį variklį, iš pradžių būtina nustatyti tam tikrus pagrindinius reikalavimus, nusakančius variklio veikimo sąlygas, reikalingas medžiagas ir paskirtį. Šių reikalavimų sąrašas yra pateiktas 1 priede.

1.4. Literatūros apžvalgos apibendrinimas

Vandenilio peroksidas kaip raketinis kuras naudojamas jau seniai, tačiau dėl, sąlyginai nedidelės koncentracijos ir kitokių užsakovų prioritetų [2], buvo pakeistas hidrazinu ir jo junginiais. Pastaruoju metu, siekiant atsisakyti hidrazino, dėl jo toksiškumo ir eksploataavimo sunkumų, aukštos koncentracijos vandenilio peroksidas (HTP) sulaukia vis daugiau tyrėjų dėmesio. Aukštos koncentracijos vandenilio peroksidas (> 90%) pasižymi geresnėmis eksploatacinėmis savybėmis nei ankščiau plačiau naudoti žemesnės koncentracijos HTP tirpalai. Vandenilio peroksidas pasižymi ne tik stipriomis oksidacinėmis savybėmis, bet taip pat gali būti naudojamas kaip raketinis kuras vienakomponenčio kuro raketiniuose varikliuose. Atlikus literatūros analizę nustatyta, jog Europoje yra vystomi įvairūs raketinių variklių projektai, kurie naudoja arba numato vandenilio peroksido naudojimą. Nagrinėjant vienakomponenčio kuro raketinius variklius, nustatyta, kad jie taikomi reakcijos kontrolės sistemose ir orbitinių manevrų atlikimui. Dėl šios priežasties projektuojami varikliai pasižymi nedidėle generuojama traukos jėga (nuo 1 N iki 25 N). Tokiuose raketiniuose varikliuose dažniausiai taikomas viengubas katalizatorius. Literatūros analizės metu buvo pastebėta, jog egzistuoja matematinių modelių, apibūdinančių dvigubo katalizatoriaus veikimą, stygius. Todėl šiame darbe atliekamas egzistuojančių vidinės balistikos matematinių modelių pritaikymas dvigubai katalizatoriaus kamerai. Remiantis priede 1 pateiktais kriterijais, projektuojamas raketinio variklio eksperimentinis modelis.

2. Raketinio variklio vidinės balistikos tyrimas

Projektuojamas aukštos koncentracijos vandenilio peroksidu varomo raketinio variklio inžinerinis modelis veikimui atmosferinėmis sąlygomis.

Slėgio kritimas per variklio ilgį – leidžia nustatyti reikiamą slėgį raketinio variklio įleidimo angoje, kad po slėgio kritimo raketinio variklio darbinis slėgis būtų optimalus.

2.1. Pradinės sąlygos

Atsižvelgus į pradinis reikalavimų punktus 1 ir 5, parenkami pradiniai raketinio variklio parametrai. Šie parametrai yra pateikti 1-oje lentelėje.

1 lentelė. Pradiniai parametrai

Parametras [matavimo vienetas]	Dydis
F [N]	20
I_{sp} [s]	160
g_0 [m/s ²]	9,806

Su šiais parametrais atliekamas pirminis raketinio variklio katalizatoriaus kameros projektavimas, naudojant formules 2.1 ir 2.2.

$$F = \dot{m}v_e + A_e[P_e - P_{atm}]; \quad (2.1)$$

čia F – generuojama traukos jėga, N; \dot{m} – kuro masės tėkmė, kg/s; v_e – išmetamų kuro produktų greitis, m/s; A_e – raketinės tūtos galo skerspjūvio plotas, m², P_e – išmetamų degimo produktų slėgis raketinės tūtos gale, Pa; P_{atm} – atmosferos slėgis, Pa.

$$v_e = I_{sp}g_0; \quad (2.2)$$

čia I_{sp} – specifinis impulsas, s; g_0 – laisvojo kritimo pagreitis, m/s²;

Darant prielaidą, jog $P_e = P_{atm}$, 1 formulės antrosios dalies galima nevertinti. Tada įstačius 2 formulę į formulę 1, galima išvesti masės tėkmės formulę 2.3.

$$\dot{m} = \frac{F}{I_{sp}g_0}. \quad (3.2)$$

Norint pradėti projektuoti katalizatoriaus sluoksnį galima pasinaudoti katalizatoriaus sluoksnio apkrova (angl. *catalyst bed loading*). Šis dydis parenkamas pagal panašaus pajėgumo raketinius variklius. Katalizatoriaus sluoksnio apkrovą padalinus iš kuro masės tėkmės galima apskaičiuoti katalizatoriaus sluoksnio skerspjūvio plotą. Tai yra padaroma pasinaudojus formule 2.4.

$$A_{CB} = \frac{L_{CB}}{\dot{m}}; \quad (2.4)$$

čia A_{CB} – katalizatoriaus apvalaus skerspjūvio plotas, m; L_{CB} – katalizatoriaus sluoksnio apkrova, kg/s/m²;

Tada parenkamas katalizatoriaus ilgis, remiantis reikalavimu 16. Parinkus katalizatoriaus ilgį, pasitikrinimui yra apskaičiuojamas t_{ch_fill} , pasinaudojus formule 2.5.

$$t_{ch,fill} = \frac{0,9V_{CB}P_{inlet}M_{mix}}{\dot{m}R_C T}, \quad (2.5)$$

čia $t_{ch,fill}$ – priimtas idealus laiko tarpas, per kurį katalizatoriaus sluoksnis yra užpildomas darbinio fluidu, s; V_{CB} , m³; R_C – universalioji dujų konstanta, J/K · mol; M_{mix} – molinė darbinio fluido masė, kg/mol; T – katalizatoriaus temperatūra, K; P_{inlet} – slėgis paduodamas į įleidimo angą, Pa.

Apskaičiavus $t_{ch,fill}$, galima pradėti prognozuoti raketinio variklio minimalaus impulso laiką, tačiau šioje darbo stadijoje dar nėra žinomas reikalingas slėgis P_{inlet} ir variklio temperatūra T . Šiuos dydžius galima prognozuoti pasinaudojant raketinio variklio vidinės balistikos matematinio modeliu, kuris yra plačiau aprašytas poskyryje 2.2.

2.2. Vidinės balistikos matematinis modelis

Šis modelis yra sudarytas remiantis Koopmans'o ir kitų [27] matematinio modeliu, kuriame yra aprašomas vandenilio peroksido skilimo į vandenį ir deguonį procesas vamzdiniame reaktoriuje [28]. Pasinaudojant šiuo modeliu yra siekiama apskaičiuoti vandenilio peroksido skilimo kameroje vykstančią masės tėkmę, energijos pernašą, temperatūrą ir slėgio kritimą. Matematinis modelis yra pritaikytas prognozuoti vandeninio peroksido skilimo reakciją esant dviem skirtingo akytumo katalizatoriams.

2.2.1. Molių pusiausvyra

Vamzdiniame reaktoriuje, reaguojančios medžiagos yra nuolat suvartojamos joms tekant per reaktoriaus ilgį. Modeliuojant vamzdinį reaktorių yra padaroma prielaida, jog reaguojančių medžiagų koncentracija kinta nuosekliai reaktoriaus ašies kryptimi. Dėl šios priežasties reakcijos greitis, kuris priklauso nuo koncentracijos taip pat kinta ašies atžvilgiu. Bendroji molių pusiausvyros lygtis pateikta žemiau:

$$F_{j0} - F_j + \int^{\Delta V} r_j dV = \frac{dN_j}{dt}, \quad (2.6)$$

čia F_{j0} – medžiagos tėkmė į reaktorių, mol/s; F_j medžiagos tėkmė iš reaktoriaus, mol/s; r_j – medžiagos reakcija, mol/m³ · s; V – tūris, m³; $\frac{dN_j}{dt}$ – medžiagos kaupimosi greitis, mol/s.

Autorius [28] aprašo medžiagos generavimo integralą, kaip diferencialinės dalies kūrimo narį ir išveda formulę 2.7:

$$\int^{\Delta V} r_j dV = r_j \Delta V. \quad (2.7)$$

Nuolat tekančio kuro atveju, nėra medžiagos kaupimosi, todėl lygties 2.6 dydis $\frac{dN_j}{dt}$ yra lygus 0. Tada lygtį 2.7 įtraukus į lygtį 2.6 yra išvedama lygtis 2.8:

$$\frac{F_{j|V+\Delta V} - F_{j|V}}{\Delta V} = r_j. \quad (2.8)$$

Autorius priima prielaidą, jog kuro reakcijos savybės yra identiškos visame vamzdinio reaktoriaus pjūvyje tam tikrame ilgio ruože, todėl reikšmė ΔV artėja prie 0. Tai leidžia dar labiau supaprastinti formulę ir yra išvedama reakcijos formulė 2.9:

$$\frac{dF_j}{dV} = r_j. \quad (2.9)$$

Formulė 2.9 aprašo fluideo tėkmės pokytį per tūrio vieneta, kuris priklauso nuo skilimo reakcijos spartos.

2.2.2. Medžiagos pokytis ir stochiometrija

Autorius [28] siekdamas aprašyti medžiagos pokytį pasirenka vieną medžiagą, kaip bazinę ir susieja visas kitas reakcijoje dalyvaujančias medžiagas su bazine medžiaga. Tai yra padaroma pasinaudojant formule 2.10:



Didžiosios raidės lygtyje 2.10 aprašo chemines medžiagas dalyvaujančias reakcijoje, kol mažosios raidės aprašo stochiometrinius medžiagų koeficientus. Priimant medžiagą A, kaip bazinę, padaliname visų likusių medžiagų koeficientus iš koeficiento a ir gauname formulę 2.11:



Norint aprašyti medžiagos pokytį reakcijos metu, yra naudojamas pokyčio arba konversijos koeficientas. Šis koeficientas yra bedimensinis dydis ir yra aprašomas formule 2.12:

$$X_A = \frac{\text{Sureagavusi medžiaga A}}{\text{Pateikta medžiaga A}}. \quad (2.12)$$

Tiek sureagavusi, tiek ir pateikta medžiaga yra skaičiuojama moliais. Pasinaudojus lygtimi 2.12 galima perrašyti lygtį 2.9 ir išvesti lygtį 2.13:

$$F_{A0} \frac{dX}{dV} = -r_A; \quad (2.13)$$

čia F_{A0} – pradinė medžiagos A tėkmė, mol/s, $\frac{dX}{dV}$ – pokyčio faktoriaus pokytis reaktoriaus tūrio atžvilgiu, $1/m^3$.

Medžiagos tėkmė ir koncentracija, pasak autoriaus [28], gali būti aprašomos pasinaudojant pirmine medžiagos tėkme ir pokyčio koeficientu. Reaguojančios medžiagos A tėkmė yra aprašoma pasinaudojant formule 2.14:

$$F_A = F_{A0}(1 - X). \quad (2.14)$$

Tada medžiagų B, C ir D tėkmės yra apskaičiuojamos pasinaudojant stochiometrinėmis priklausomybėmis, nurodytomis formulėje 2.11 ir kombinuojant jas su formule 2.14. Šiuo būdu yra gaunamos formulės 2.15 ir 2.16:

$$F_B = F_{A0} \left(\frac{F_{B0}}{F_{A0}} - \frac{b}{a} X \right), \quad (2.15)$$

$$F_C = F_{A0} \left(\frac{F_{C0}}{F_{A0}} + \frac{c}{a} X \right); \quad F_D = F_{A0} \left(\frac{F_{D0}}{F_{A0}} + \frac{d}{a} X \right). \quad (2.16)$$

Būtina paminėti, kad medžiagos A ir B yra suvartojamos, kol medžiagos C ir D yra sudaromos. Dėl šios priežasties lygtyse kur yra naudojamos medžiagos A ir B yra panaudojamas „-“ ženklas, kol lygtyse su medžiagomis C ir D naudojamas „+“ ženklas.

Šaltinyje [28], autorius aprašo medžiagos koncentraciją reaktoriuje pasinaudodamas formule 2.17:

$$C_j = \frac{F_j}{v}; \quad (2.17)$$

čia C_j – medžiagos koncentracija reaktoriuje, mol/m³; v – tūrinis medžiagos srautas, m³/s

2.2.3. Vandenilio peroksido skilimo reakcija

Vandenilio peroksidas yra nestabili molekulė, kuri skyla į vandenį ir deguonį. Skilimo reakcijos metu taip pat yra išlaisvinama cheminėse jungtyse sukaupta energija. Vandenilio peroksido skilimo reakcija pateikta reakcijos lygtyje 2.18:



čia ΔH – entalpijos pokytis.

Skilimo reakcija išskiria šilumą, todėl reakcijos lygtyje entalpijos pokytis apibūdina išskirtą energijos kiekį. Koopmans'as savo modelyje išskiria, jog vandenilio peroksidas skyla dviem būdais. Pirmas būdas yra sąveika su katalizatoriumi, o tada peroksidui įkaitus, temperatūriškai [27]. Šiuos procesus autorius aprašo formulėmis 2.19 ir 2.20:

$$\dot{r}_{H_2O_2,S} = A_0 e^{\frac{-E_A}{R_C T}} [H_2O_2] A_{Sl} K_r, \quad (2.19)$$

$$\dot{r}_{H_2O_2,V} = A_0 e^{\frac{-E_A}{R_C T}} [H_2O_2]; \quad (2.20)$$

čia $\dot{r}_{H_2O_2}$ – vandenilio peroksido skilimo sparta, kg/m³ · s; A_0 – ikeksponentinis faktorius, m/s arba 1/s (priklusomai ar reakcija katalitinė ar terminė); E_A – aktyvacijos energija, J/mol; R_C – universalioji dujų konstanta, J/K · mol; T – medžiagos fazės temperatūra, K; $[H_2O_2]$ – molinė vandenilio peroksido koncentracija, mol/m³; A_{Sl} – katalizatoriaus paviršiaus plotas, su kuriuo reaguoja vandenilio peroksidas, m²; K_r – adsorpcijos ir desorpcijos santykis;

Raidė „S“ apibūdina vandenilio peroksido reakciją su katalizatoriaus paviršiumi, tuo tarpu raidė „V“, apibūdina tūrinę reakciją arba skilimą dėka temperatūros.

Norint apskaičiuoti katalizatoriaus paviršiaus plotą su kuriuo reaguoja vandenilio peroksidas, modelio autorius [27] priima prielaidą, jog katalizatoriaus granulės yra apvalaus strypo formos. Šio strypo ilgis L_{rod} yra apskaičiuojamas pasinaudojant formule 2.21:

$$L_{rod} = \frac{\epsilon_s V_{bed}}{\pi (0,5d_p)^2}; \quad (2.21)$$

čia ϵ_s – katalizatoriaus tuštumos santykis; V_{bed} – katalizatoriaus sluoksnio tūris, m³; d_p – apvalaus strypo formos katalizatoriaus granulės skersmuo, m;

Norint apskaičiuoti su vandenilio peroksidu reaguojantį paviršiaus plotą, reikia padauginti apvalaus strypo formos katalizatoriaus granulės paviršiaus plotą iš skysčio ar dujų proporcijos koeficiento. Šitai gaunama formulė 2.22:

$$A_{sl} = 4\epsilon_l \frac{\epsilon_s V_{bed}}{d_p}; \quad A_{sg} = 4\epsilon_g \frac{\epsilon_s V_{bed}}{d_p}; \quad (2.22)$$

čia ϵ_l – katalizatoriaus sluoksnyje esančios skystos medžiagos proporcijos koeficientas; ϵ_g – katalizatoriaus sluoksnyje esančios dujinės medžiagos proporcijos koeficientas;

2.2.4. Temperatūra

Siekiant apskaičiuoti temperatūrą raketinio variklio vandenilio peroksido skilimo kameroje yra remiamasi metodu aprašytu [28] ir paremtu antruoju termodinamikos dėsnio uždaru sistemai.

$$\delta \hat{E} = \delta Q - \delta W. \quad (2.23)$$

Lygtis 2.23 aprašo pilną sistemos energiją, kuri yra lygi šilumos į sistemą patekimui (δQ) ir atliktam darbui (δW). Koopmans'as [27] pritaiko šią lygtį atvirai sistemai įtraukdamas į sistemą patenkančią iš sistemą paliekančią energiją. Energijos pokytį atvirai sistemai apibūdina formulė 2.24:

$$\frac{d\hat{E}_{sys}}{dt} = \dot{Q} + F_{in}E_{in} - \dot{W} - F_{out}E_{out}; \quad (2.24)$$

čia F_{in} ir F_{out} – į sistemą įeinanti bei išeinanti tėkmės, mol/s; E_{in} ir E_{out} – į sistemą patenkanti ir ją paliekanti energijos, J/mol. Energijos išraiška lygtyje 2.24 apima visas energijos formas – kinetinę, potencinę bei vidinę (entalpiją) energijas. Autorius [27] daro prielaidą, jog kinetinės ir potencinės energijų įtaka yra minimali ir jų galima nepaisyti, todėl yra sudaroma lygtis 2.25:

$$\dot{Q} - \dot{W}_s + \sum_{i=1}^n F_{i0}H_{i0} - \sum_{i=1}^n F_i H_i = \frac{d\hat{E}_{sys}}{dt}; \quad (2.25)$$

čia H – entalpija, J/mol. Šiame modelyje yra numatomas adiabatinis procesas, kas reiškia, jog nėra jokios šilumos pernašos iš ir į reaktorių, vadinasi \dot{Q} ir \dot{W} yra lygus 0. Taip pat yra priimama prielaida, jog variklis veiks stabilium režimu, dėl ko $\frac{d\hat{E}_{sys}}{dt}$ taip pat lygus 0. Yra gaunama lygtis 2.26:

$$\sum F_i H_i|_V - \sum F_i H_i|_{V+\Delta V} = 0. \quad (2.26)$$

Priimant jog ΔV artėja į nulį, ir lygtį išplėtus yra sudaroma lygtis 2.27:

$$-\frac{dF_i}{dV} H_i - \sum F_i \frac{dH_i}{dV} = 0. \quad (2.27)$$

Tada lygtis 2.27, autoriaus [27], yra pertvarkoma į lygtį 2.28:

$$\frac{dF_i}{dV} = r_i = -r_A \nu_i; \quad (2.28)$$

čia ν_i – stochiometrinis medžiagos i santykis; r_A – medžiagos reakcijos sparta medžiagai A. Knygoje [27] yra minima, jog medžiagos entalpija yra susijusi su susidarymo entalpija esant tam tikrai temperatūrai, todėl yra sudaroma lygtis 2.29:

$$H_i(T) = H_i^\circ(T_R) + \int_{T_R}^T C_{P_i} dT; \quad (2.29)$$

čia C_P – savitoji šiluminė medžiagos talpa, J/kg · K. Lygtį 2.29 diferencijuojant yra gaunama lygtis 2.30:

$$\frac{dH_i}{dV} = C_{P_i} \frac{dT}{dV}. \quad (2.30)$$

Tada, lygtį 2.28 įstačius į lygtį 2.30 gaunama lygtis 2.31:

$$-\sum -r_A v_i H_i - \sum F_i C_P \frac{dT}{dV} = 0. \quad (2.31)$$

Kadangi dydžių v_i ir H_i sandauga yra lygi reakcijos šilumai ΔH_{Rx} [27], formulę 2.31 galima pertvarkyti ir išvesti temperatūros vandenilio peroksido skilimo kameroje formulę 2.32:

$$\frac{dT}{dV} = \frac{r_A [\Delta H_{Rx}(T)]}{\sum F_i C_{P_i}}. \quad (2.32)$$

Tada autorius [27] pateikia šią reakcijos šilumos lygtį 2.33:

$$\Delta H_{Rx}(T) = \frac{d}{a} H_D(T) + \frac{c}{a} H_C(T) - \frac{b}{a} H_B(T) - H_A(T). \quad (2.33)$$

2.2.5. Slėgio kritimas

Siekiant apskaičiuoti slėgio kritimą aktyvame katalizatoriuje dažnai yra aptinkama Ergun'o lygtis 2.34:

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{G}{\rho D_p} \left(\frac{1-\epsilon_s}{\epsilon_s^3} \right) \left[\frac{150(1-\epsilon_s)\mu}{D_p} + 1,75G \right]; \quad (2.34)$$

čia P – slėgis, kPa; z – katalizatoriaus sluoksnio ilgis, m; G – santykinis masės greitis, $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$; ρ – fluideo tankis, kg/m^3 ; D_p – katalizatoriaus granulės skersmuo, m; ϵ_s – katalizatoriaus tuštumos santykis; μ – fluideo tekantčio per katalizatorių dinaminė klampa, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

Masės srautas pagal nominalų skerspjūvį G yra apskaičiuojamas formule 2.35:

$$G = \rho u; \quad (2.35)$$

čia u – paviršutinis greitis, m/s. Paviršutinis greitis yra apskaičiuojamas pasinaudojant formule 2.36:

$$u = \frac{v}{A}; \quad (2.36)$$

čia v – tūrinis tėkmės greitis, m^3/s ; A – vamzdinio reaktoriaus priekinis paviršiaus plotas, m^2 . Koopmans'as [27] straipsnyje teigia, jog Ergun'o lygtis apskaičiuoja gerokai per dideles slėgio kritimo reikšmes, kai Reynolds'o skaičius yra didelis. Dėl šios priežasties šiame modelyje yra naudojama Tallmadge'o lygtis 2.37:

$$\frac{\Delta P}{L} = K\mu u + \eta \rho^{\frac{5}{6}} u^{\frac{11}{6}} \mu^{\frac{1}{6}}. \quad (2.37)$$

Koeficientai K ir η yra apskaičiuojami formulėmis 2.38 ir 2.39:

$$K = \frac{150}{D_p^2} \frac{\epsilon_s^2}{(1-\epsilon_s)^3}, \quad (2.38)$$

$$\eta = \frac{4,2}{D_p^{\frac{7}{6}}} \frac{\epsilon_s^{\frac{7}{6}}}{(1-\epsilon_s)^3}. \quad (2.39)$$

2.3. Raketinė tūta

Pagrindinė raketinės tūtos paskirtis – paversti kuro degimo produktų slėgio energiją kinetine energija ir taip pasiekti didžiausią įmanomą išmetamų dalelių greitį [29]. Tai yra pasiekama suvienodinant išmetamų degimo produktų slėgį su aplinkos slėgiu. Antroji lygties 1 dalis parodo slėgio įtaką generuojamai raketinei traukos jėgai. Jei tūta nėra optimizuota slėgis turi įtakos raketos generuojamai traukai ir efektyvumui.

Dažniausiai raketinės tūtos yra skirstomos į du pagrindinius tipus – Lavalio ir oro pleišto formos. Šiame darbe nagrinėjamos Lavalio raketinės tūtos. Raketinės Lavalio tūtos gali būti dviejų tipų – kūginės ir varpo formos. Kūginės tūtos yra paprasčiausios, jos plėtėja tolygiai. Dėl to šios tūtos pasižymi didesniu ilgiu ir mase. Tuo tarpu, varpo formos Lavalio tūtos yra trumpesnės už kūginės, tačiau dėl sudėtingesnės geometrijos jas sunkiau pagaminti.

Šiame darbe raketinė tūta yra projektuojama remiantis metodu nurodytu [30]. Modelis apima optimalios raketinės tūtos formą apibūdinamas tiek siaurėjančią (konverguojančią) tiek ir plėtėjančią (diverguojančią) tūtos zonas.

2.3.1. Tūtos pagrindinių parametru skaičiavimas

Pagrindiniai raketinės tūtos parametrai yra kaklelio plotas, tūtos pabaigos plotas ir visos tūtos ilgis. Tūtos kaklelio matmenys apskaičiuojami Nakka'os aprašytu metodu [31]. Raketinės traukos lygtį 2.1 perrašius atsižvelgiant į masės tvermę yra gaunama formulė 2.40:

$$F = \rho^* A^* v^* v_e + (P_e - P_a) A_e; \quad (2.40)$$

čia F – generuojama raketinė trauka, N; ρ^* – degimo produktų tankis, kg/m^3 ; A^* – raketinės tūtos kaklelio skerspjūvio plotas, m^2 ; v^* – kritinis srauto tėkmės greitis, m/s ; v_e – degimo produktų tėkmės greitis raketinės tūtos gale, m/s ; P_e – raketinės tūtos gale esantis išmetamų degimo produktų slėgis, Pa; P_a – aplinkos slėgis, Pa; A_e – raketinės tūtos galo skerspjūvio plotas, m^2 . Autorius [31] perrašo raketinės traukos lygtį, pasinaudodamas priklausomybėmis iš [29] ir išveda formulę 2.41:

$$F = A^* P_0 \sqrt{\frac{2k^2}{k-1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} + (P_e - P_a) A_e; \quad (2.41)$$

čia P_0 – degimo kameros slėgis, Pa; k – efektyvus išmetamųjų produktų savitosios šilumos santykis. Darant prielaidą, jog $P_e = P_a$, galima pertvarkyti lygtį 2.41 ir išvesti formulę 2.42, skirtą apskaičiuoti raketinės tūtos kaklelio plotui:

$$A^* = \frac{F}{P_0 \sqrt{\frac{2k^2}{k-1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}}. \quad (2.42)$$

Raketinės tūtos pabaigos plotą galima apskaičiuoti naudojantis priklausomybe [29]:

$$\frac{A^*}{A_e} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \left(\frac{P_a}{P_0}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\left(\frac{k+1}{k-1}\right) \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}. \quad (2.43)$$

Lygtį 2.43 pertvarkius, gaunama formulė 2.44:

$$A_e = \frac{A^*}{\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \left(\frac{P_a}{P_0}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\left(\frac{k+1}{k-1}\right) \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}}. \quad (2.44)$$

Raketinės tūtos kaklelio ir išėjimo plotų santykis yra vadinamas optimaliu išsiplėtimo santykiu [29]. Šis santykis apskaičiuojamas formule 2.45:

$$\epsilon = \frac{A_e}{A^*}. \quad (2.45)$$

Apskaičiavus raketinės tūtos išsiplėtimo santykį, galima apskaičiuoti kūginės raketinės tūtos ilgį L_N pasinaudojant formule 2.46 [30]:

$$L_N = \frac{(\sqrt{\epsilon}-1)r_t}{tg15^\circ}, \quad (2.46)$$

čia r_t – raketinės tūtos kaklelio spindulys, m;

2.3.2. Konverguojanti (siaurėjanti) zona

Nustačius raketinės tūtos kaklelio plotą, grafiškai nubraižoma tūtos kaklelio forma. Ši forma apima siaurėjančią raketinio variklio dalį bei nedidelį platėjančios zonos ruožą. Pasak autoriaus [30], konverguojančią raketinės tūtos dalį sudaro kreivės, kurios yra aprašomos trigonometrinėmis priklausomybėmis, kai siauriausias tūtos ruožas yra laikomas koordinačių centru. Lygtys aprašančios siaurėjančią tūtos kaklelio dalį yra:

$$x = 1,5 \cdot r_t \cdot \cos\theta, \quad (2.47)$$

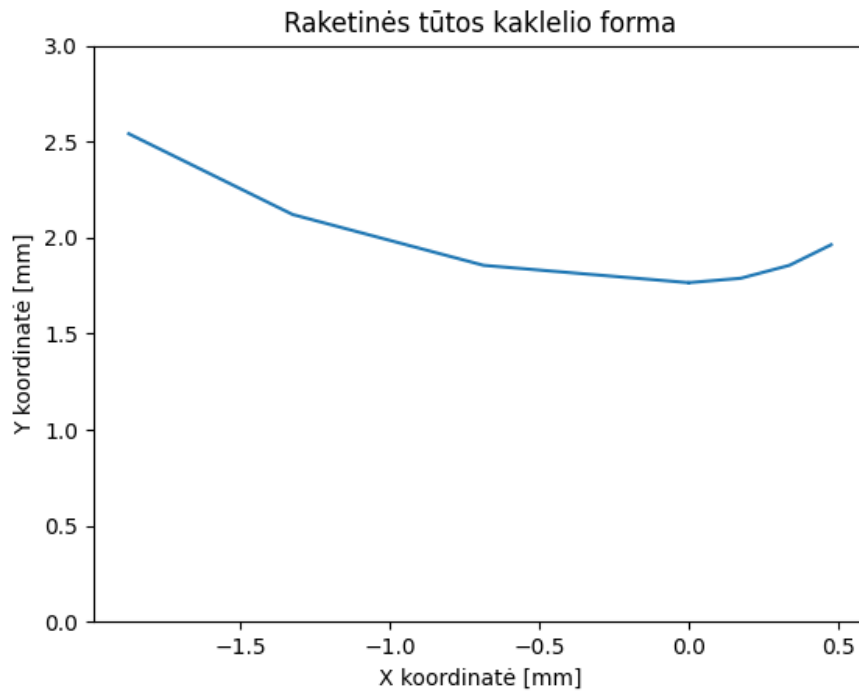
$$y = 1,5 \cdot r_t \cdot \sin\theta + 1,5r_t + r_t; \quad (2.48)$$

čia θ – pradinis kampas, $-135^\circ \leq \theta \leq -90^\circ$. Kampo reikšmė -135° yra tipinė [30]. Tada yra aprašoma platėjanti tūtos kaklelio dalis. Tai yra padaroma pasinaudojant šiomis koordinačių formulėmis 2.49 ir 2.50:

$$x = 0,382 \cdot r_t \cdot \cos\theta, \quad (2.49)$$

$$y = 0,382 \cdot r_t \cdot \sin\theta + 0,382 \cdot r_t + r_t; \quad (2.50)$$

čia θ yra $-90^\circ \leq \theta \leq (\theta_n - 90^\circ)$. Apskaičiavus koordinates, yra nubraižomas raketinės tūtos kaklelio grafikas pateiktas 4 paveiksle.



4 pav. Raketinės tūtos kaklelio formos grafikas

2.3.3. Diverguojanti (platėjanti) zona

Varpo formos raketinės tūtos yra trumpesnės nei kūginės, tačiau pasižymi panašiomis aerodinaminėmis savybėmis. Dažniausiai naudojamos varpo formos tūtos, kurių ilgis sudaro apie 80 % kūginės tūtos ilgio [30]. Tokių tūtų ilgis L_N yra apskaičiuojamas formule 2.51:

$$L_N = 0,8 \frac{(\sqrt{\epsilon}-1)r_t}{tg15^\circ}. \quad (2.51)$$

Varpo formos tūtos yra aprašomos kvadratinėmis Bežjė kreivėmis. Kreivių lygtys 2.52 ir 2.53 yra aprašomos trimis taškais, N, Q ir E, kai $0 \leq t \leq 1$, kurie yra pavaizduoti 5 paveiksle.

$$x(t) = (1-t)^2 N_x + 2(1-t)t Q_x + t^2 E_x, \quad (2.52)$$

$$y(t) = (1-t)^2 N_y + 2(1-t)t Q_y + t^2 E_y. \quad (2.53)$$

Taškas N yra aprašomas lygtimis 2.49 ir 2.50, kai kampas θ_n yra lygus 90° . Taško E_x koordinatė apskaičiuojama naudojant lygtį 2.51, o taškas E_y koordinatė nustatoma pagal raketinės tūtos galo spindulį r_e . Taškas Q yra tiesių \overline{NQ} ir \overline{QE} susikirtimo taškas. Šios tiesės yra aprašomos lygtimis 2.54 ir 2.55:

$$\overline{NQ} = m_1 x + C_1, \quad (2.54)$$

$$\overline{QE} = m_2 x + C_2; \quad (2.55)$$

čia gradientai:

$$m_1 = tg\theta_n; \quad m_2 = tg\theta_e \quad (2.56)$$

ir susikirtimai:

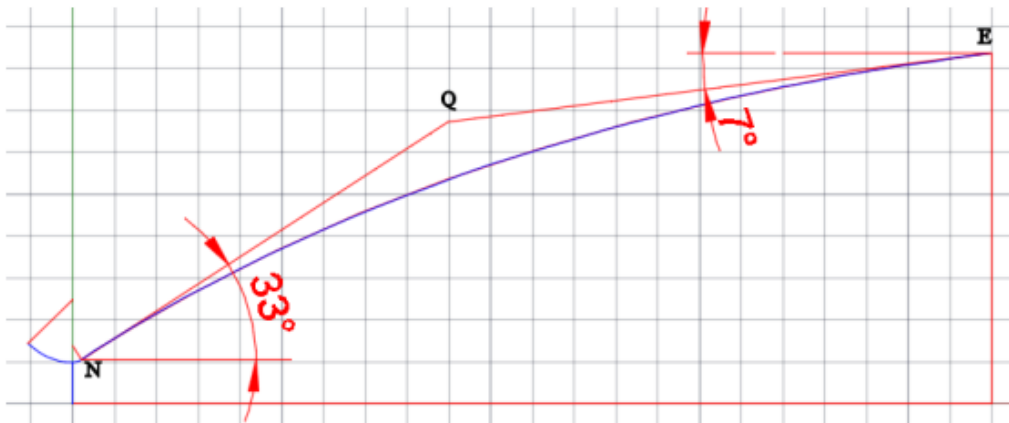
$$C_1 = N_y - m_1 N_x, \quad C_2 = E_y - m_2 E_x. \quad (2.57)$$

Tiesių \overline{NQ} ir \overline{QE} susikirtimo taškas Q yra aprašomas lygtimis 2.58 ir 2.59:

$$Q_x = \frac{(C_2 - C_1)}{(m_1 - m_2)}, \quad (2.58)$$

$$Q_y = \frac{(m_1 C_2 - m_2 C_1)}{(m_1 - m_2)}. \quad (2.59)$$

Nustačius taškus N, E ir Q yra išvedamos tiesės NQ ir QE. Remiantis šiomis tiesėmis nubraižoma Bežjė kreivė, kuri apibūdina projektuojamą raketinės tūtos formą. Bežjė kreivės pavyzdys yra pateiktas 5 paveiksle.



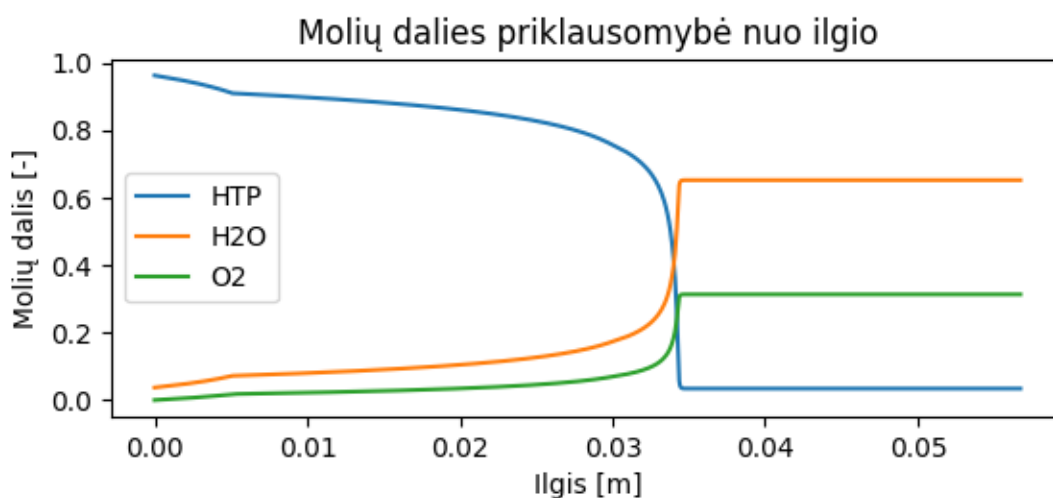
5 pav. Raketinės tūtos Bežjė kreivės taškų N, Q ir E vaizdas [30]

2.4. Matematinio modelio rezultatai

Remiantis 2.2 poskyryje pateiktu metodu, *Python* programavimo kalbos pagrindu buvo vykdomas matematinio modelio pritaikymas. Susidūrus su pritaikymo iššūkiais, buvo kreiptasi į panašaus modelio autorių Franken'ą [22]. Gavus autoriaus leidimą, jo matematinis modelis buvo modifikuotas bei pritaikytas naudoti šiame darbe. Matematinio modelio kodas yra pateiktas 2-ame priede. Modelis buvo modifikuotas pritaikant jį didesnės generuojamos traukos bei dvigubo katalizatoriaus atveju. Atliekant skaitinį modeliavimą buvo analizuojamas vandenilio peroksido skilimas, šios reakcijos metu išskirta šiluma bei slėgio kritimas per katalizatoriaus sluoksnius. Tarp katalizatoriaus sluoksnių esanti pertvara, buvo vertinama, kaip papildomas slėgio kritimas. Pertvaros įtaka skilimo reakcijai vertinama nebuvo. Siekiant kuo mažesnių slėgio nuostolių bei pilno vandenilio peroksido skilimo, matematinio modelio pagalba buvo įvertinta skirtingų dydžių katalizatoriaus sluoksnių įtaka rezultatams. Buvo nuspręsta, jog pirmas katalizatoriaus sluoksniu yra 10 % viso katalizatoriaus ilgio. Skaitinio modeliavimo metu buvo nustatyta, jog, stabiliomis sąlygomis, visas į vandenilio peroksido skilimo kamerą patekęs vandenilio peroksidas, turėtų pilnai suskilti ties katalizatoriaus sluoksniu viduriu. Skilimo reakcijos metu, didžiausia susidariusi temperatūra yra 925,5 K (652,35 °C). Per katalizatoriaus pertvaros ilgį slėgio kritimas yra 16210 Pa. Skilimo reakcijos produktų molių dalies, temperatūros bei slėgio kritimo rezultatai per katalizatoriaus ilgį yra pateikiami grafiškai.

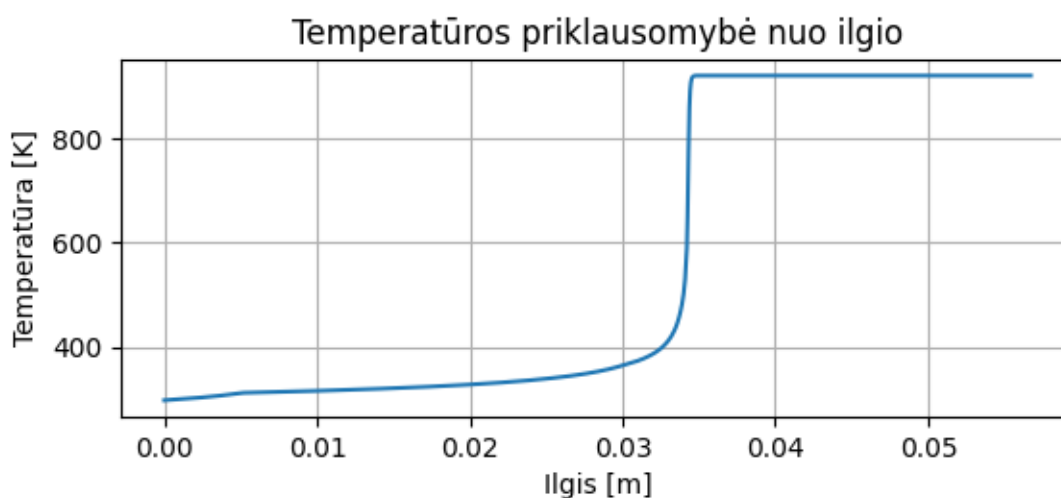
Molių dalies priklausomybės nuo katalizatoriaus ilgio grafike (6 paveikslas) yra matoma, jog vandenilio peroksidui skylant, didėja vandens bei deguonies molių skaičius. Vandenilio peroksidas pradeda skilti pirmame katalizatoriuje sparčiau, tada pereinama į antrą katalizatorių, kuriame

skylimas sulėtėja. Vandenilio peroksidas įkaista tiek, jog toliau pradeda skilti temperatūriškai ir grafike matomas staigus vandenilio peroksido molių kiekio kritimas. Analogiškai, vandens bei deguonies molių skaičius pradeda sparčiai augti. Vandenilio peroksidui pilnai suskilus, deguonies bei vandens molių skaičius nebekinta.



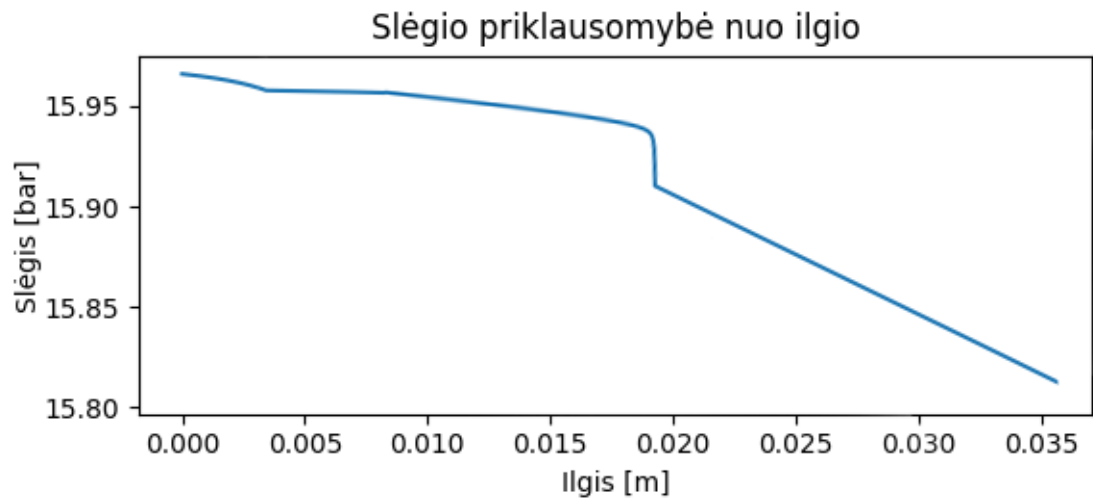
6 pav. Skilimo reakcijos produktų molių dalies priklausomybės nuo katalizatoriaus ilgio grafikas

7-ame paveiksle yra vaizduojama temperatūros priklausomybė nuo katalizatoriaus ilgio. Vaizde matoma, jog vandenilio peroksidas skyla lėtai ir išskiria vis daugiau šilumos iki kol yra pasiekama kritinė temperatūra. Tada vandenilio peroksidas pradeda sparčiai skilti išskirdamas dar daugiau šilumos. Temperatūra kyla iki kol visas vandenilio peroksidas yra suskaldomas, tada temperatūra stabilizuojasi ir nekinta iki katalizatoriaus galo.



7 pav. Temperatūros priklausomybės nuo katalizatoriaus ilgio grafikas

Slėgio kritimo priklausomybės nuo katalizatoriaus ilgio grafike, kuris pavaizduotas 8 paveiksle, yra matoma, jog kol, daugiausia skystos būsenos, vandenilio peroksidas teka per pirmąjį katalizatorių, slėgio kritimas yra kiek spartesnis, lyginant su slėgio kritimu per antrąjį katalizatorių. Darbiniam fluidui pereinant per katalizatoriaus pertvarą, yra papildomai pridedamas nedidelis slėgio kritimas. Kai vandenilio peroksidas pasiekia kritinę temperatūrą, sparčiai kintanti fluido medžiagos agregatinė būsena sukelia gana spartų slėgio kritimą iki kol vandenilio peroksidas skyla pilnai. Skilimo reakcijos metu įgreitintos dujos patiria didesnę slėgio kritimą per likusį katalizatorių.



8 pav. Slėgio kritimo priklausomybės nuo katalizatoriaus ilgio grafikas

Matematinio modelio rezultatai yra panašūs į rezultatus gautus darbe atliktame Koopmans'o ir kt. [27]. Siekiant įsitikinti, jog gauti rezultatai yra visiškai teisingi, modelį reikėtų patikrinti realių bandymų metu. Remiantis gautais vandenilio peroksido skilimo matematinio modelio rezultatais, yra toliau projektuojamas raketinis variklis.

3. Raketinio variklio projektavimas

Atlikus vidinės balistikos skaitinį modeliavimą, galima sudaryti bazinį projektuojamo raketinio variklio modelį. Šis procesas apima reikiamų medžiagų bei komponentų, tokių, kaip vožtuvai ir kuro padavimo vamzdeliai, parinkimą. Taip pat būtina suprojektuoti raketinio variklio purkštuką ir katalizatoriaus pertvaras.

3.1. Struktūrinės medžiagos

Parenkant medžiagas raketinio variklio struktūrai būtina atsižvelgti į užsibrėžtus reikalavimus 2, 6, 7, 8, 9 ir 10. Parinktos medžiagos privalo būti suderinamos su aukštos koncentracijos vandenilio peroksidu ir atlaikyti slėgio ir temperatūros apkrovas.

Pagal suderinamumą su aukštos koncentracijos vandenilio peroksidu medžiagos yra skirstomos į keturias klases:

- 1 klasė – apima medžiagas, kurios yra visiškai suderinamos su vandenilio peroksidu ir neturi jokių katalitinių efektų peroksidui.
- 2 klasė – apima medžiagas, kurios yra tinkamos pakartotiniam trumpam sąlyčiui su vandenilio peroksidu (pvz. 4 valandos 344 K temperatūroje arba iki savaitės 294 K temperatūroje).
- 3 klasė – apima medžiagas, kurios yra tinkamos tik trumpam kontaktui, tokiam kaip 1 minutė prie 344 K temperatūros arba 1 valanda prie 294 K temperatūros.
- 4 klasė – apima medžiagas, kurių naudoti kartu su vandenilio peroksidu yra nerekomenduojama [32].

Medžiagų suderinamumui įtakos daro ir kiti faktoriai, tokie kaip medžiagos paviršiaus apdirbimas bei švara. Visos medžiagos turi būti pasyvuojamos prieš jas naudojant su aukštos koncentracijos vandenilio peroksidu [32].

Vandenilio peroksidas pasižymi cheminiu suderinamumu su įvairiomis polimerinėmis medžiagomis bei tam tikrais metalais. Tinkamų medžiagų sąrašą sutrumpina reikalavimas 8. Didžiausias slėgis, kurį turi atlaikyti raketinis variklis turi siekti 62,5 baro. Dėl šios priežasties plastikai pasidaro nepraktiški struktūrinėms detalėms, tačiau išlieka naudingi sandarinimo elementams. Remiantis 2 skyriuje aprašytu matematiniu modeliu nustatyta, kad projektuojamo raketinio variklio temperatūra gali siekti iki 1000 K. Dėl šios priežasties aliuminis tampa netinkamas projektuojamam raketiniam varikliui.

Pasak *Industrial Specialties Mfg* organizacijos su vandenilio peroksidu suderinamos medžiagos yra nikelio lydiniai ir kai kurie plienai [33]. Šios medžiagos taip pat gali atlaikyti temperatūros bei struktūrinių apkrovų įtaką. Tolimesnėje darbo dalyje bus analizuojamas nikelio lydinys *Inconel 718* bei nerūdijantis plienas AISI-316.

3.2. Impulsiniai vožtuvai

3.2.1. Vožtuvų parinkimas

Raketinio variklio vožtuvai kontroliuoja kuro padavimą į raketinį variklį, bet taip pat ir neleidžia kurui tekėti atgal į kuro padavimo sistemą. Vožtuvo parinkimą įtakoja raketinio variklio reikalavimai 1, 3, 12, 13, 14, 15, 16 ir 17. Vožtuvas turi būti greitos reakcijos bei būti valdomas nuotoliu. Šiems reikalavimams išpildyti labiausiai tinka impulsiniai solenoidiniai vožtuvai. Parinktas vožtuvas taip

pat privalo būti pagamintas iš medžiagų, kurios yra suderinamos su aukštos koncentracijos vandenilio peroksidu. Norint užtikrinti, jog raketinis variklis geba generuoti 20 N raketinę trauką, pasak 3 formulės vožtuvas turi atlaikyti 0,0127 kg/s masės tėkmę. Vožtuvas taip pat turi atlaikyti visas slėgio apkrovas. Parinkto vožtuvo užpildymo tūris turi būti kuo mažesnis.

Atlikus panašių impulsinių vožtuvų paiešką internete, buvo surasti 4 skirtingi vožtuvai.

„Parker Pulse valve“ yra greito veikimo impulsinis vožtuvas, pasižymintis dideliu greičiu, itin maža nuotėkio sparta, dideliu pratekėjimo srautu ir gebėjimu dirbti aukštoje temperatūroje. Šis vožtuvas geba atlikti daug darbinį ciklų ir yra pagamintas iš nekoroduojančio, pasyvuoto nerūdijančio plieno [34]. Vožtuvo vaizdas pateiktas 9 paveiksle.



9 pav. „Parker Pulse valve“ impulsinis vožtuvas [34]

Pasak kompanijos „Parker“ šis vožtuvas yra vienas mažiausių vožtuvų savo klasėje ir pasižymi mažesniu nei 2 ms atsako greičiu. Vožtuvui yra atliktas 100 % sandarumo patikrinimas naudojant $1 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{sek}/\text{atm}$ helį. Aplinkos temperatūrai siekiant iki 105 °C „Parker“ garantuoja 100 % darbo ciklų. Šis vožtuvas gali atlaikyti darbinį slėgį iki 86,2 baro bei atitinka RoHS reikalavimus [34].

VZWD-B tiesioginio veikimo solenoidinis vožtuvas yra idealus sprendimas aukšto slėgio ir matavimo reikmėms. Jis patikimai veikia be slėgio skirtumo iki 100 barų, net ir uždaroje terpės grandinėse. Šis vožtuvas pasižymi plačiu slėgio diapazonu lanksčioms reikmėms. Vožtuvas yra patikimas ir gali būti naudojamas su vakuuminėmis technologijomis. Vožtuvas VZWD-B pasižymi dideliu terpės temperatūros diapazonu iki 140 °C.

Anot kompanijos „Festo“ Tiesiogiai valdomi solenoidiniai vožtuvai VZWD-B yra daugiausia skirti naudoti esant dideliame slėgio diapazonui ir mažam srautui. Tiesiogiai valdomi vožtuvai sandarinimo komponentą perjungia tiesiogiai per solenoidinę sistemą. Uždarymo spyruoklė, palaikoma terpės slėgio, laiko vožtuvą uždarytą. Funkcija priklauso nuo lizdo dydžio, efektyvaus darbinio slėgio ir magnetinės jėgos.

P7129 2/2 krypčių aukšto slėgio solenoidinis vožtuvas yra naudojamas pilotiniam slėgiui, uždarymo vožtuvui, vandenilio bakams, rūko generatoriui, mėginių ėmimui [36]. Viešai prieinamos informacijos apie šį vožtuvą nėra daug, tačiau vožtuvas yra pagamintas iš nerūdijančio plieno ir geba atlaikyti aukštesnį slėgį nei kiti vožtuvai šiame sąraše.

„Series 99“ solenoidiniai vožtuvai yra mažų matmenų bei suteikia išskirtinį potencialą tiksliai valdyti dujas. Jie pasižymi dideliu greičiu, itin maža nuotėkio sparta, dideliu pratekėjimo srautu ir atsparumu aukštai temperatūrai. Šis tvirtas vožtuvas veikia itin tiksliai ir yra pagamintas iš nekoroduojančio, pasyvuoto nerūdijančio plieno. „Series 99“ ritės yra skirtos nuolatiniam darbui ir yra sandariai uždarytos, kad būtų apsaugotos nuo aplinkos poveikio [37].

Pasak kompanijos „Parker“ šis vožtuvas yra vienas mažiausių vožtuvų savo klasėje ir sugeba atlikti 100 % darbo ciklą, kai aplinkos temperatūra siekia iki 105 °C. Vožtuvas pasižymi didelės spartos atsako trukme, kuri yra mažesnė nei 6 ms. Vožtuvui yra atliktas 100 % sandarumo patikrinimas naudojant $1 \cdot 10^{-8}$ cm³/sek/atm helį. Šis vožtuvas gali atlaikyti darbinį slėgį iki 86,2 baro. Kompanija „Parker“ garantuoja įvairias galimas vožtuvo konfigūracijas, leidžiančias dirbti su korozinėmis dujomis. Vožtuvas veikia be angliavandenilių ir tepalų ir atitinka RoHS reikalavimus [37].

Visi viešai prieinami aptartų impulsinių vožtuvų duomenys yra bendrai pateikiami 2 lentelėje.

2 lentelė. Potencialių vožtuvų pasirinkimai

	Parker Pulse Valve [34]	FESTO Solenoid valve VZWD-B [35]	Gevasol Fluid Control P7129 [36]	Parker Series 99 Miniature Gas Control Valve [37]
Atvėrimo laikas	<2 ms	8 ms	Nėra informacijos	<6 ms
Užvėrimo laikas	<2 ms	25 ms	Nėra informacijos	< 6 ms
Tėkmės greitis	0,002 m ³ /s	0,04 m ³ /s	$1,6 \cdot 10^{-5}$ m ³ /s	0,002 m ³ /s
Didžiausias darbinis slėgis	86,2 bar	100 bar	160 bar	86,2 bar
Nuotėkio sparta	$1 \cdot 10^{-7}$ atm cm ³ /sec Helio	Nėra informacijos	Nėra informacijos	$1 \cdot 10^{-8}$ atm cm ³ /sec Helio
Sujungimo rūšis	A-LOK® <i>compression fitting</i>	G ir NPT	Tiesioginis apatinio paviršiaus prijungimas	A-LOK® <i>compression fitting</i>
Sujungimo dydis	1/4" (6,35 mm)	1/4" ir 1/8"	Nėra informacijos	1/4" (6,35 mm)
Mažiausia darbinė temperatūra	4 °C	-10 °C	-15 °C	4 °C
Didžiausia darbinė temperatūra	105 °C	140 °C	70 °C	105 °C
Korpuso medžiaga	AISI-316 Nerūdijantis plienas	Nerūdijantis plienas	AISI-316 Nerūdijantis plienas	AISI-316 Nerūdijantis plienas
Sandaravimo medžiaga	FFKM & PTFE, FFKM & Vespel	FPM	PU, EPDM	FFKM & PTFE, FFKM & Vespel
Darbinis srovės stipris	20V - 28V DC	24V DC	24V DC	12V – 24 V DC
Masė	79,4 g	360 g	Nėra informacijos	88,9 g
Kilmės šalis	JAV	Vokietija	Nyderlandai	JAV

Visi aptarti vožtuvai atitinka reikalavimus 1, 3, 12 ir 16. Pagal reikalavimą nr. 14, „Gevasol“ P7129 vožtuvas netinka dėl sandarinimo medžiagos EPDM. Eteno-propileno-dieno monomero guma nėra suderinama su aukštos koncentracijos vandenilio peroksidu. Reikalavimas 16, eliminuoja kompanijos „Festo“ VZWD-B vožtuvą dėl gana lėto uždarymo laiko. Lyginant kompanijos „Parker“ vožtuvus, „Parker Pulse Valve“ pasižymi mažesniais matmenimis, todėl šio vožtuvo užpildymo tūris yra mažiausias. Šis paskutinis faktorius ir įtakoja, jog pasirenkamas „Parker Pulse Valve“ impulsinis vožtuvas.

3.2.2. Slėgio kritimas

Pasirinkto vožtuvo gamintojas neprideda informacijos apie slėgio kritimą per vožtuvo ilgį, tačiau galima nustatyti apytikslę reikšmę pasinaudojant EKA sukurtu metodu, paremtu eksperimentiniais

duomenimis. Metodas yra aprašytas T. Franken'o magistro baigiamajame darbe [22]. Metodo autorius padaro prielaidą, jog nepaisant per vožtuvą tekančios medžiagos, Reynolds'o skaičius išlieka toks pat:

$$Re_{H_2O_2} = Re_{H_2O}. \quad (3.1)$$

Darant prielaidą, jog vožtuvo vidinė ertmė yra vamzdelio formos, išvedama formulė 3.2:

$$\frac{\rho_{H_2O_2} v_{H_2O_2} D}{\mu_{H_2O_2}} = \frac{\rho_{H_2O} v_{H_2O} D}{\mu_{H_2O}}, \quad (3.2)$$

čia ρ – medžiagos tankis, kg/m^3 ; v – tekančios medžiagos greitis, m/s ; D – vamzdelio skersmuo, m ; μ – medžiagos dinaminė klampa, $\text{Pa}\cdot\text{s}$. Tekančios medžiagos greitį galima išreikšti formule 3.3 [38]:

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A}; \quad (3.3)$$

čia \dot{m} – masės tėkmė, kg/s ; A – vamzdelio apvalaus skerspjūvio plotas, m^2 . Lygtį 3.3 įstačius į lygtį 3.2, galima išvesti formulę 3.4:

$$\frac{\dot{m}_{H_2O_2}}{\mu_{H_2O_2}} = \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\mu_{H_2O}}. \quad (3.4)$$

Slėgio kritimas vožtuve gali būti apskaičiuotas pasinaudojant formule 3.5 [38]:

$$\Delta P = K \frac{\rho v^b}{2}; \quad (3.5)$$

čia ΔP – slėgio kritimas, Pa ; K – eksperimentiškai nustatomas slėgio kritimo koeficientas; b – pasak Idelčiko [38], turi būti lygus 2, tačiau pasak metodo autoriaus [22], šis dydis gali būti keičiamas siekiant gauti kuo artimesnius rezultatus lyginant su eksperimentais. Pasak EKA atliktų eksperimentų, šis dydis b yra lygus 1,5815 [22]. Lygtį 3.5 perrašius ir vandeniui ir vandenilio peroksidui ir padalinus vieną iš kito, gauname lygtį 3.6:

$$\frac{\Delta P_{H_2O_2}}{\Delta P_{H_2O}} = \frac{\rho_{H_2O_2}}{\rho_{H_2O}} \cdot \left(\frac{v_{H_2O_2}}{v_{H_2O}} \right)^b. \quad (3.6)$$

Lygtį 3.4 įtraukus į lygtį 3.6 ir pertvarkius lygties elementus, galima išvesti slėgio kritimo vandenilio peroksidui lygtį 3.7:

$$\Delta P_{H_2O_2} = \Delta P_{H_2O} \cdot \left(\frac{\mu_{H_2O_2}}{\mu_{H_2O}} \right)^b \cdot \left(\frac{\rho_{H_2O_2}}{\rho_{H_2O}} \right)^{b-1}. \quad (3.7)$$

Pasak EKA atliktų bandymų, masės tėkmei \dot{m} esant $0,0127 \text{ kg/s}$, ΔP_{H_2O} yra $13,29 \text{ bar}$.

Apskaičiuota, jog numatomas slėgio kritimas vožtuve naudojant vandenilio peroksidą $\Delta P_{H_2O_2}$ yra $23,28 \text{ bar}$.

3.3. Kapiliariniai vamzdeliai

3.3.1. Kapiliarinio vamzdelio dydžio nustatymas

Kapiliariniai vamzdeliai raketiniame variklyje atlieka dvi pagrindines funkcijas – perneša kurą iš vožtuvo į purkštuką ir, kartu su šilumos atrama, užtikrina atstumą, kad vandenilio peroksido skilimo kameroje sugeneruota šiluma nepasiektų kuro padavimo vožtuvo. Abi šios paskirtys turi įtakos koks kapiliarinis vamzdelis turi būti parinktas. Vamzdelis negali būti per trumpas, nes tada raketinio variklio reikalavimai 18 ir 20 gali būti pažeisti. Vamzdelis negali būti ir per ilgas, nes tokiu atveju raketinio kuro padavimas į purkštuką užtruks per ilgai ir bus pažeistas reikalavimas 16. Ilgesnis vamzdelis taip pat prisideda ir prie slėgio kritimo. Kapiliarinio vamzdelio skersmuo irgi turi būti parinktas tinkamai. Per didelis vamzdelis neužtikrins tinkamo kuro tekėjimo greičio, kol per mažas vamzdelis sukels didelį slėgio kritimą.

Vamzdelis turi būti pakankamai stiprus atlaikyti reikiamas slėgio bei temperatūros apkrovas ir turi būti pagamintas iš medžiagos, kuri yra suderinama su vandenilio peroksidu. Šiuos reikalavimus išpildyti gali JAV bendrovės „Swagelok“ siūlomi vamzdeliai [40]. Siekiant užtikrinti, jog būtų išpildytas reikalavimas 24, projektuojant raketinį variklį bus naudojami „Swagelok“ mechaniniai sujungimai. Šios įmonės sujungimai yra naudojami Europos kosmoso agentūroje, dėl savo gerų sandarumo, suderinamumo bei stiprumo savybių.

Projektuojamam raketiniam varikliui tinka „Swagelok“ 1/8“ ir 1/16“ išorinio skersmens plieniniai vamzdeliai. Pasinaudojus formule 3.8, yra apskaičiuojamas kuro tėkmės greitis per vamzdelį.

$$v_{flow} = \frac{\dot{m}}{\rho_{H_2O_2} n A_{tb}}; \quad (3.8)$$

čia n – vamzdelių skaičius, vnt.; A_{tb} – vidinis vamzdelio apvalaus skerspjūvio plotas, m^2 .

Tada pasinaudojant formule 3.9, yra apskaičiuojamas Reynolds'o skaičius vamzdelyje.

$$Re = \frac{\rho v D_{tb}}{\mu}. \quad (3.9)$$

čia ρ – tekančio fluideo tankis, kg/m^3 ; v – tekančio fluideo greitis, m/s ; D_{tb} – vamzdelio vidinis skersmuo, m ; μ – tekančio fluideo klampa, $Pa \cdot s$.

Tekantis srautas turi būti turbulentinis ($Re > 3500$), nes didesnis Reynolds'o skaičius pagerina kuro atomizaciją, kas yra svarbu projektuojant purkštuką [45]. Minimali Reynolds'o skaičiaus reikšmė, duoda minimalų galimą vandenilio peroksido tėkmės greitį. Vandenilio peroksido srauto greičiui užtikrinti reikia parinkti tinkamą vamzdelio vidinį skersmenį. Pagal norimus Reynolds'o skaičiaus režius buvo palyginti keli skirtingi 1/8“ ir 1/16“ išorinio skersmens plieniniai vamzdeliai. Apskaičiavus kuro srauto greičius buvo priimta, jog 1/16“ išorinio skersmens vamzdeliai užtikrina tinkamą srauto greitį. „Swagelok“ siūlo keturių skirtingo storio sienelių vamzdelius [40]. Norimas srauto greičių ruožas yra pasiekiamas, kai sienelės storis yra 0,014“. Išlaikant masės tėkmę, maksimalus tėkmės greitis per šį vamzdelį yra 14,58 m/s .

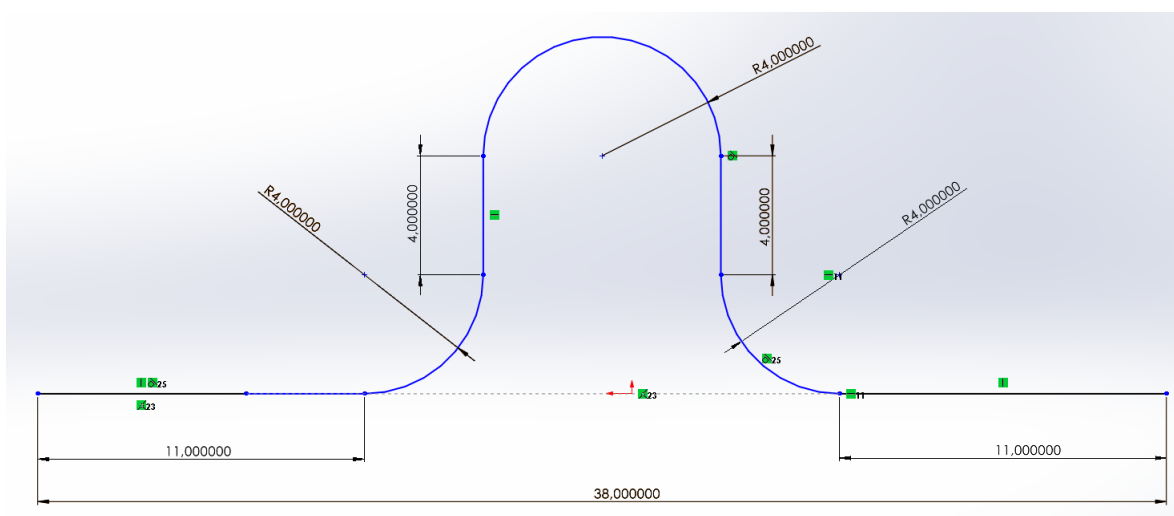
Siekiant, jog minimaliam impulsui, pagal reikalavimą 16, skirtas laikas būtų 50 ms , vamzdeliui galima skirti 30 % šio laiko. Vandenilio peroksido minimaliam tėkmės greičiui esant 4,5 m/s ir

minimalaus impulso laiko daliai, skirtai kapiliariniam vamzdeliui esant 15 ms, gaunama, jog minimalus kapiliarinio vamzdelio ilgis yra 0,068 m.

3.3.2. Kapiliarinio vamzdelio forma

Įprastų veikimo režimų metu kapiliarinis vamzdelis patirs daug termininių ciklų. Karštis, kuris yra generuojamas vandenilio peroksido skilimo kameroje yra perduodamas į vamzdelį, tad šis plečiasi. Tekantis kuras aušina vamzdelį, dėl ko vamzdelis traukiasi. Didžiausia pasiekta vamzdelio temperatūra yra numatoma jau pabaigus degimą. Nustojęs tekėti kuras nebevėsins vamzdelio.

Kadangi kapiliarinis vamzdelis yra suvaržytas abiejuose galuose, jam nėra kur plėstis. Dėl šios priežasties susidaro vidiniai įtempiai, kurie turi daug įtakos vamzdelio gyvavimo trukmei. Šiai problemai išspręsti yra naudojami šiluminiai išsiplėtimo lankai. Lanko forma turi tilpti šilumos atramos viduje. Projektuojamo kapiliarinio vamzdelio forma parodyta 10 paveiksle.



10 pav. Projektuojamo kapiliarinio vamzdelio forma

Norint įsitikinti, jog vamzdelio ilgis yra teisingas, vamzdelį galima padalinti į 7 segmentus, iš kurių 4 yra tiesūs ir 3 sulenkti. Iš trijų sulenktų segmentų, du yra 90° sulenkimai ir vienas 180° sulenkimas. Sulenktų segmentų ilgiai apskaičiuojami pasinaudojant formule 3.10:

$$L_{arc} = \frac{\alpha \pi r}{180}; \quad (3.10)$$

čia α – sulenkimo kampas, laipsniais; r – sulenkimo spindulys, m. Nustačius sulenktų segmentų ilgį, jis pridedamas prie tiesių segmentų ilgio, šitaip apskaičiuojant bendrą kapiliarinio vamzdelio ilgį.

3.3.3. Vamzdelio pailgėjimas

Apskaičiuojant kapiliarinio vamzdelio pailgėjimą buvo padaryta prielaida, jog vamzdelis yra tiesios formos. Tada galima apskaičiuoti vamzdelio pailgėjimą veikiant temperatūrai:

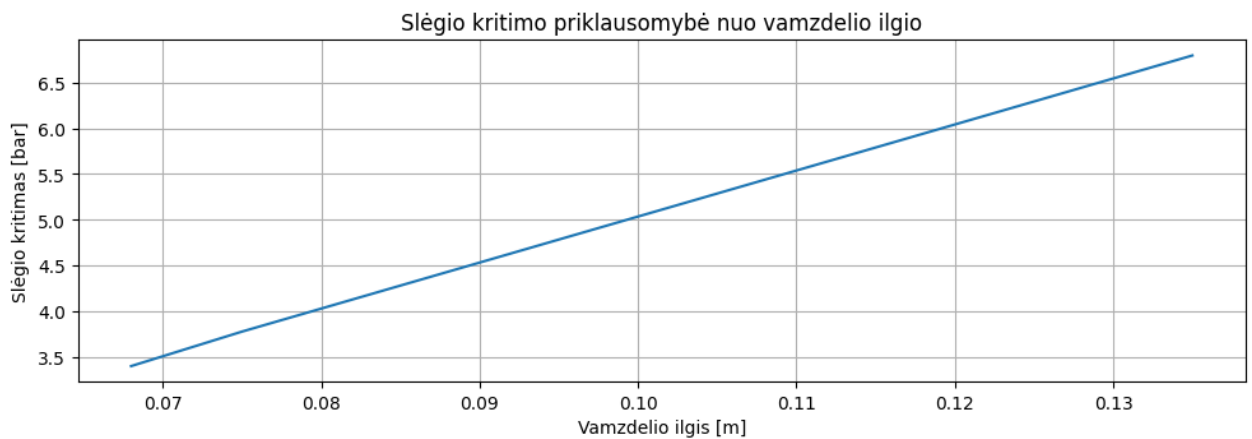
$$\Delta L = L \alpha_L \Delta T; \quad (3.11)$$

čia L – pradinis vamzdelio ilgis, m; α_L – medžiagos tiesinio šiluminio plėtimosi koeficientas; ΔT – temperatūros skirtumas, $\Delta T = (T_{galutinis} - T_{pradinis})$, K. Parinkti „Swagelok“ vamzdeliai yra pagaminti iš nerūdijančio plieno AISI-316 [42]. Šios medžiagos tiesinio šiluminio plėtimosi koeficientas $\alpha_L = 17,2 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ prie 200 °C temperatūros [41]. Pradinė temperatūra yra priimama, kaip kambario, todėl

$T_{pradinis} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, o galutinė temperatūra yra parenkama, kaip aukštos koncentracijos vandenilio peroksido virimo temperatūra, todėl $T_{galutinis} = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ir pradinis kapiliarinio vamzdelio ilgis L yra 0,068 m. Atlikus pailgėjimo skaičiavimus buvo nustatyta, jog kapiliarinis vamzdelis turėtų pailgėti per 0,47 mm.

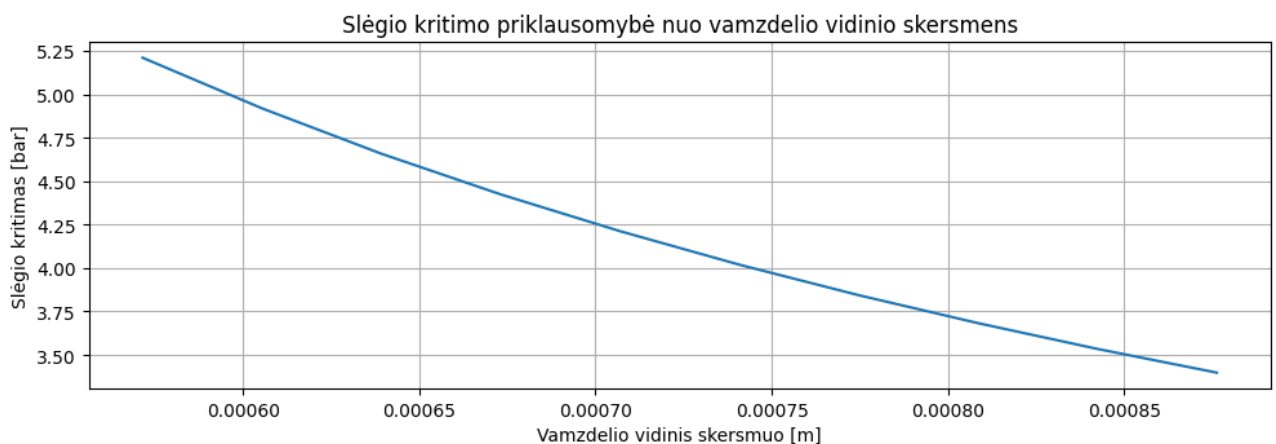
3.3.4. Slėgio kritimas

Siekiant apskaičiuoti slėgio kritimą kapiliariniame vamzdyje, reikia įvertinti vamzdelio dydžio įtaką slėgio kritimui. Skyrelyje 3.3.1. buvo paminėta, jog slėgio kritimas priklauso nuo vamzdelio ilgio ir nuo vamzdelio vidinio skersmens. Kapiliarinio vamzdelio slėgio kritimo priklausomybė nuo vamzdelio ilgio yra tiesinė [43] žr. pav. 11.



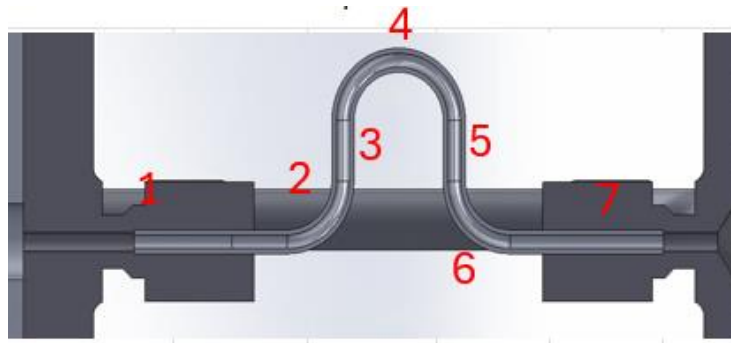
11 pav. ΔP priklausomybė nuo vamzdelio ilgio

Tuo tarpu, vamzdelio vidinis skersmuo turi daugiau įtakos slėgio kritimui. Slėgio kritimas didėja eksponentiškai mažėjant vamzdelio vidiniam skerspjūviui, žr. pav. 12.



12 pav. ΔP priklausomybė nuo vamzdelio skersmens

Norint apskaičiuoti slėgio kritimą per vamzdelio ilgį, kaip ir skyrelyje 3.3.2, parinktą vamzdelio formą padalinti į tiesius ir sulenktus segmentus. Skirtingi kapiliarinio vamzdelio segmentai yra pavaizduoti 13 paveiksle.



13 pav. Kapiliarinio vamzdelio segmentai

Slėgio kritimas apskaičiuojamas, susumuojant visų skirtingų segmentų slėgio nuostolius. Slėgio kritimas tiesiam vamzdelio segmentui yra apskaičiuojamas pasinaudojant formule 3.12 [43]:

$$\Delta P = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{\rho v^2}{2} \right); \quad (3.12)$$

čia f – slėgio faktorius turbulentiniam srautui lygiose vamzdžiuose. Jis yra apskaičiuojamas pasinaudojant formule 3.13:

$$f = 0,316 \left(\frac{1}{Re} \right)^{0,25}; \quad 2320 < Re < 2 \cdot 10^4 \quad (3.13)$$

Slėgio kritimas sulenktame vamzdyje yra apskaičiuojamas formule 3.14 [39]:

$$\Delta P = f \frac{\rho v^2}{2} \frac{\pi r_b}{D} \frac{\theta}{180^\circ} + k_b \frac{\rho v^2}{2}; \quad (3.14)$$

čia r_b – vamzdelio sulenkimo spindulys, m; θ – sulenkimo kampas, laipsniais; D – vamzdelio vidinis skersmuo, m; k_b – įlinkio nuostolių koeficientas. k_b nurodytas priede 3.

Apskaičiavus slėgio kritimą skirtinguose segmentuose ir juos susumavus buvo nustatyta, jog per visą kapiliarinio vamzdelio ilgį, slėgio kritimas bus 4,46 bar. Atskirų segmentų slėgio kritimo duomenys yra pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Slėgio kritimo rezultatai kiekvienam segmentui

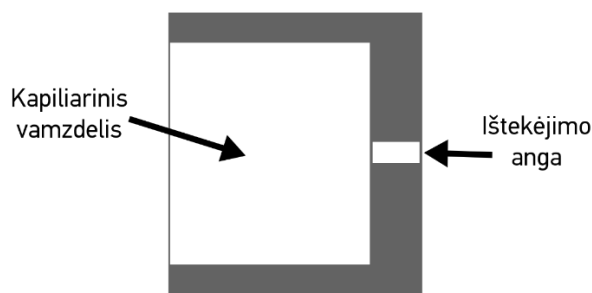
	ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	ΔP_4	ΔP_5	ΔP_6	ΔP_7	ΔP_{tot}
Pa	95641,74	62448,57	20135,1	109478,9	20135,1	62448,57	75506,64	445794,7
bar	0,956	0,624	0,201	1,095	0,201	0,624	0,755	4,458

3.4. Purkštukas

Purkštukas – tai raketinio variklio komponentas, kurio paskirtis atomizuoti skystą kurą į smulkus lašelius, šitaip padidinant kuro paviršiaus plotą. Didelis kuro paviršiaus plotas padidina kuro garavimą ir skatina cheminių reakcijų veikimą.

Kuro atomizavimą galima pasiekti keliais būdais. Kurą galima pateikti keliais skirtingais kanalais, verčiant čiurkšles susidurti. Kurą taip pat galima paduoti skersiniais kanalais šitaip kuro srautą išsukant. Tokiu atveju, kuras, jau nevaržomas sienelių, atomizuojasi, dėl susidariusių išcentrinųjų jėgų. Trečias ir pats paprasčiausias būdas yra paduoti kurą dideliu slėgiu per mažą angą, šitaip iškeičiant

slėgį į kuro atomizavimą. Visi variantai buvo svarstyti projektuojant variklį, tačiau buvo nuspręsta likti su trečiu kuro purkštuko pasirinkimu. Šio tipo purkštuko forma pavaizduota 14 paveiksle.



14 pav. Kuro purkštuko forma

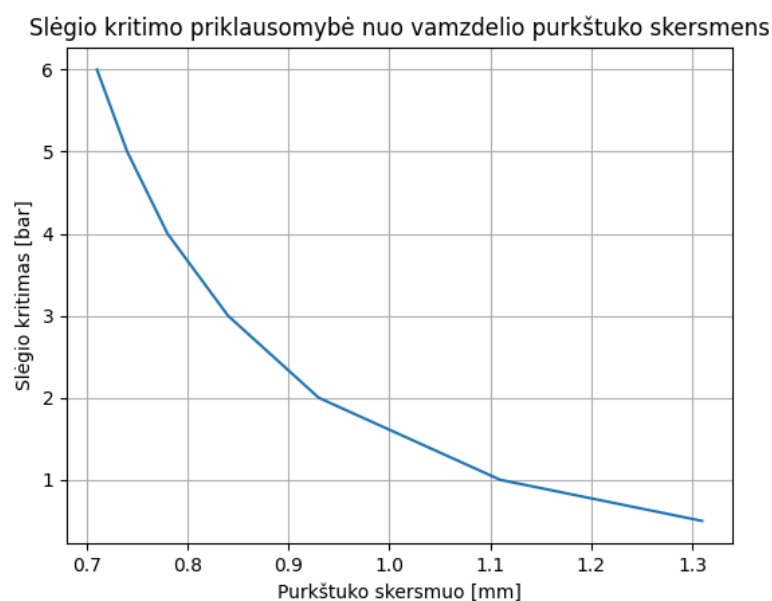
Projektuojant raketinio variklio purkštuką yra daroma prielaida, jog purkštukas išnaudoja nuo 15 % iki 25 % pateikiamo slėgio kuro atomizavimui. Esant tokio dydžio slėgio kritimui yra užtikrinama pilnesnė reakcija vandenilio peroksido skilimo kameroje ir todėl yra galimas geresnis raketinio variklio veikimas [47]. Slėgio kritimas per mažą angą yra apskaičiuojamas formule 3.15.

$$\Delta P = 8 \cdot \rho \left(\frac{Q}{\alpha d^2 \pi} \right)^2; \quad (3.15)$$

čia ρ – kuro tankis, kg/m^3 ; Q – tūrinė srauto tėkmė, m^3/s ; α – tėkmės koeficientas, kuris priklauso nuo angos formos. Tipinis dydis yra 0,78 [48]; d – angos per kurią teka kuras, skersmuo, m; Priimant, jog slėgio kritimas per purkštuką yra 20 % ir pertvarkius lygtį 3.15, galima apskaičiuoti purkštuko angos skersmenį formule 3.16.

$$d_{orf} = \sqrt{\left(\frac{Q}{\alpha \pi} \right) \left(\frac{\Delta P}{8 \rho} \right)^{-0,5}}. \quad (3.16)$$

Kadangi šioje darbo stadijoje dar nėra žinomas tikslus pateikiamas slėgis, galima palyginti kelias galimas slėgio kritimo reikšmes ir apskaičiuoti galimus purkštuko angų skersmenis. Ši priklausomybė yra pavaizduojama grafiškai 15 paveiksle.



15 pav. Purkštuko angos skersmens nuo slėgio kritimo priklausomybė

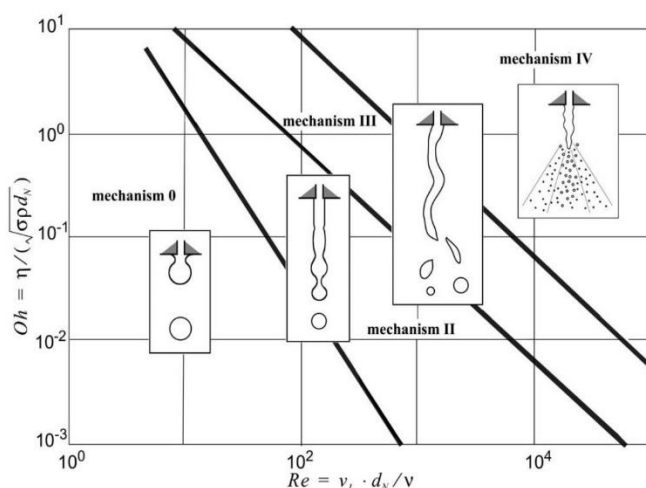
Kuro purkštuko skersmens priklausomybė nuo slėgio kritimo nėra tiesiška. Yra matoma, jog slėgio kritimas auga gerokai sparčiau, nei mažėja purkštuko angos skersmuo. Taip pat yra matoma, jog slėgio kritimas per purkštuką negali būti mažesnis nei 2,53 bar, nes vidinis kapiliarinio vamzdelio skersmuo yra 0,88 mm.

Siekiant įvertinti skysčio atomizavimą taip pat yra naudojamas Ohnesorge'o skaičius [45]. Ohnesorge'o skaičius (Oh) yra bedimensinis skaičius, susiejantis klamos jėgas su inercinėmis bei paviršinėmis jėgomis. Šis skaičius yra apskaičiuojamas pasinaudojant formule 3.17:

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho\sigma L}}; \quad (3.17)$$

čia Re , – Reynolds'o skaičius; We – Weber'io skaičius; μ – dinaminė medžiagos klampa, Pa·s; ρ – medžiagos tankis, kg/m³; σ – paviršiaus įtempis, N/m; L – charakteristinė ilgio skalė (dažniausiai, atomizuoto lašelio skersmuo), m;

16 paveiksle yra vaizduojama Ohnesorge'o skaičiaus priklausomybė nuo Reynolds'o skaičiaus. Apskaičiuotam Reynolds'o skaičiui esant 14 883, pasak 16 paveikslo, Ohnesorge'o skaičius neturi būti mažesnis nei 10⁻¹.



16 pav. Ohnesorge'o skaičiaus priklausomybės nuo Reynolds'o skaičiaus, grafikas [46]

Purkštukas gali būti pagaminamas pasinaudojant per pusę perpjautu *Swagelok* mechaniniu sujungimu. Šį sujungimą įvirinus į vandenilio peroksido skilimo kameros dangtelį yra užtikrinamas sandarumas. Skilimo kameros centre yra išgręžiama atitinkamo dydžio skylė, kuri užtikrins tinkamo dydžio slėgio kritimą.

3.5. Vandenilio peroksido skilimo kamera

Vandenilio peroksido skilimo kamera tai pati svarbiausia vandenilio peroksidu varomo raketinio variklio dalis. Šioje kameroje yra laikoma katalizatoriaus medžiaga. Katalizatoriaus granulės yra suvaržomos kameroje, naudojant specialias pertvaras. Kadangi šiame darbe yra nagrinėjamas raketinis variklis su dvejais skirtingais katalizatoriais, pertvarų iš viso yra 3. Viena po purkštuko, viena tarp katalizatorių sluoksnių ir viena pertvara yra prieš raketinio variklio kaklelį. Katalizatoriaus kameros vidinį skersmenį galima apskaičiuoti pasinaudojant formule 2.4. Palyginus kelis skirtingus panašaus dydžio raketinius variklius buvo parinkta katalizatoriaus sluoksnio apkrovos reikšmė $L_{CB} =$

16 kg/s·m². Padalinus masės tėkmę iš katalizatoriaus sluoksnio apkrovos yra gaunamas katalizatoriaus skersmens plotas. Buvo gauna, jog katalizatoriaus vidinis skersmuo yra 0,0318 m.

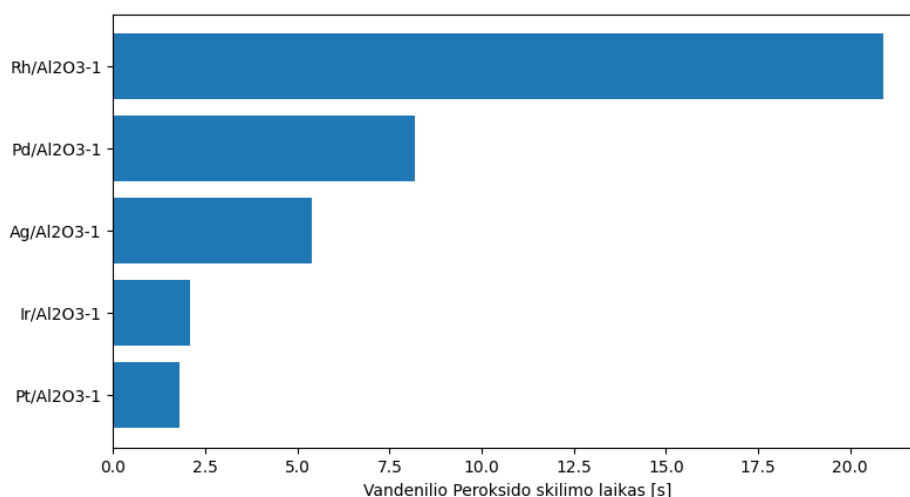
3.5.1. Katalizatorius

Kaip buvo užsiminta skyriaus pradžioje, projektuojamas raketinis variklis turi du katalizatorius. Vienas skirtas pradėti vandenilio peroksido skilimo reakciją – kitas užbaigti reakciją. Antrasis katalizatorius dažnai yra mažiau tankus nei pirmasis, todėl jis taip pat sumažina bendrą katalizatoriaus sluoksnio slėgio kritimą. Katalizatoriaus sluoksnio tankumą nusako tuštumos koeficientas ϵ_s , kuris yra apskaičiuojamas formule 3.18.

$$\epsilon_s = 0,36 + 0,1 \frac{d_{ps}}{d_t} + 0,7 \left(\frac{d_{ps}}{d_t} \right)^2; \quad (3.18)$$

čia d_{ps} – sferos skersmuo, kurios tūris yra lygus katalizatoriaus granulės tūriui, m; d_t – katalizatoriaus sluoksnio plotas (arba katalizatoriaus kameros vidinis skersmuo), m. Ši priklausomybė veikia tik tada, jei $d_{ps} / d_t \leq 0,6$. Tuštumos koeficientas yra kertinis dydis siekiant įvertinti katalizatoriaus veikimą.

Norint apskaičiuoti tuštumos koeficientą reikia nustatyti katalizatoriaus granulės dydį, o tai padaroma parenkant tinkamą katalizatoriaus medžiagą. Katalizatoriai vandenilio peroksidui gali būti metalai, organiniai junginiai ar keramikinės medžiagos. S. Casu ir kiti atliko tyrimą, bandydami charakterizuoti skirtingais tauriaisiais metalais padengtas aliuminio oksido granules, kaip katalizatorių vandenilio peroksidui [51]. Bandymų metu buvo išbandyti 18 ir 20 tinklelio (1 mm ir 0,841 mm) dydžio granulės aptrauktos platina, paladžiu, rodžiu, iridžiu ir sidabru. Tyrimas buvo atliktas ant 200 mg katalizatoriaus užlašinus 1 ml 30 % koncentracijos vandenilio peroksido. Bandymų metu gautos vandenilio peroksido skilimo laiko reikšmės pavaizduotos 17 paveiksle.



17 pav. Vandenilio peroksido skilimo ant skirtingų medžiagų laikas [51]

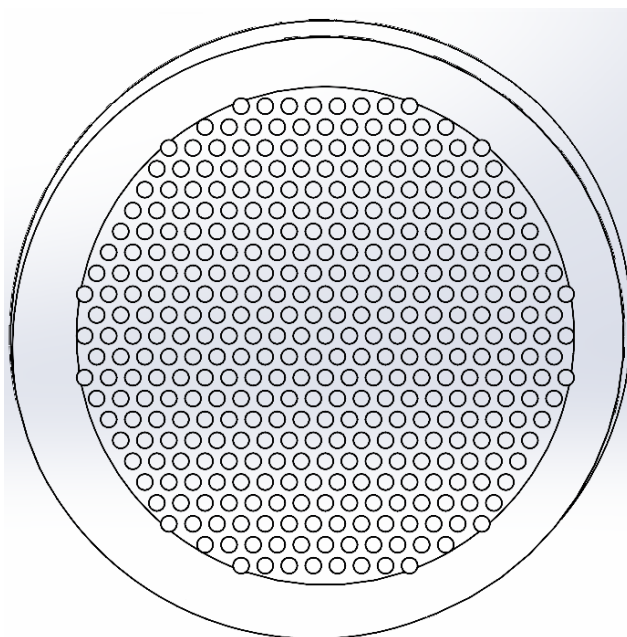
Tyrimo metu paaiškėjo, jog vandenilio peroksidas skyla greičiausiai, naudojant aliuminio oksido granules, padengtas platina [51]. Nedaug atsilieka aliuminio oksidas padengtas iridžiu. Atlikus šių katalizatorių kainos vertinimą internete, buvo nustatyta, jog platina dengtos aliuminio oksido granulės yra pigesnės, tad labiau prieinamos, nei Iridžiu dengtos granulės.

Prieinamos granulės gali būti skirtingų dydžių [52], tad atliekant vidinės balistikos skaičiavimus yra laikoma, jog katalizatoriaus medžiaga yra tokia pati, skiriasi tik jos granulių dydis. Parinkti du

katalizatoriaus granulių dydžiai: 1 mm ir 6,73 mm. Katalizatoriaus granulės skersmeniui esant 1 mm, pasak formulės 3.18, tuštumos koeficiento reikšmė yra 0,36, tuo tarpu skersmeniui esant 6,73, tuštumos koeficientas yra 0,41.

3.5.2. Katalizatoriaus pertvaros

Katalizatoriaus pertvaros suvaržo katalizatoriaus granules vienoje vietoje, tačiau leidžia kuriai pratekėti. Pats paprasčiausias būdas užtikrinti abi funkcijas yra panaudoti plokštelę su daug skylučių, kurių dydis yra mažesnis už raketinio variklio kaklelį. Tokiu būdu yra užtikrinama, jog varomoji medžiaga galėtų pratekėti, o katalizatoriaus granulė negalėtų užkimšti degimo produktų išmetimo angos. Projektavimo metu buvo nuspręsta, jog vienos pertvaros skylutės skersmuo yra 1 mm. Skylutei esant 1 mm skersmens ir tarp jų centrų paliekant 1,5 mm tarpą, ant pertvaros telpa 367 skylutės pilnos skylutės. Pertvaros skylučių vaizdas pateiktas 18 paveiksle.



18 pav. Katalizatoriaus pertvara

Siekiant apskaičiuoti slėgio kritimą per pertvarą su dideliu skaičiumi skylučių, yra panaudojama tūrinės srauto tėkmės per pertvarą formulė 3.19 [50].

$$q_v = \frac{c \varepsilon_v n \pi d_n^2}{4 \sqrt{1-m^2}} \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}; \quad (3.19)$$

čia q_v – tūrinė srauto tėkmė, m^3/s ; c – iškrovos koeficientas; ε_v – išsiplėtimo koeficientas (skysčiams $\varepsilon_v = 1$); n – skylių skaičius pertvaroje; d_n – vienos skylės skersmuo, m; ΔP – slėgio kritimas, Pa; ρ – kuro tankis, kg/m^3 ; m – angos modulis, kuris yra apskaičiuojamas formule 3.20.

$$m = \frac{n d_n^2}{D^2}; \quad (3.20)$$

čia D – vandenilio peroksido skilimo kameros skersmuo, m. Tada lygtis yra pertvarkoma ir išvedama slėgio kritimo formulė 3.21.

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} \left(\frac{4 q_v \sqrt{1-m^2}}{c \varepsilon_v n \pi d_n^2} \right)^2. \quad (3.21)$$

Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta, jog kol vandenilio peroksidas yra skystos būsenos, slėgio kritimas per katalizatoriaus pertvarą yra 1,71 Pa ir 620,1 Pa, kai pro pertvarą teka vandenilio peroksido skilimo reakcijos produktai. Antrosios katalizatoriaus pertvaros slėgio nuostoliai yra vertinami vidinės balistikos matematiname modelyje.

3.5.3. Vandenilio peroksido skilimo kameros gamyba

Projektuojant raketinį variklį buvo apsvarstyti įvairūs būdai, kaip būtų galima pagaminti kamerą. Nusprendus sumažinti raketinį variklį sudarančių dalių skaičių, siekiant sandarumo, komponentų gamybą tapo sudėtinga tradiciniams gamybos metodams. Viena katalizatoriaus pertvara buvo sujungta su raketine tūta, vidurinė pertvara liko atskiru komponentu, o trečioji buvo sujungta su vandeninio peroksido skilimo kameros dangteliu. Dėl šios priežasties buvo nuspręsta šias dalis pagaminti naudojantis adityviąja gamyba. Kompanija „Protolabs“ siūlo 3D spausdinimą pasinaudojant *Inconel 718* nikelio lydiniu, nerūdijančiu plienu *AISI-316* ir kitomis medžiagomis. Spausdinimui būtų naudojami metalo milteliai, kurie būtų išlydomi pasinaudojant lazeriu. Raketinio variklio dangtelis su pirmąja katalizatoriaus pertvara būtų pagaminti iš nerūdijančio plieno, kol likę komponentai būtų atspausdinti iš *Inconel 718*. Pagaminti komponentai reikalautų papildomo paviršiaus apdirbimo, ypač iš vidinės skilimo kameros pusės bei kontaktinių paviršių tarp komponentų. Lygūs paviršiai padeda užtikrinti sandarumą bei turi mažiau įtakos vandenilio peroksido skilimo reakcijai.

3.6. Hermetizavimas

Raketinio variklio reikalavimas 24, limituoja varomosios medžiagos galimą nuotėkį per mechaninius sujungimus iki $30 \text{ cm}^3/\text{s}$ He cm^3/s . Dėl šios priežasties, projektuojant raketinį variklį, buvo apsvarstyti keli būdai, kaip užsandarinti visus mechaninius sujungimus.

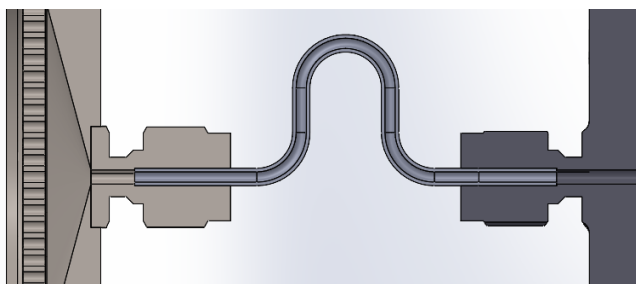
3.6.1. Swagelok sujungimai

Siekiant užtikrinti sklandų vandenilio peroksido perdavimą iš vožtuvo į vandenilio peroksido skilimo kamerą, buvo pasirinkta naudoti kompanijos „Swagelok“ mechaninius sujungimus. Kadangi yra parinktas 1/16“ kapiliarinis vamzdelis, jam yra reikalingas ir tokio pat dydžio sujungimas. Norint užtikrinti tvirtą mechaninį sujungimą buvo parinktas „Swagelok“ SS-100-6 sujungimas. Šis sujungimas yra pavaizduotas 19 paveiksle.



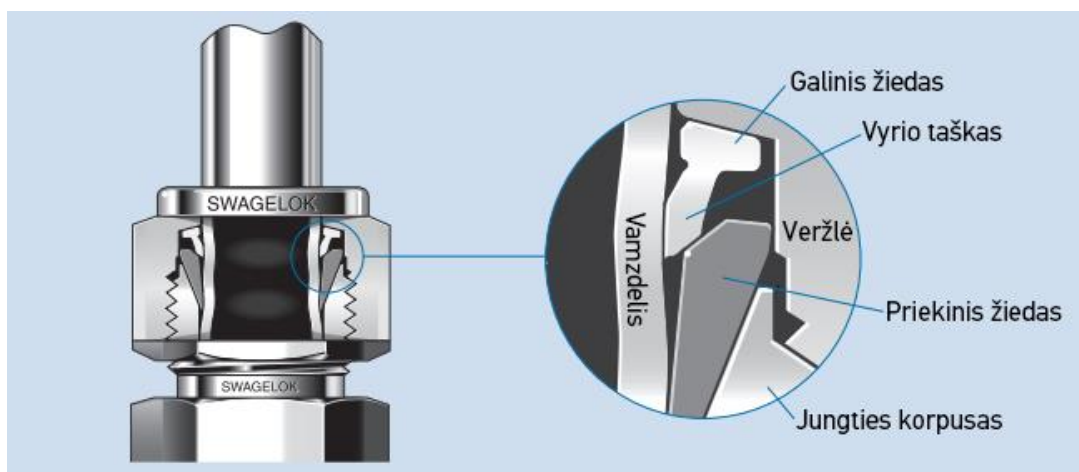
19 pav. „Swagelok“ SS-100-6 sujungimas [54]

Vienas toks sujungimas padalintas į dvi dalis gali užtikrinti kapiliarinio vamzdelio sandarų sujungimą su vožtuvu ir raketinio variklio korpuso dangteliu. Dvi atskiros dalys būtų privirinamos prie atitinkamų jungčių, taip užtikrinant sandarumą. Pilnos jungties vaizdas pateiktas 20 paveiksle.



20 pav. „Swagelok“ kapiliarinio vamzdelio mechaninis sujungimas

Kapiliarinis vamzdelis yra įstatomas į „Swagelok“ jungtį ir užveržiamas specialia veržle. Veržlėje yra du specialūs nupjauto kūgio formos žiedai, iš kurių priekinis, veržiant veržlę yra deformuojamas, o galinis remiasi į įstatytą vamzdelį, šitaip sukuriant sandarią mechaninę jungtį [53]. „Swagelok“ mechaninė jungtis pavaizduota 21 paveiksle.



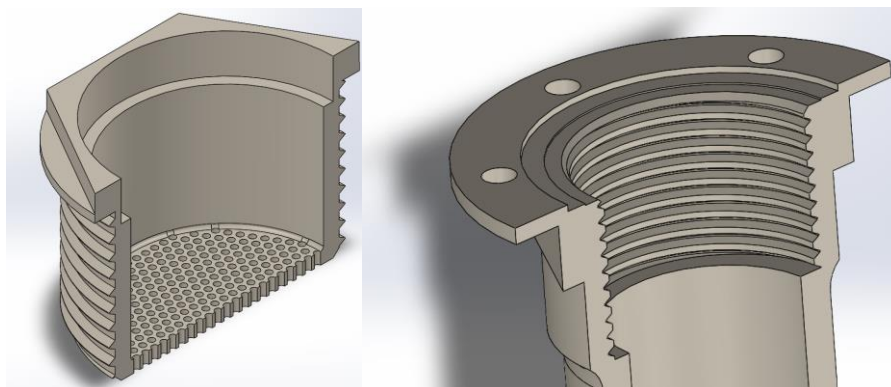
21 pav. „Swagelok“ sujungimo schema [53]

„Swagelok“ bendrovė atliko seriją bandymų, siekiant išsiaiškinti ar jų gaminamos mechaninės jungtys atlaiko sandarumo reikalavimus. Bandymų metu helio nuotėkio detektoriumi buvo matuojamas dujų nuotėkis per mechaninius sujungimus, užsandarintos sistemos viduje esant 300 barų slėgiui. Pasak „Swagelok“ mechaninis sujungimas SS-100-6 per 10, 5 minutes trūkusių bandymų, neviršijo $10 \text{ cm}^3/\text{s}$ helio nuotėkio [55]. Tokio tipo mechaniniai sujungimai projektuojamame raketiniame variklyje yra numatomi 2. Per mechaniškai sujungtus komponentus tekanti medžiaga yra gerokai tankesnė už helį, tad galime daryti prielaidą, jog per abu sujungimus, nuotėkis nebus didesnis nei $10 \text{ cm}^3/\text{s}$ He.

3.6.2. Srieginiai sujungimai

Raketinis variklis yra projektuojamas taip, kad vidurinė katalizatoriaus pertvara būtų įtvirtinama savo vietoje naudojant kintamo žingsnio srieginį sujungimą. Vidurinei pertvarai esant pilnai suveržtai, sriegiai turėtų būti deformuojami, šitaip užrakinant komponentą savo vietoje. Raketiniam varikliui pasiekus darbinę temperatūrą, šis deformuotas sujungimas gali susivirinti ir tokiu būdu pilnai

užsandarinti katalizatoriaus pertvarą. Srieginis pertvaros sujungimas su raketinio variklio korpusu yra pavaizduotas 22 paveiksle.

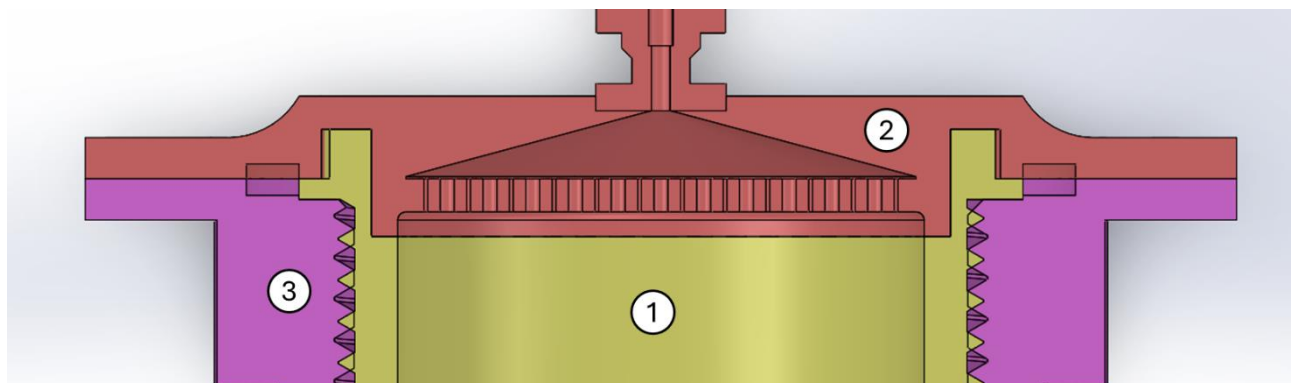


22 pav. Katalizatoriaus pertvaros (kairėje) srieginis sujungimas su variklio korpusu (dešinėje)

Projektuojant raketinį variklį toliau yra priimama prielaida, jog raketiniam varikliui pradėjus veikti srieginis sujungimas susivirs ir varomosios medžiagos nuotėkio šioje vietoje nebus.

3.6.3. Sandarinimo žiedai

Siekiant pilnai užsandarinti vandenilio peroksido skilimo kamerą, ant 22 paveiksle pavaizduoto variklio korpuso ir katalizatoriaus pertvaros (1), uždedamas vandenilio peroksido skilimo kameros dangtelis (2). Šis dangtelis yra vaizduojamas raudoname fone 23 paveiksle.



23 pav. Raketinio variklio korpuso dalys

Kontaktinis paviršius tarp vandenilio peroksido skilimo kameros dangtelio ir variklio korpuso (3) su katalizatoriaus pertvara, yra potenciali, dujų nuotėkio vieta. Norint užsandarinti šią jungtį, iš pradžių buvo apsvarstytas dar vienas srieginis sujungimas. Tačiau buvo nuspręsta, jog srieginis sujungimas šioje vietoje nėra pilnai tinkamas. Taip yra dėl to, nes vandenilio peroksido skilimo kameros dangtelis ir korpusas su katalizatoriaus pertvara yra pagaminti iš skirtingų medžiagų. Vietoje to, užsandinimui, buvo nuspręsta panaudoti sandarinimo žiedus.

Po potencialių tiekėjų paieškos internete, buvo nutarta kreiptis paramos į Belgijoje veikiančią įmonę „Eurosealings“. Įmonės atstovai buvo paslaugūs ir padėjo suprojektuoti tinkamą sandarinimo žiedą. Įmonės atstovai įvertinę potencialias raketinio variklio veikimo sąlygas, pasiūlė metalu aptrauktus, iš „Inconel X-750“ nikelio lydinio pagamintus sandarinimo žiedus. Galimi metalai, kuriais gali būti aptraukti žiedai, yra sidabras, auksas ir nikelis [56]. Buvo nuspręsta, kad dėl sidabro lydymosi temperatūros, esant per artimos raketinio variklio darbinei temperatūrai, sidabras padidintų

pralaidumo riziką. Sprendžiant tarp aukso ir nikelio, buvo nutarta pasirinkti nikelį, kadangi nikelio danga pasižymi šiek tiek geresnėmis temperatūrinėmis savybėmis ir yra pigesnė, lyginant su auksu. Parinkti sandarinimo žiedai yra pavaizduoti 24 paveiksle. Pasak įmonės „Eurosealings“ atstovų, siekiant užtikrinti optimalų sandarumą naudojant sandarinimo žiedą, būtina numatyti 3,2 mm x 1,9 mm dydžio tarpą variklio konstrukcijoje. Ši vieta yra numatyta tarp raketinio variklio korpuso ir vandenilio peroksido skilimo kameros dangtelio, kuri šonu liečiasi ir su katalizatoriaus pertvaros kraštu. Ši ertmė matoma 23 paveiksle. Sandarinimo žiedo skersmuo yra 2,39 mm, tad siekiant, kad deformuotas žiedas užpildytų visą šią ertmę, būtina užtikrinti, kad bus pasiektas 210 N/mm spaudimas. Planuojama, jog šis spaudimas bus pasiektas suveržiant raketinio variklio korpusą su vandenilio peroksido skilimo kameros dangteliu varžtais. Pilna žiedo apkrova turi būti 33 kN. Šiuo metu numatomi 6 varžtai, todėl vienam varžtui turėtų tekti po 5,5 kN jėgos.

Siekiant pasiekti didžiausią įmanomą sandarumą, taip pat turi būti pasirūpinta, jog sandarinimo žiedo ertmės paviršiai turėtų tinkamą paviršiaus apdirbimą. Įmonės „Eurosealings“ atstovai rekomenduoja pasiekti Ra tipo paviršiaus apdirbimą, kur matmuo „a“ būtų nuo 0,4 iki 0,8 μm .



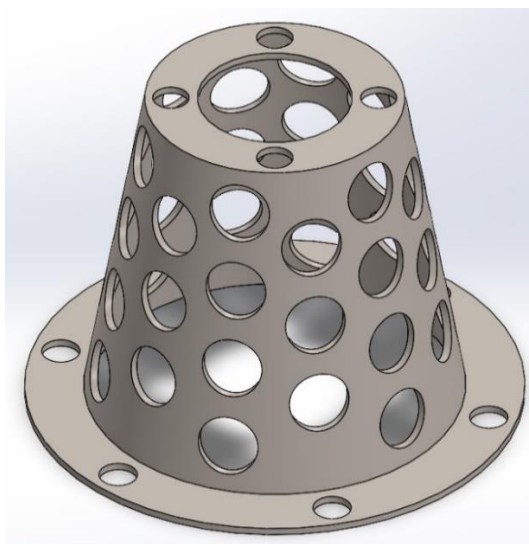
24 pav. Metaliniai sandarinimo žiedai [56]

Dujų nuotėkio lygis yra sunkiai prognozuojamas, dėl daugybės faktorių, kurie įtakoja sandarumą. Dėl šios priežasties yra priimama prielaida, kad sandarinimo žiedas užtikrina pilną sandarumą.

3.7. Šiluminė atrama

Šiluminės atramos paskirtis – užtikrinti atstumą tarp vandenilio peroksido skilimo kameros ir kuro padavimo vožtuvo. Ši atrama privalo būti struktūriškai pajėgi atlaikyti raketinio variklio generuojamą karštį bei traukos jėgą. Projektuojant šiluminę atramą atsižvelgta į variklio komponentų sujungimus, todėl nuspręsta panaudoti varžtus, kurių paskirtis pritvirtinti vandenilio peroksido skilimo kameros dangtelį prie variklio korpuso, pritvirtinant atramą prie korpuso.

Šiluminės atramos ilgis parinktas įvertinus sulenkto kapiliarinio vamzdelio ilgį, kadangi kapiliarinis vamzdelis privalo tilpti atramos viduje. Parinktas kuro padavimo vožtuvas yra tvirtinamas 4 varžtais, todėl nuspręsta, kitą šiluminės atramos dalį tvirtinti prie vožtuvo šiais 4 varžtais. Suprojektuotos šiluminės atramos vaizdas pateiktas 25 paveiksle.



25 pav. Raketinio variklio šiluminė atrama

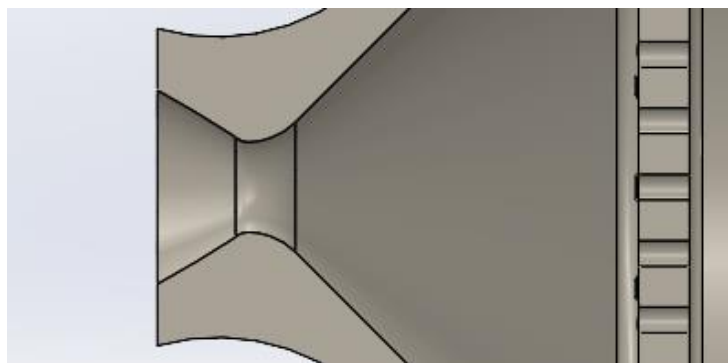
Šiluminė atrama remiasi į vandenilio peroksido skilimo kamerą, todėl sugeria dalį, vandenilio peroksido skilimo reakcijos metu, išskirtos šilumos. Siekiant pagerinti šiluminės atramos šilumos išspinduliavimą, nuspręsta atramos paviršiaus plotą padidinti, išgręžiant skylės, kad leidžia sumažinti bendrą raketinio variklio masę.

Šiluminė atrama gali būti pagaminta remiantis tradiciniais gamybos metodais: Nerūdijančio plieno plokštė sulenkama, padarant kūgio formą. Išpjovus apskritimo formos plokšteles, kūgis suvirinamas su pastarosiomis plokštelėmis. Išgavus tinkamą formą, išgręžiamos skylės skirtos mechaniniams sujungimams su kuro padavimo vožtuvu ir vandenilio peroksido skilimo kameros dangteliu. Pabaigoje išgręžiamos skylės skirtos padidinti šiluminės atramos paviršiaus plotą.

3.8. Raketinė tūta

Raketinė tūta suprojektuota pagal metodą, aprašytą 2.3 skyriuje. Projektuojant raketinę tūtą priimta prielaida, jog tarp vandenilio peroksido skilimo kameros ir raketinio variklio kaklelio slėgis yra 15 bar ir variklis bus naudojamas atmosferoje jūros lygyje. Tai leidžia apskaičiuoti tiek raketos kaklelio skersmenį, tiek ir raketinės tūtos galo skersmenį.

Pasinaudojant 2.42 formule apskaičiuota jog raketinės tūtos kaklelio skersmuo yra 3,5 mm. Siekiant optimizuoti raketinę tūtą veikimui atmosferos slėgyje, nustatytas optimalus tūtos išsiplėtimo santykis yra 4,63. Su šiuo santykiu, raketinės tūtos galo skersmuo yra 7,6 mm. Veikimui atmosferinėmis sąlygomis pritaikytos raketinės tūtos vaizdas, yra pateiktas 26 paveiksle.



26 pav. Atmosferai optimizuota raketinė tūta

Kadangi raketinė tūta yra bendro raketinio variklio korpuso dalis, ji, kaip ir likęs variklio korpusas, taip pat gali būti pagaminta adityviosios gamybos būdais. Vidinis raketinės tūtos paviršių papildomai apdirbant, būtų pasiekiamos geresnės kuro išmetimo savybės.

3.9. Bendras raketinio variklio slėgio kritimas

Norint nustatyti slėgį, kurį reikia pateikti į raketinį variklį, siekiant generuoti reikiamą traukos jėgą pasak formulės 3.22 reikia sudėti visus variklio slėgio nuostolius su numatytu slėgiu vandenilio peroksido skilimo kameroje.

$$P_{iv} = P_0 + \Delta P_V; \quad (3.22)$$

čia P_0 – tarp katalizatoriaus pertvaros ir raketinės tūtos kaklelio esantis slėgis, Pa; ΔP_V – bendras raketinio variklio komponentų slėgio kritimas, Pa. Šis dydis apskaičiuojamas pasinaudojant 3.23 formule.

$$\Delta P_V = \Delta P_v + \Delta P_{kv} + \Delta P_p + \Delta P_{kp1} + \Delta P_{ks} + \Delta P_{kp3}; \quad (3.23)$$

čia ΔP_v – vožtuvo slėgio kritimas, Pa; ΔP_{kv} – kapiliarinio vamzdelio slėgio kritimas, Pa; ΔP_p – purkštuko slėgio kritimas, Pa; ΔP_{kp1} – pirmosios katalizatoriaus pertvaros slėgio kritimas, Pa; ΔP_{ks} – katalizatoriaus sluoksnio slėgio kritimas, Pa; ΔP_{kp3} – trečiosios katalizatoriaus pertvaros slėgio kritimas, Pa.

Nustačius vandenilio peroksido skilimo kameroje esantį slėgį bei slėgio nuotolius buvo nustatyta, jog kuro purkštukas turi padidinti slėgio kritimą per 0,5 bar, norint pasiekti 20 % slėgio kritimo reikšmę. Tas gali būti padaroma arba pailginant kapiliarinį vamzdelį arba sumažinant kuro pratekėjimo angos dydį. Siekiant nepadidinti kuro tekėjimo laiko, nuspręsta sumažinti kuro angą. Purkštuko angos skersmuo yra apskaičiuojamas pasinaudojant 3.16 lygtimi. Apskaičiuotas raketinio kuro purkštuko skersmuo yra 0,84 mm.

Kiekvieno raketinio variklio slėgio kritimo reikšmės yra pateiktos lentelėje 4.

4 lentelė. Raketinio variklio komponentų slėgio kritimų reikšmės

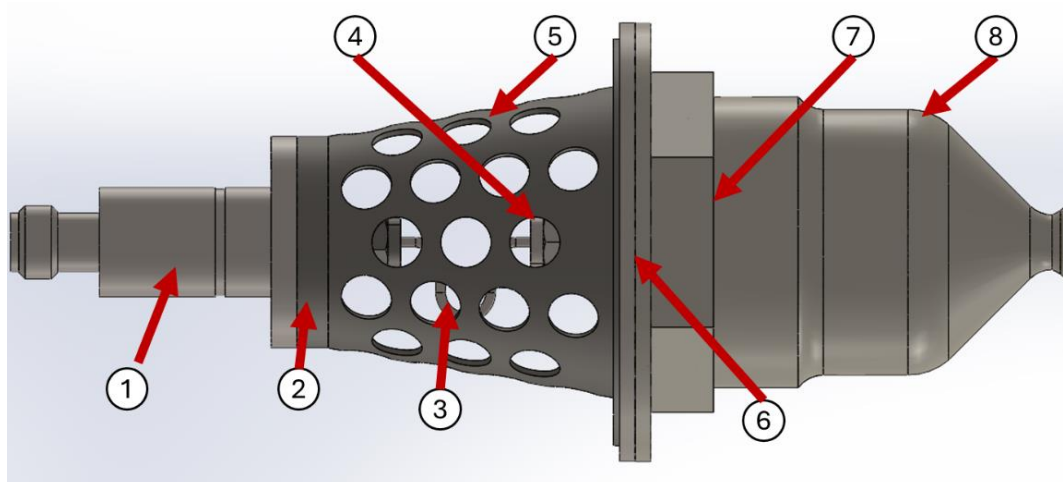
	ΔP_v	ΔP_{kv}	ΔP_p	ΔP_{kp1}	ΔP_{ks}	ΔP_{kp3}
Slėgio kritimas [bar]	23,28	4,46	0,5	$1,71 \cdot 10^{-5}$	0,49	0,006

Bendras raketinio variklio komponentų slėgio kritimas yra 30,73 bar, todėl slėgis, kurį reikia pateikti į raketinį variklį yra 44,2 bar.

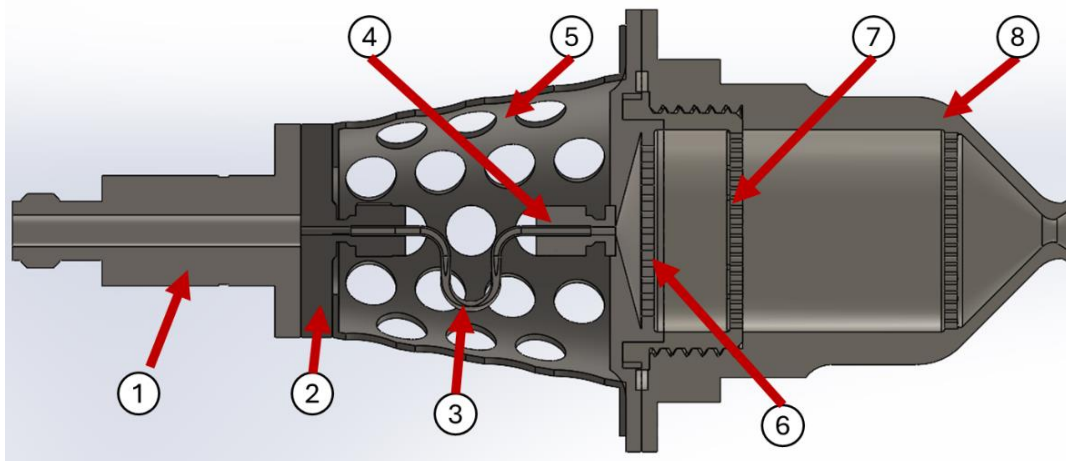
3.10. Galutinis erdvinis modelis

Remiantis 3 skyriuje atliktais skaičiavimais yra suprojektuojamas erdvinis raketinio variklio modelis. Pagal *Parker* pateiktus brėžinius sumodeliuotas parinktas kuro vožtuvas. Šis modelis neapibūdina vidinės vožtuvo struktūros, o tik jo išorinius matmenis ir jungtis. Atsižvelgus į vožtuvo formą ir *Swagelok* SS-100-6 sujungimą yra sumodeliuojamas perėjimas. Šis perėjimas tvirtinamas tarp vožtuvo ir šiluminės atramos bei turi *Swagelok* jungtį. Į šią jungtį yra įstatomas 1/16“ kapiliarinis vamzdelis, kuris yra sumodeliuojamas tokios formos, kuri nurodyta skyrelyje 3.3.2.

Vandenilio peroksido skilimo kameros dangtelis turi integruotą katalizatoriaus pertvarą, ertmės vidurinei katalizatoriaus pertvarai bei sandarinimo žiedui ir *Swagelok* jungtį purkštukui. Vidurinė katalizatoriaus pertvara turi srieginį sujungimą bei šešiakampio formos iškilimą viršuje, kuris skirtas detalės įveržimui į raketinio variklio korpusą. Raketinio variklio korpusas, kaip ir dangtelis, turi integruotą katalizatoriaus pertvarą. Ši dalis turi kintamo žingsnio sriegį ir raketinę tūtą, kuri yra suprojektuota pagal poskyryje 3.8 aprašytą formą. Surinkto raketinio variklio vaizdas pateiktas 27 paveiksle, kol jo skerspjūvio vaizdas – 28 paveiksle.



27 pav. Surinkto raketinio variklio vaizdas



28 pav. Surinkto raketinio variklio skerspjūvio vaizdas

27-ame ir 28-ame paveiksluose vaizduojamas tie patys raketinio variklio komponentai. 1 – kuro padavimo vožtuvas, 2 – kuro padavimo vožtuvo ir kapiliarinio vamzdelio perėjimas, 3 – kapiliarinis vamzdelis, 4 – kuro purkštukas, 5 – šiluminė atrama, 6 – vandenilio peroksido skilimo kameros dangtelis su integruota katalizatoriaus pertvara, 7 – vidurinė katalizatoriaus sluoksnių pertvara, 8 – raketinio variklio korpusas su integruota katalizatoriaus pertvara ir raketine tūta.

3.11. Apibendrinimas

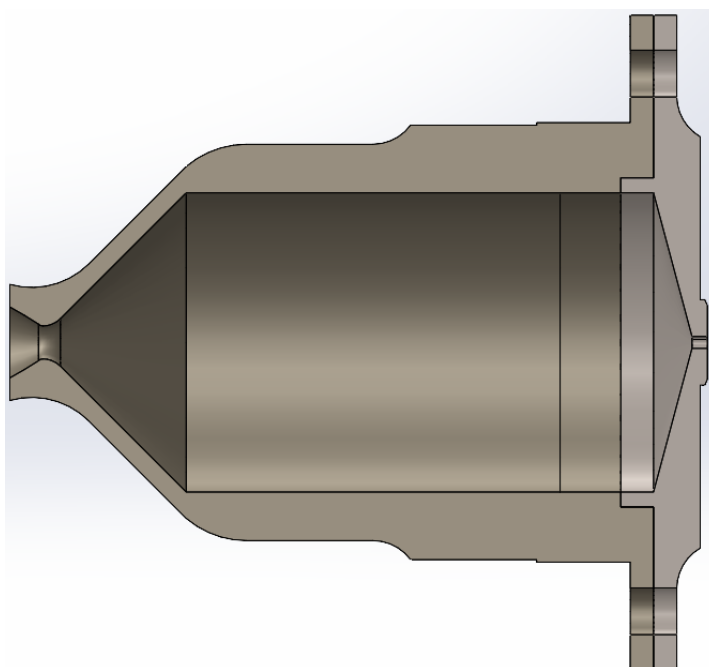
Šiame skyriuje apibūdinamas kiekvienas projektuojamo raketinio variklio komponentas. Atliekamas kelių potencialių vožtuvų palyginimas, kur atlikus įvertinimą parenkamas „Parker pulse valve“ impulsinis vožtuvas. Aprašomas kapiliarinis vamzdelis, jo parinkimas ir vamzdelio forma. Aprašomas raketinio kuro purkštukas bei jo įtaka kuro tėkmei. Tada apibūdinamas raketinio variklio katalizatoriaus sluoksnis. Siekiant įvertinti vidinę raketinio variklio balistiką, yra parenkama vienoda katalizatoriaus medžiaga, tačiau skirtingi katalizatoriaus granulių dydžiai. Siekiant užtikrinti, kad katalizatoriaus granulės būtų tinkamai įtvirtintos yra aptariamoms katalizatoriaus sluoksnių pertvaroms, pastebėta, jog slėgio kritimas per pirmą ir trečią pertvaras yra sąlyginai nedidelis. Po pertvarų yra aprašomi mechaniniai sujungimai raketiniame variklyje. Atskiri komponentai yra sujungiami srieginiais sujungimais, pasinaudojant kintamo žingsnio sriegiu variklio korpusui ir *Swagelok* sujungimais kapiliariniam vamzdeliui. Siekiant užtikrinti, kad raketinis variklis yra sandarus, yra aptiriamas nikeliu aptrauktas metalinis sandarinimo žiedas iš *Eurosealings*. Įvertinus šiluminę atramą, yra apibūdinama raketinė tūta. Priėmus, jog degimo kameros slėgis yra 15 bar, yra nustatomas raketinės tūtos kaklelio dydis ir apskaičiuojamas, atmosferos slėgiui pritaikytos, raketinės tūtos pabaigos skersmuo. Galiausiai bendrai įvertinamas kiekvieno komponento per kurį teką vandenilio peroksidas bei jo skilimo reakcijos produktai, slėgio kritimas ΔP . Atsižvelgus į bendrą raketinio variklio slėgio kritimą buvo nustatyta, jog pradinis paduodamas slėgis yra 44,2 bar. Pateikiamas bendras surinktų raketinio variklio komponentų vaizdas.

4. Baigtinių elementų metodo matematiniai modeliai

Siekiant įvertinti vandenilio peroksido skilimo reakcijos įtaką projektuojamo raketinio variklio konstrukcijai yra atliekami kritinių elementų stiprumo skaičiavimai.. Siekiant atlikti skaičiavimus yra naudojami supaprastinti vandenilio peroksido skilimo kameros, kapiliarinio vamzdelio ir katalizatoriaus sluoksnio pertvaros erdviniai modeliai.

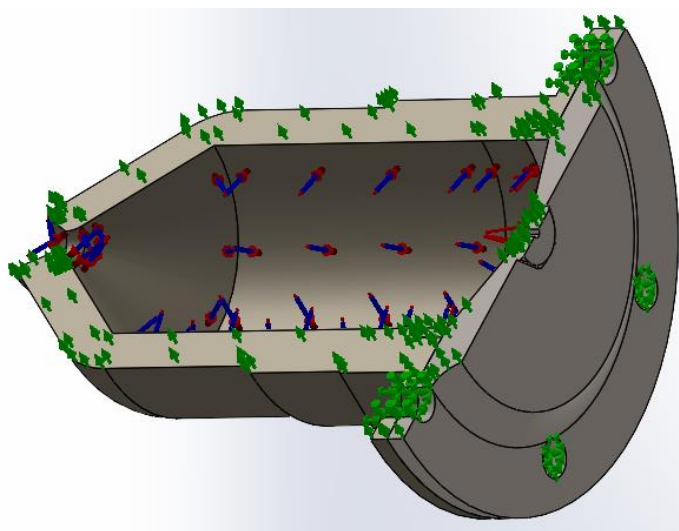
4.1. Vandenilio peroksido skilimo kamera

Vandenilio peroksido skilimo kameroje vyksta visa vandenilio peroksido skilimo reakcija, tad kamera turi atlaikyti išskirtą karštį bei kameroje esantį slėgį. Siekiant paprastesnių skaičiavimų vandenilio peroksido skilimo kameros erdvinis modelis buvo supaprastintas, pašalinant katalizatoriaus sluoksnio pertvaras, sujungiant iš vienuodų medžiagų padarytas dalis ir supaprastinant kontaktinį paviršių tarp raketinio variklio korpuso ir vandenilio peroksido skilimo kameros dangtelio. Tada yra pašalinama pusė modelio, siekiant sumažinti modelio elementų skaičių, šitaip pagreitinant skaičiavimus. Supaprastinto erdvinio modelio vaizdas pateiktas 29 paveiksle.



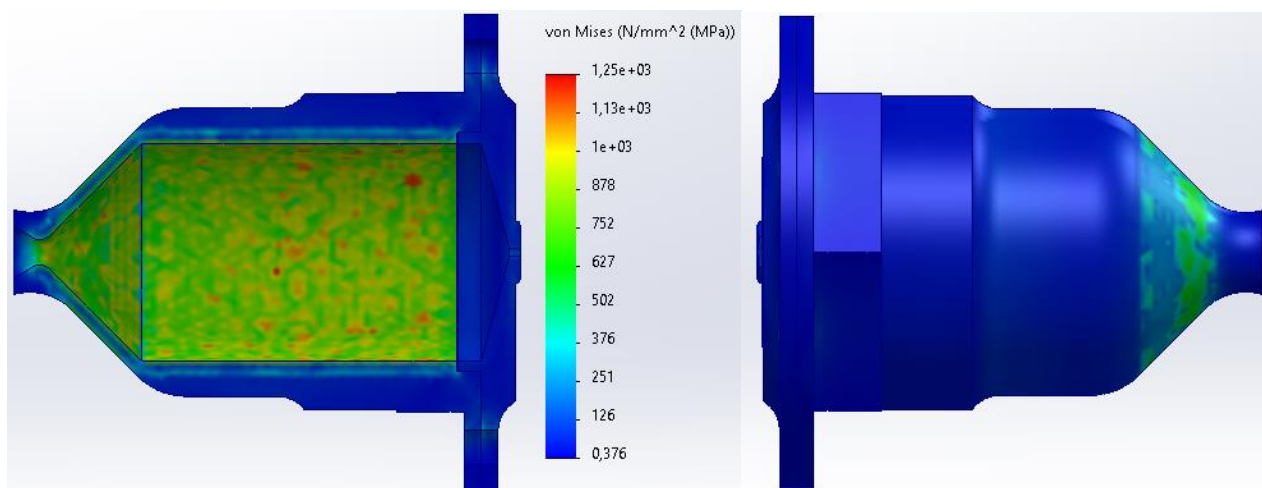
29 pav. Supaprastintas vandenilio peroksido skilimo kameros modelio vaizdas

Sudarant skaičiuojamąjį modelį yra apibrėžiamos kraštinės modelio sąlygos. Pirmiausia yra parenkama komponentų medžiaga. Vandenilio peroksido skilimo kameros dangteliui yra priskiriamas AISI 316L nerūdijantis plienas iš *Solidworks* medžiagų bibliotekos, tuo tarpu raketinio variklio korpusui priskiriama *Inconel* 718 lydiniai prilygstanti nestandartinė susikurta medžiaga pagal medžiagos savybes, prieinamas internete [57][58]. Parinkus medžiagas, buvo pakeistos kontaktinės sąlygos tarp komponentų, visi paviršiai, kurie liečiasi buvo pakeisti į „contact“. Modelis nejudamai įtvirtinamas varžtams skirtose skylėse. Taip pat yra uždedamas simetrijos suvaržymas, siekiant imituoti pilną modelio geometrinę formą. Įtvirtinus modelį yra uždedamos apkrovos. Į visą kameros paviršių yra uždedama slėgio bei temperatūros apkrova. Slėgis parenkamas 6,25 MPa (62,5 bar), o temperatūra 920,5 K. Sudaromas aukštos kokybės baigtinių elementų tinklelis, kurį sudaro 29 893 elementai. Mažiausi elementai yra 0,49 mm dydžio ir didžiausi elementai yra 7,85 mm dydžio. Supaprastintos vandenilio peroksido skilimo kameros kraštinių sąlygų vaizdas pateiktas 30 paveiksle.



30 pav. Vandenilio peroksido skilimo kameros modelio kraštinės sąlygos

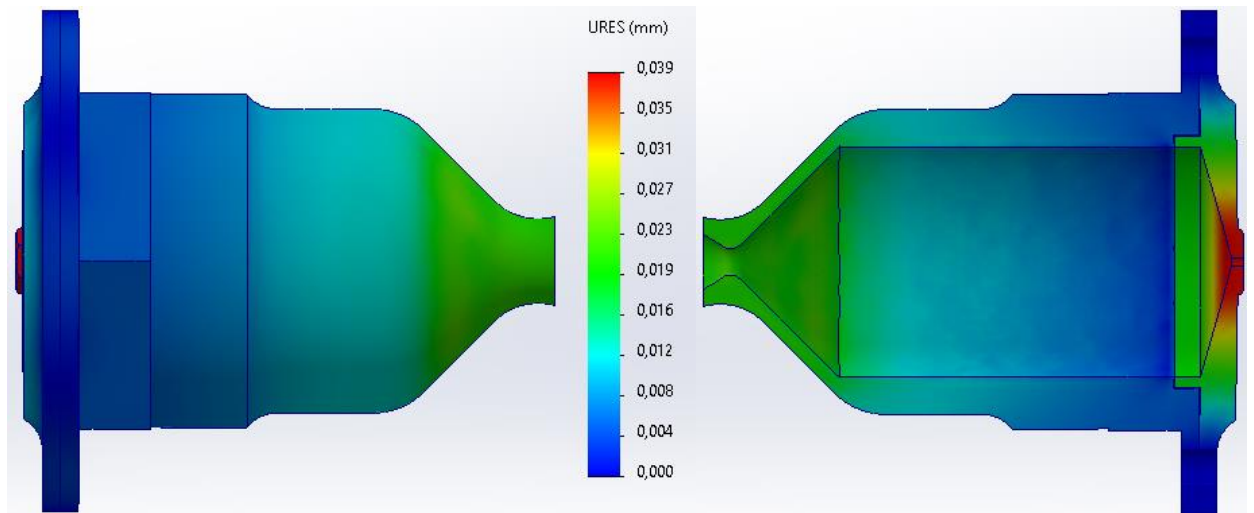
Baigtinių elementų metodu, buvo nustatyta, jog didžiausi įtempiai susidaro keliuose vietose ant vandenilio peroksido skilimo kameros vidinio paviršiaus. Šiose vietose yra pasiekiami 1,25 GPa dydžio įtempiai. Įtempių pasiskirstymo vaizdas pateiktas 31 paveiksle.



31 pav. Įtempių pasiskirstymas (kairėje variklio vidus, dešinėje išorė)

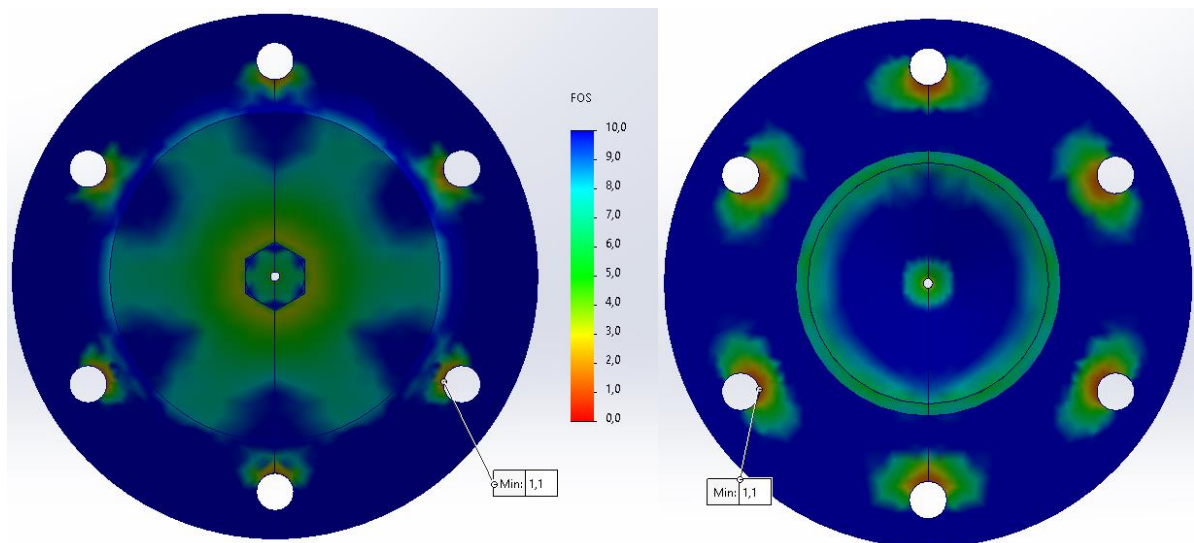
Įtempiai vandenilio peroksido skilimo kameros paviršiuje susidaro netolygiai dėl tik vidinį paviršių veikiančios temperatūros apkrovos. *Solidworks* programinė įranga paprastą temperatūrinę apkrovą uždeda tik ant paviršiaus ir paviršiai kurie nėra apkrauti temperatūra laikomi, kaip šalti paviršiai. Karšti paviršiai plečiasi, o šalti traukiasi, todėl atsiradusios deformacijos padidina paviršiaus įtempius. Realybėje šie įtempiai susidaryti neturėtų, dėl neilgų šilumos bei slėgio apkrovų, varikliui pulsuojant.

Variklį apkrovus yra matoma, jog deformacijos susidaro tiek vandenilio peroksido skilimo kameros dangtelyje, tiek ir pačiame raketinio variklio korpuse. Didžiausi poslinkiai yra aptinkami ties kuro purkštuku, kur matomas 0,039 mm poslinkis. Variklio poslinkių vaizdas pateiktas 32 paveiksle.



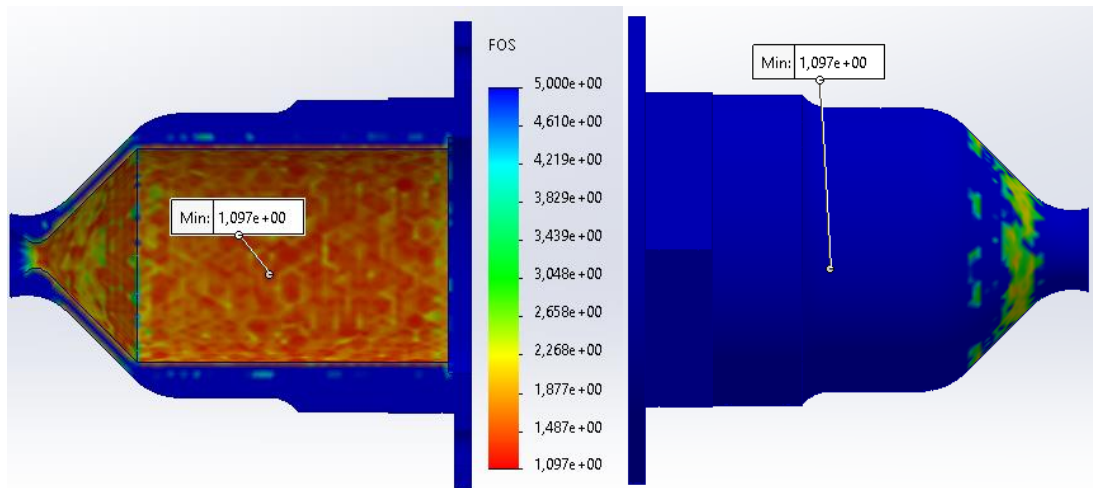
32 pav. Poslinkių pasiskirstymas (kairėje variklio išorė, dešinėje vidus)

Atsargos koeficientai *Solidworks* programinės įrangos pagalba buvo apskaičiuoti atskirai kiekvienam komponentui. Abiem atvejais susidarę įtempiai viršija medžiagų takumo ribą, todėl apskaičiuojant atsargos koeficientą, susidarę įtempiai buvo padalinti iš medžiagos stiprumo ribos. Mažiausias atsargos koeficientas vandenilio peroksido skilimo kameros dangelyje susidaro ties tvirtinimo skylėmis. Ten atsargos koeficientas yra lygus 1,1. Atsargos koeficientų pasiskirstymo vaizdas pateiktas 33 paveiksle.



33 pav. Atsargos koeficientų pasiskirstymas (dangtelio apačia dešinėje, viršus kairėje)

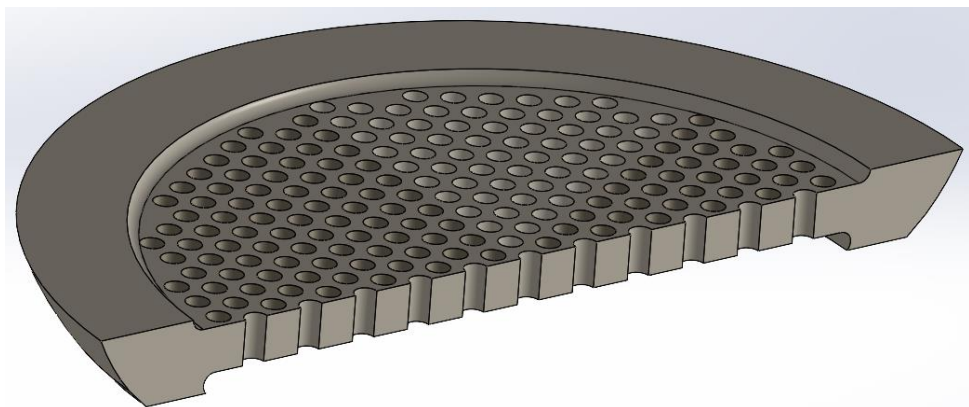
Kadangi didžiausi įtempiai yra aptinkami vandenilio peroksido skilimo kameros sienelėje, čia apskaičiuojamas mažiausias atsargos koeficientas – 1,09. Tokio dydžio atsargos koeficientas aptinkamas tik pačiame medžiagos paviršiuje esančiose įtempių koncentracijose. Atsargos koeficientų pasiskirstymo vaizdas pateiktas 34 paveiksle.



34 pav. Atsargos koeficientų pasiskirstymas (kamos vidus kairėje, išorė dešinėje)

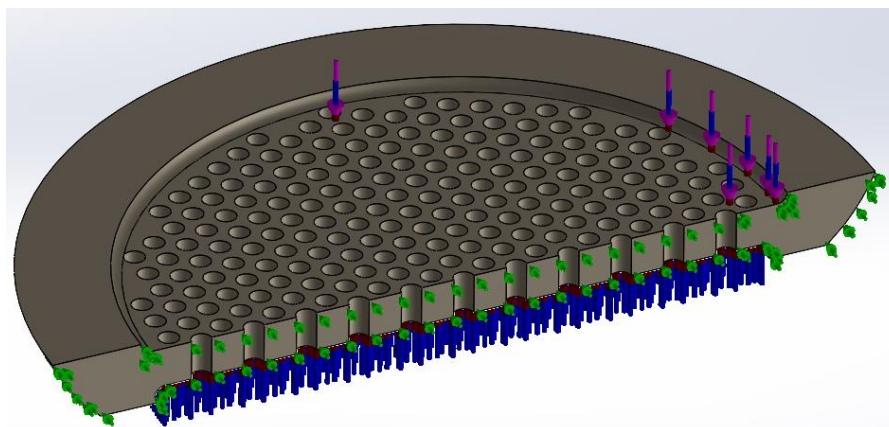
4.2. Katalizatoriaus sluoksnio pertvara

Trečioji (apatinė) katalizatoriaus sluoksnio pertvara patiria didžiausias apkrovas lyginant su kitomis dvejomis. Šioje variklio dalyje katalizatoriaus granulės yra spaudžiamos į pertvarą ir nėra prilaikomos iš kitos pusės, taip pat yra aptinkama didžiausia temperatūra ir didžiausi slėgio nuostoliai, lyginant tarp pertvarų. Supaprastintas modelis yra pasiekiamas pašalinant variklio tūtą ir visą viršutinę vandenilio peroksido skilimo kameros dalį. Siekiant spartesnių skaičiavimų, modelis taip pat yra padalinamas pusiau. Supaprastintas erdvinio modelio vaizdas yra pateiktas 35 paveiksle.



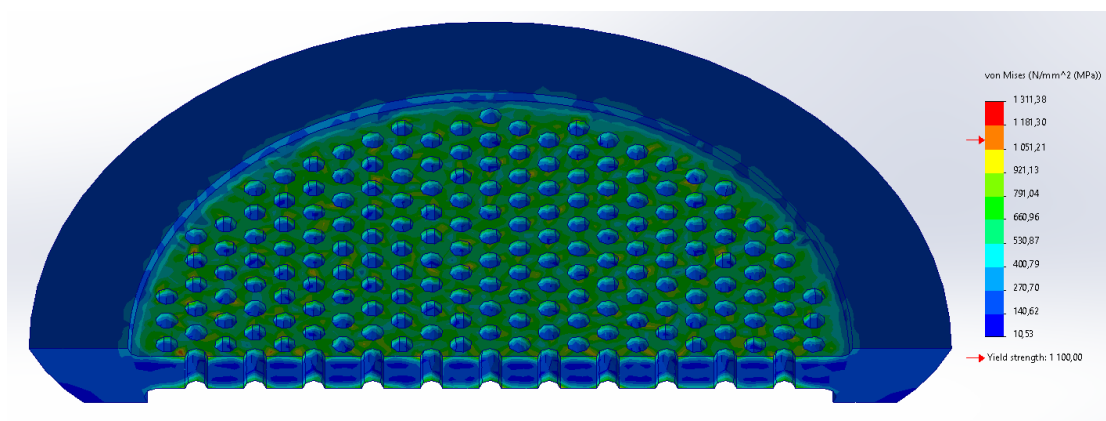
35 pav. Supaprastintas katalizatoriaus pertvaros erdvinio modelio vaizdas

Erdviniam modeliui yra priskiriama tokia pat medžiaga, kaip ir likusiai vandenilio peroksido skilimo kamrai – *Inconel* 718 lydiniui prilygstanti nestandartinė susikurta medžiaga pagal medžiagos savybes, prieinamas internete [57][58]. Modelis yra suvaržomas simetriškai. Kadangi realiomis sąlygomis ši raketinio variklio dalis gali gana laisvai deformuotis, prieš atliekant skaičiavimus statinės studijos nustatymuose buvo parinkta, kad skaičiavimai bus atliekami naudojant inercinį palengvinimą (angl. *inertial relief*). Ši funkcija padeda kompensuoti veikiančias jėgas, išlaikant detalę nejudančią. Suvaržius detalę, ant viršutinio katalizatoriaus pertvaros paviršiaus yra uždedama jėga – 0,5 N. Ši jėga apskaičiuojama padauginant slėgio kritimą per pertvarą iš pertvaros paviršiaus ploto. Ant viršutinio bei apatinio paviršių yra uždedama ir 925,5 K veikianti temperatūra. Parenkamas žemos kokybės baigtinių elementų tinklelis, kurio didžiausias elementas yra 5,21 mm dydžio ir mažiausias elementas – 0,38 mm. Baigtinių elementų tinklelį sudaro 77 006 elementai. Kraštinių sąlygų vaizdas pateiktas 36 paveiksle.



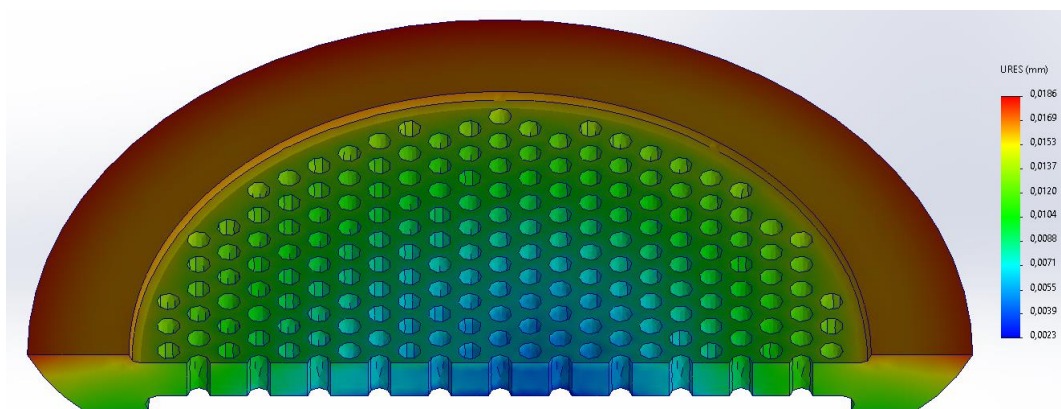
36 pav. Katalizatoriaus pertvaros kraštinės sąlygos

Atlikus stiprumo skaičiavimus buvo nustatyta, jog didžiausi susidarantys įtempiai yra 1,31 GPa. Šie įtempiai susidaro ant pertvaros apatinio paviršiaus, prie pertvaros skylės krašto. Realiomis sąlygomis tokia įtempių koncentracija susidaryti neturėtų. Įtempių pasiskirstymo vaizdas pateiktas 37 paveiksle.



37 pav. Katalizatoriaus pertvaros įtempių pasiskirstymas

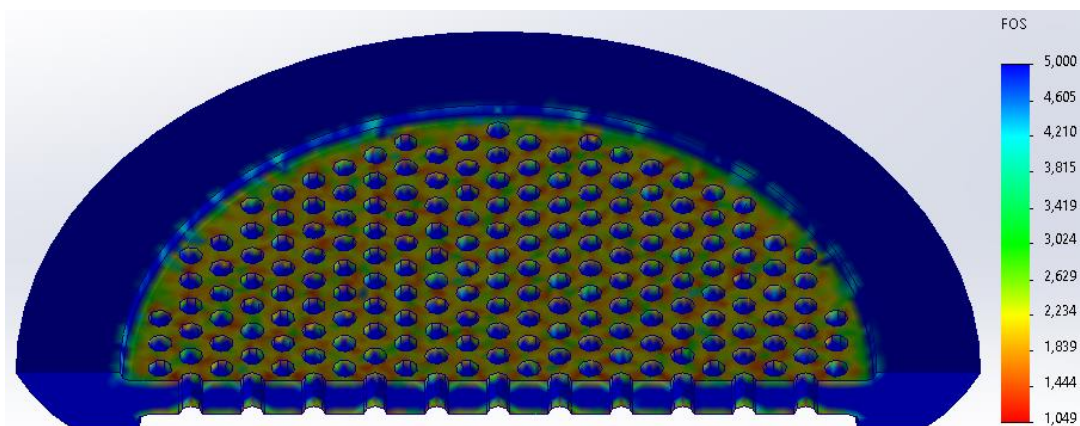
Pertvaros paviršius yra veikiamas aukštos temperatūros kartu su likusia vandenilio peroksido skilimo kamera pradeda plėstis iš centro į išorę. Todėl didžiausi poslinkiai yra 0,02 mm. Poslinkių pasiskirstymo vaizdas pateiktas 38 paveiksle.



38 pav. Katalizatoriaus pertvaros poslinkių pasiskirstymas

Katalizatoriaus pertvaros atsargos koeficientas buvo apskaičiuotas, susidariusius įtempius padalinus iš medžiagos stiprumo ribos. Tai buvo atliekama, dėl apskaičiuotų įtempių koncentracijos prie

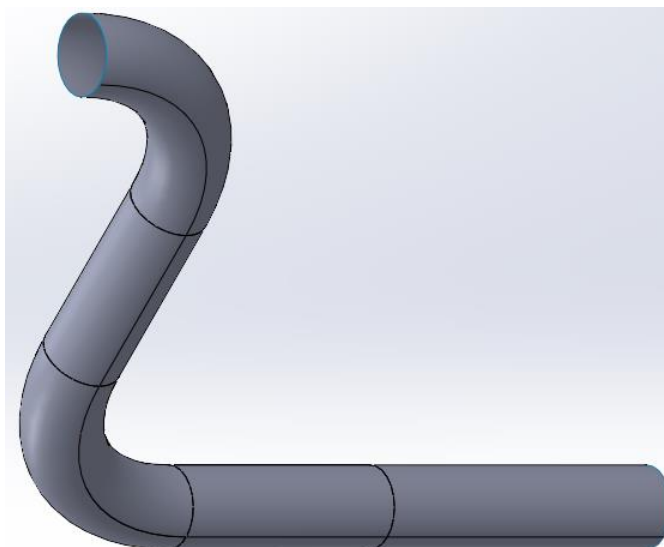
skylių kraštų. Šie įtempiai viršija parinktos medžiagos takumo ribą. Apskaičiuotas mažiausias atsargos koeficientas yra 1,05. Atsargos koeficientų pasiskirstymo vaizdas pateiktas 39 paveiksle.



39 pav. Katalizatoriaus pertvaros atsargos koeficiento pasiskirstymo vaizdas

4.3. Kapiliarinis vamzdelis

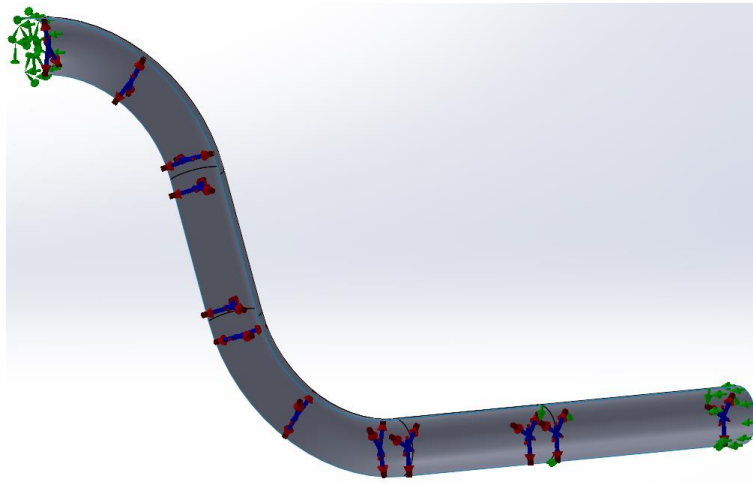
Sudarant kapiliarinio vamzdelio skaičiuojamąjį modelį buvo susidurta su problemomis naudojant tūrinį modelį. Dėl šios priežasties buvo nuspręsta stiprumo skaičiavimus atlikti naudojant kevalinį (angl. *surface*) erdvinį modelį. Kadangi vamzdelis yra simetriškas, siekiant greitesnių skaičiavimų, modelis buvo padalintas į dvi dalis. Šio modelio vaizdas yra pateiktas 40 paveiksle.



40 pav. Kapiliarinio vamzdelio kevalinis modelis

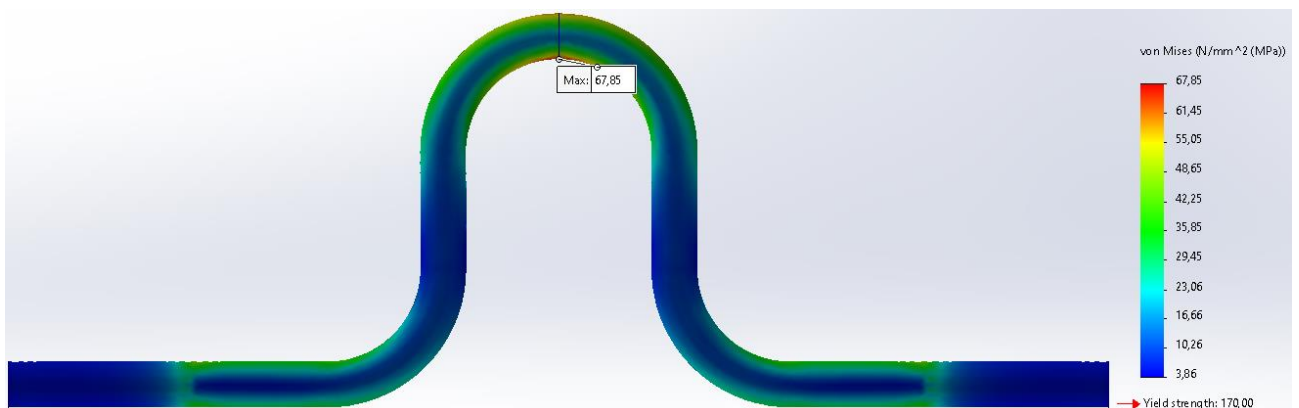
Kapiliariniam vamzdeliui priskirta medžiaga – AISI 316L nerūdijantis plienas iš *Solidworks* medžiagų bibliotekos. Sienuelės storis priskirtas 0,33 mm vamzdelio vidaus kryptimi. Kapiliarinis vamzdelis yra suvaržomas taip, kad negalėtų judėti tiesių segmentų atžvilgiu. Taip pat yra suvaržoma vamzdelio dalis, kuri bus įtvirtinama mechaniniu sujungimu. Šioje vietoje uždedamas sukimosi suvaržymas vamzdelio paviršiaus atžvilgiu. Simetrijos ašyje yra uždedamas simetrijos suvaržymas. Vamzdelio vidinis paviršius yra apkraunamas 2,3 MPa (23 bar) slėgiu ir 373 K (99,75 °C) temperatūra. Priskirtas aukštos kokybės baigtinių elementų tinklelis, kurį sudaro 1912 elementų.

Didžiausio elemento dydis – 0,42 mm, mažiausio – 0,14 mm. Modelio kraštinės sąlygos yra pavaizduotos 41 paveiksle.



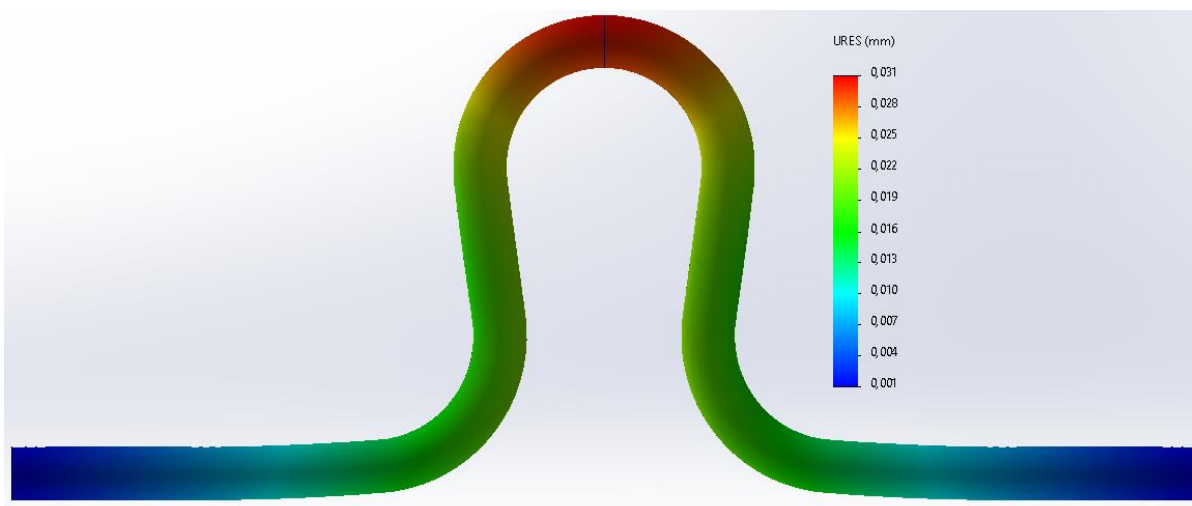
41 pav. Kapiliarinio vamzdelio kraštinių sąlygų vaizdas

Atlikus baigtinių elementų modelio skaičiavimus buvo gauta, jog didžiausi susidarę įtempiai yra aptinkami vamzdelio sulinkimo vidinėje pusėje. Šioje vietoje yra susidarę 67,85 MPa dydžio įtempiai. Įtempių pasiskirstymo vaizdas yra pateiktas 42 paveiksle.



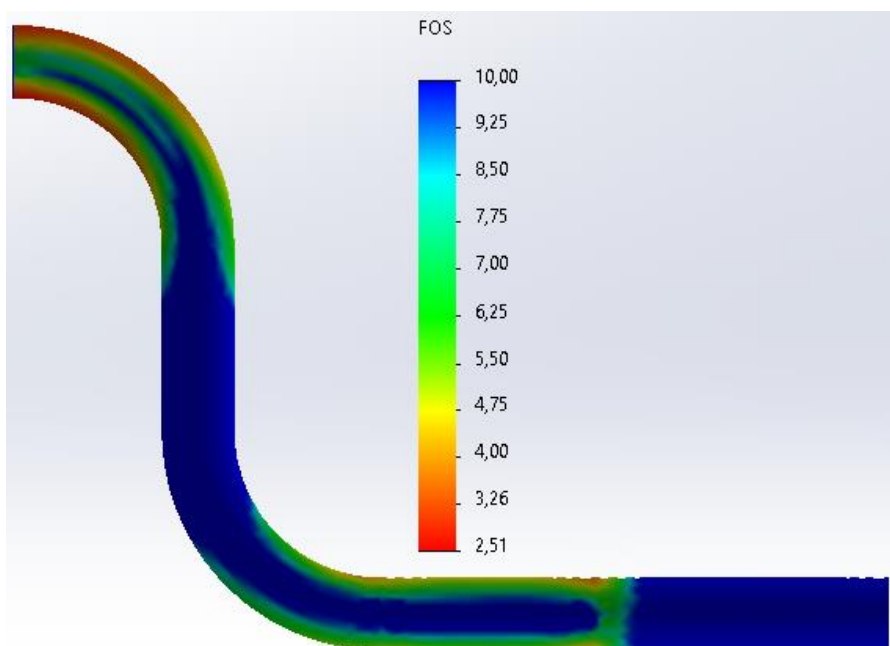
42 pav. Kapiliarinio vamzdelio įtempių pasiskirstymas

Kadangi vamzdelis nejudamai įtvirtintas abiejuose galuose, vamzdelis plečiasi per suprojektuotus išlinkimus. Pasak atliktų skaičiavimų, didžiausias poslinkis yra 0,031 mm. Kapiliarinio vamzdelio poslinkiai yra iliustruojami 43 paveiksle.



43 pav. Kapiliarinio vamzdelio poslinkių pasiskirstymas

Atsargos koeficientas buvo apskaičiuotas padalinant didžiausius įtempius apskaičiuotus pagal vonMises' o kriterijų padalinant juos iš nustatytos ribinės įtempių reikšmės. Šiuo atveju, buvo parinkta medžiagos takumo riba, kaip ribinė įtempių reikšmė. Apskaičiuotas mažiausias atsargos koeficientas yra 2,51. Atsargos koeficientų pasiskirstymo vaizdas yra pateiktas 44 paveiksle.



44 pav. Kapiliarinio vamzdelio atsargos koeficiento pasiskirstymas

5. Bandymų planas

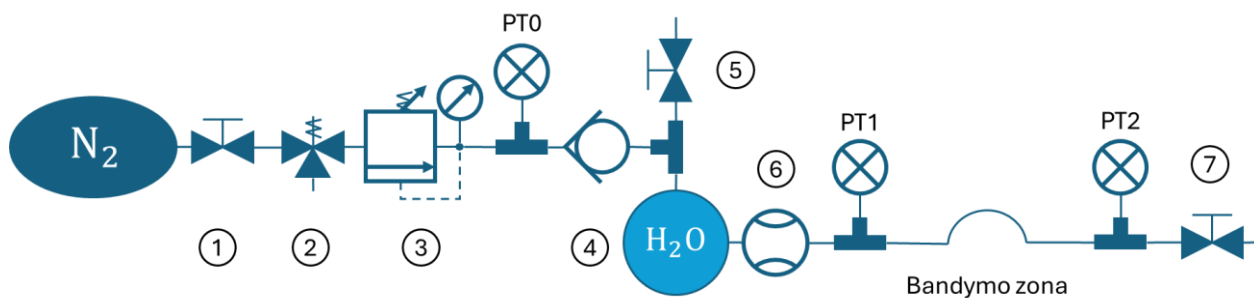
Siekiant patvirtinti projektuojamo raketinio variklio skaičiavimų rezultatus yra patartina atlikti įvairius bandymus. Raketinio variklio projektavimo metu buvo nuspręsta, jog aktualiausi bandymai būtų kuro padavimo sistemos bandymas ir raketinio variklio veikimo režimo bandymas.

5.1. Kuro padavimo sistemos bandymas

Atliekant bandymus su tekančiu kuru būtina suprojektuoti bandymų stendą, kuris veiktų analogiškai kuro padavimo sistemai, jau veikiančiame kosminiame prietaise. Žinoma, sistema gali būti supaprastinta bei lengvai valdoma rankiniu būdu. Kuras, varos jėgos sistemoje, gali būti paduodamas išpūtimo arba slėgio reguliuojamu metodais. Išpūtimo metodas (angl. *blowdown*) naudojamas, kai kosminis aparatas nereikalauja didelių orbitinių manevrų pajėgumo. Kuro bakai yra hermetizuojami tam tikru slėgiu ir per varos jėgos sistemoje esančius vožtuvus įleidžiamas į vandenilio peroksido skilimo kamerą. Išblėsus slėgiui kuro bakuose, kosminis aparatas pasiekia savo resursą [25]. Kitas būdas yra slėgio reguliavimas. Ši sistema sudėtingesnė ir dažnai aptinkama varos jėgos sistemose, kurios reikalauja didesnių orbitinių manevrų pajėgumo. Inertinės dujos (dažniausiai azotas arba helis), kurios būna laikomos atskiruose bakuose suteikia pastovų slėgį, kuris yra palaikomas slėgio regulatoriaus pagalba. Sistema veikia iki kol inertinių dujų bako esantis slėgis susivienodina su likusioje kuro sistemoje esančiu slėgiu [25].

Kuro padavimo sistemos bandymų metu būtų siekiama išmatuoti slėgio kritimo dydį tam tikrose kuro padavimo sistemos vietose, specifiskai susitelkiant į kapiliarinį vamzdelį bei kuro purkštuką. Siekiant užtikrinti didesnę kuro padavimo parametrų valdymą, siūloma atlikti antžeminius bandymus su slėgio reguliavimo metodu.

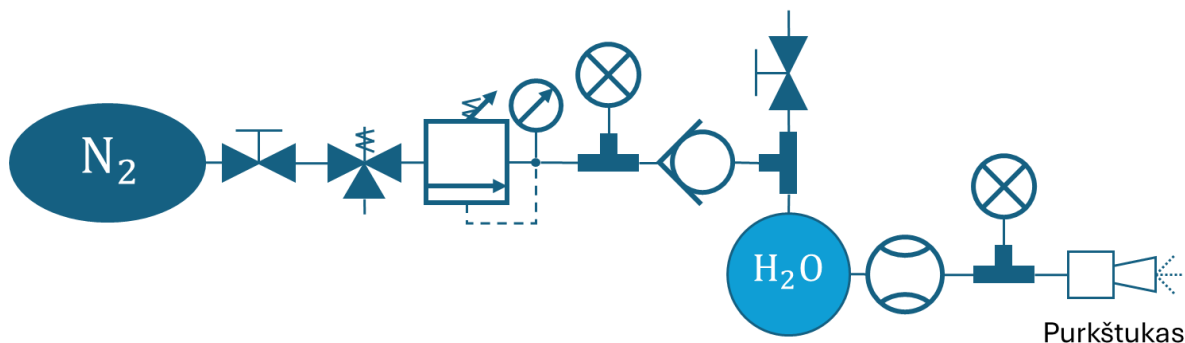
Siūloma bandymų stendo schema yra pateikiama 45 paveiksle.



45 pav. Kuro padavimo sistemos bandymų stendo schema

Schemoje matoma, jog inertinės dujos būtų patiekiamos per mechaninį slėgio regulatorių (3) į vandens baką. Patekiamų dujų slėgis būtų išmatuojamas slėgio jutikliu (PT0). Norint izoliuoti ar pakeisti dujų baką, būtų panaudojamas rankinis vožtuvas (1) ir apsauginis vožtuvas (2), kuris išlygintų, sistemoje likusį, slėgį su aplinkos slėgiu. Vandens bakas būtų pildomas per vandens įleidimo vožtuvą (5) ir, kad jis negalėtų tekėti į dujų padavimo dalį sistemoje, būtų panaudotas atbulinis vožtuvas (4). Suslėgtas vanduo pradėtų tekėti kapiliarinio vamzdelio link ir būtų išmatuojama jo tėkmė, pasinaudojant masės tėkmės jutikliu (6). Tada vanduo pasiektų bandymo zoną, kurioje būtų panaudojami įvairių išlinkimų kapiliariniai vamzdeliai ir slėgio jutiklių (PT1 ir PT2) pagalba būtų išmatuojamas slėgio kritimas. Vanduo pratekėjęs pro bandymų zoną ištekėtų per išleidimo vožtuvą (7), kuris gali būti uždarytas, esant poreikiui.

Analogiška kuro padavimo sistema gali būti panaudota ir tiriant kuro atomizavimą per kuro purkštuką. Slėgio kritimo bandymo zoną būtų galima pakeisti raketinio variklio purkštuku. Ši schema yra pateikiama 46 paveiksle.



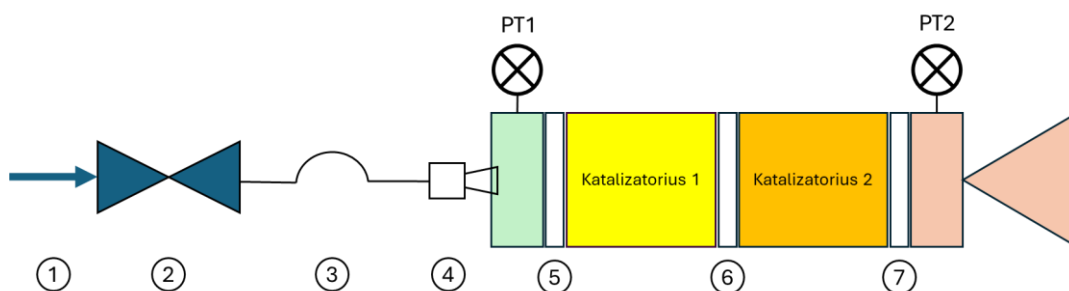
46 pav. Kuro purkštuko bandymų stendo schema

Stebint kuro atomizavimą, būtų galima išmatuoti kuro lašelio dydį. Pasinaudojant jutiklių duomenimis būtų apskaičiuotas tekančio skysčio Reynolds'o skaičius. Turint šiuos parametrus būtų galima nustatyti kuro Ohnesorge'o skaičių.

5.2. Veikimo režimo bandymas

Patvirtinus elementų parametrų skaičiavimus, kuro padavimo sistemos bandymais yra siūloma atlikti viso raketinio variklio veikimo režimo bandymus (angl. *Hotfire test*). Šių bandymų metu būtų išsiaiškinta ar projektuojamas raketinis variklis atitinka projektavimo metu numatomas variklio savybes.

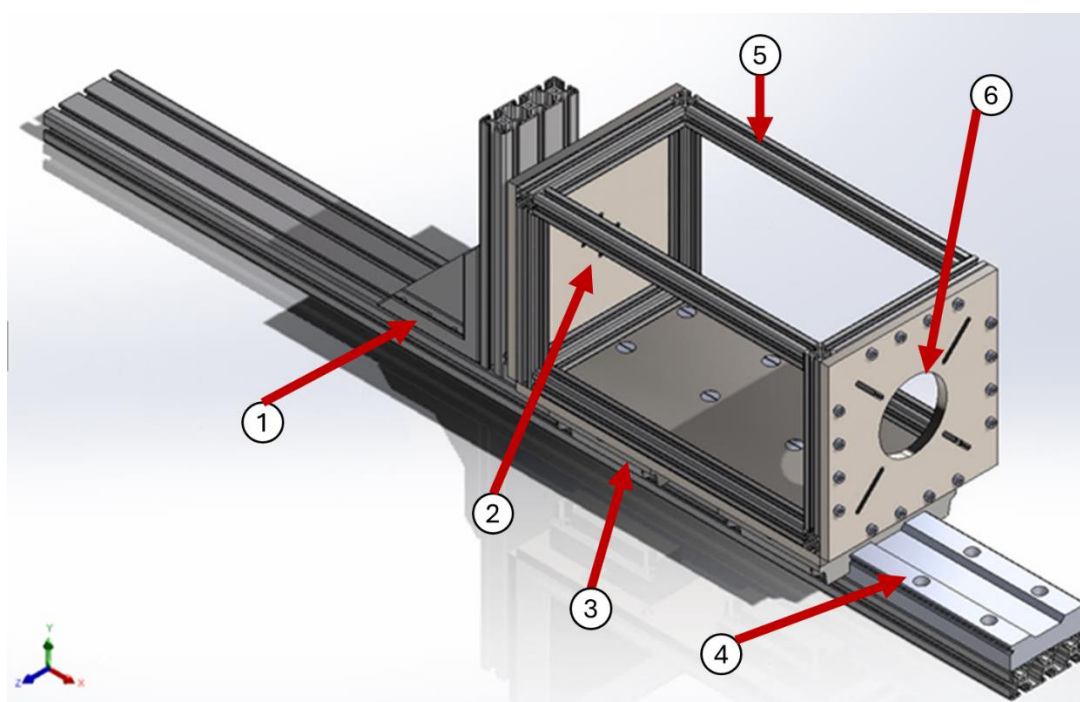
Atliekant bandymą būtų pasinaudota kuro padavimo sistema paminėta poskyryje 5.1, bandymo zoną pakeičiant projektuojamu raketiniu varikliu. Raketinio variklio tyrimo schema pateikta paveiksle 47. Bandymo metu, vanduo būtų pakeistas aukštos koncentracijos vandenilio peroksidu ir patiekiamas į raketinį variklį (1). Kuro padavimo vožtuvui (2) atsivėrus, kuras pratekėtų per kapiliarinį vamzdelį (3) į kuro purkštuką (4), kur vandenilio peroksidas būtų atomizuotas ir paleidžiamas į vandenilio peroksido skilimo kamerą. Tuščioje erdvėje tarp kuro purkštuko ir pirmosios katalizatoriaus pertvaros (5) būtų įtaisomas slėgio jutiklis (PT1). Kuras pratekėjęs per katalizatorių 1, katalizatoriaus pertvarą 2 (6) ir katalizatorių 2 skiltų, išskirtų karštį ir patirtų slėgio nuostolius. Skilimo reakcijos produktai, praėję per katalizatoriaus pertvarą 3 (7) ištekėtų pro raketinio variklio tūtą, kol zonoje tarp katalizatoriaus pertvaros ir raketinės tūtos būtų įtaisytas antrasis slėgio jutiklis (PT2). Išmatuojamų slėgių reikšmių skirtumas leistų patvirtinti slėgio kritimo skaičiavimus.



47 pav. Projektuojamo raketinio variklio tyrimo schema

Ant raketinio variklio paviršiaus taip pat būtų galima uždėti termoporų, skirtų išmatuoti raketinio variklio paviršiaus temperatūrą.

Siekiant išmatuoti raketinio variklio generuojamą traukos jėgą, variklis turėtų būti pritvirtinamas specialiame bandymu stende, kur variklis būtų suvaržytas taip, kad galėtų judėti tik generuojamos traukos jėgos vektoriaus kryptimi. Toks bandymų stendas turėtų linijinius guolius, prie kurių būtų pritvirtintas narvas skirtas laikyti kuro padavimo sistemos vamzdžiams bei pačiam varikliui. Variklis generuodamas trauką stumtų šį narvą atgal ir narvas būtų pritvirtintas prie apkrovos celės. Apkrovos celė, kurios veikimas yra paremtas tenzorezistorių veikimo principu, deformuotųsi ir pasikeitusių tenzorezistorių varža būtų prilyginama tam tikrai veikiančiai jėgai. Galimas raketinio variklio bandymų stendas yra pateiktas 48 paveiksle.



48 pav. Raketinių bandymų stendas

48-ame paveiksle pavaizduotą raketinių variklių bandymo stende pirmu numeriu yra pažymėta bandymų stendo statinė dalis. Ši dalis yra pritvirtinama nejudamai ir užtikrina, kad raketinio variklio generuojama trauka neišjudintų stendo iš vietos. Antruoju numeriu yra pažymėta apkrovos celės tvirtinimo vieta. Apkrovos celė tvirtinama prie stendo statinės dalies ir stendo narvo galinės plokštelės. Numeriu 3 yra pažymėti linijiniai guoliai, kurie leidžia stendo narvui (5) važinėti tik viena ašimi ant guolių bėgių (4). Raketinis variklis yra tvirtinamas prie priekinės narvo plokštės (6). Ant šios plokštės yra palikta skylė, per kurią bandomas raketinis variklis galėtų būti aprūpinamas kuru.

Išvados

1. Atlikus literatūros apžvalgą nustatyta, kad vienakomponenčio kuro raketiniai varikliai, naudojantys HTP, taikomi reakcijos kontrolės sistemose ir orbitinių manevrų atlikimui, o projektuojami varikliai pasižymi nedidele traukos jėga. Tokiuose varikliuose dažniausiai taikomas viengubas katalizatorius, tačiau pastebėtas matematinių modelių, apibūdinančių dvigubo katalizatoriaus veikimą, stygius. Todėl šiame darbe atliekamas egzistuojančių vidinės balistikos matematinių modelių pritaikymas dvigubai katalizatoriaus kamerai, o eksperimentinio 20 N traukos jėgos raketinio variklio modelis projektuojamas darbiniam slėgiui nuo 3 iki 15 barų, remiantis reikalavimų sąrašu.
2. Dvigubo katalizatoriaus atvejui buvo pritaikytas matematinis modelis, kuris yra sudarytas remiantis Koopmans'o ir kt. bei Fogler'io darbais. Apskaičiuotos vandenilio peroksido skilimo reakcijos spartos, susidariusios temperatūros bei slėgio kritimo reikšmės. Skilimo spartos bei temperatūros priklausomybių nuo katalizatoriaus ilgio grafikai yra artimi grafikams, pateiktiems Koopmans'o ir kt. straipsnyje. Slėgio kritimo grafikas skiriasi dėl dvigubo katalizatoriaus sluoksnio bei katalizatoriaus pertvaros įtakos slėgio pokyčiui. Didžiausia susidariusi temperatūra $T = 925,5$ K ir bendras slėgio kritimas $\Delta P = 16210$ Pa.
3. Remiantis vidinės balistikos matematinio modelio rezultatais buvo suprojektuotas raketinis variklis pagal nustatytus eksploatacinius reikalavimus. Projektavimo metu apibrėžiami visi variklio komponentai: parenkamos konstrukcinės medžiagos, kuro padavimo vožtuvas, kapiliarinis vamzdelis bei katalizatoriaus granulių medžiaga, o sandarumui užtikrinti – *Swagelok* mechaniniai sujungimai, specialūs srieginiai sujungimai ir metaliniai sandarinimo žiedai. Suprojektuota atmosferos slėgiui jūros lygyje pritaikyta raketinė tūta, kurios kaklelio skersmuo – 3,5 mm, o galinis skersmuo – 7,6 mm; kuro purkštuko skylės skersmuo – 0,84 mm. Apskaičiuotas bendras slėgio kritimas – 28,4 bar, o atitinkamas variklio įvadinis slėgis – 43,54 bar.
4. Atlikus stiprumo skaičiavimus naudojantis baigtinių elementų metodu, *Solidworks* aplinkoje, buvo nustatyta, jog visi tirti supaprastinti komponentai atlaikys jiems užduotas apkrovas. Didžiausios apkrovos, visiems komponentams susidaro ties įtempių koncentracijos vietomis. Tiriant raketinio variklio korpusą, modelis buvo apkrautas 925,5 K temperatūra ir 62,5 bar slėgiu. Tiek korpuso, tiek ir dangtelio atsargos koeficientai yra artimi 1,1. Katalizatoriaus pertvara yra veikama 925,5 K temperatūros ir 0,5 N jėgos. Apskaičiuotas katalizatoriaus atsargos pertvaros koeficientas yra 1,05. Kapiliarinis vamzdelis buvo apkrautas 2,3 MPa slėgiu ir 373 K temperatūra. Vamzdelio atsargos koeficientas – 2,51.

Literatūros sąrašas

1. THE EUROPEAN SPACE AGENCY. *Green propellants for space propulsion* [interaktyvus]. 2001 06 19 [žiūrėta 2026-03-11]. Prieiga per internetą: <https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Green_Propellant_for_Space_Propulsion>
2. CLARK, John D. *Ignition! An informal history of liquid rocket propellants*. New Brunswick, New Jersey: Rutgers University Press. 1972. – 231 p. ISBN: 0-8135-0725-1
3. URI, John. *95 Years Ago: Goddard's First Liquid-Fueled Rocket* [interaktyvus]. Johnson Space Centre. March 17, 2021 [žiūrėta 2026-03-11]. Prieiga per internetą: <<https://www.nasa.gov/history/95-years-ago-goddards-first-liquid-fueled-rocket/>>
4. DUNGAN, T. *A-4/V-2 Makeup - Tech Data & Markings* [interaktyvus]. V2 Rocket Site. [žiūrėta 2026-03-12]. Prieiga per internetą: <<https://www.v2rocket.com/start/makeup/design.html>>
5. NASA. *Propellant Storage and Distribution* [interaktyvus]. February 10 2001 [žiūrėta 2026-03-12]. Prieiga per internetą: <<https://web.archive.org/web/20010210010533/http://spaceflight.nasa.gov/shuttle/reference/shutref/orbiter/oms/storage.html>>
6. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *The Annual Compendium of Commercial Space Transportation: 2012* [interaktyvus]. February 2012 [žiūrėta 2026-03-12]. Nuoroda per internetą: <https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ast/media/The_Annual_Compendium_of_Commercial_Space_Transporation_2012.pdf>
7. THE EUROPEAN SPACE AGENCY. *Mars Express. Achievements* [interaktyvus]. 2003 12 26 [žiūrėta 2026-03-12]. Prieiga per internetą: <<https://www.esa.int/esapub/achievements/Sc72s8.pdf>>
8. THE EUROPEAN SPACE AGENCY. *Venus Express propellant loading completed* [interaktyvus]. 2005 10 04 [žiūrėta 2026-03-12]. Prieiga per internetą: <https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Venus_Express/Venus_Express_propellant_loading_completed>
9. RITZ, Beatre, ZHAO, Yingxu, KRISHNADASAN, Anusha, KENNEDY, Nola and MORGENSTERN Hal. Estimated effects of hydrazine exposure on cancer incidence and mortality in aerospace workers. *Epidemiology* [interaktyvus]. 2006 March 17. No. 2, 154-61. [žiūrėta 2026-03-12]. PMID: 16477255. Prieiga per internetą: <[10.1097/01.ede.0000199323.55534.fb](https://doi.org/10.1097/01.ede.0000199323.55534.fb)>
10. DAWN AEROSPACE. *Non-Toxic 'Green' Chemical Propulsion Thrusters* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-12]. Prieiga per internetą: <<https://www.dawnaerospace.com/thrusters>>
11. NANO AVIONICS. *Propulsion system EPSS C2. Technical Overview* [interaktyvus]. 2021 07 23 [žiūrėta 2026-03-12]. Prieiga per internetą: <https://satcatalog.s3.amazonaws.com/components/901/SatCatalog_-_NanoAvionics_-_EPSS_C2_-_Datasheet.pdf?lastmod=20210723064738>
12. MULKEY, Henry. W. and CARDIFF Eric. H. *Green Propulsion: A Nasa GSFC Assessment* [interaktyvus]. *NASA Goddard Space Flight Center, 8800 Greenbelt Rd, Greenbelt, Md 20771, U.S.A.* Glasgow, Scotland 20 – 23 May 2024 [žiūrėta 2026-03-12]. Prieiga per internetą: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20240004298/downloads/SP_2024_00239_20240410_Final.pdf>

13. KONGSBERG NANOAVIONICS. *NanoAvionics EPSS – The World's First Chemical Propulsion System for CubeSats* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-11]. Prieiga per internetą: <https://www.youtube.com/watch?v=_YOA2swigBw>
14. PANOZZO, Chiara. A., HÖRGER, Till., KIRCHBERGER, Christoph and SCHLECHTRIEM, Stefan. Nitrous Oxide Based Green Propellants: Fuel Selection and Miscibility Analysis Method [interaktyvus]. *German Aerospace Centre (DLR), Institute of Space Propulsion*. 11TH European Conference For Aeronautics And Space Sciences (Eucass). [žiūrėta 2026-03-13] Prieiga per internetą: <<https://www.eucass.eu/doi/EUCASS2025-208.pdf>>
15. DENGLER, Sascha, EBERT, Felix, MANFLETTI, Chiara, and LEICHTFUSS Sebastian. Water Electrolysis Propulsion In Cubesats: A Case Study [interaktyvus]. *Space Propulsion Conference At Estoril, Portugal*. 2022 [žiūrėta 2026-03-13]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/362309923_WATER_ELECTROLYSIS_PROPULSION_IN_CUBESATS_A_CASE_STUDY>
16. VENTURA M and MULLENS P. *The Use of Hydrogen Peroxide for Propulsion and Power* [interaktyvus]. General Kinetics, LLC. 19 June 1999 [žiūrėta 2026-03-13]. Prieiga per internetą: <https://www.hydrogen-peroxide.us/uses-monoprop-steam-generation/AIAA-1999-2880_The_Use_of_Hydrogen_Peroxide_for_Propulsion_and_Power-pitch.pdf>
17. WERNIMONT Eric J. System Trade Parameter Comparison of Monopropellants: Hydrogen Peroxide vs Hydrazine and Others [interaktyvus]. 9–12 July 2006 [žiūrėta 2026-03-13]. *42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Sacramento, California*. Prieiga per internetą: <https://www.hydrogen-peroxide.us/history-US-General-Kinetics/AIAA-2006-5236_hydrogen_peroxide_versus_hydrazine.pdf>
18. OKNINSKI, Adam, SURMACZ, Paweł, SOBCZAK, Kamil, FLORCZUK, Wojciech, CIEŚLIŃSKI, Dawid, GORGERI, Aleksander, BARTKOWIAK, Bartosz, KUBLIK, Dominik, RANACHOWSKI, Michal., ZBIGNIEW, Gut, PARZYBUT, Adrian, KASZTANKIEWICZ Anna Barbara, MAZUREK Jacek, VALENCIA, Ferran, HERBERTZ, Armin, UNDERHILL, Kate, SCHNEIDER, Dirk and FLOCK, Andreas. Development of Green Bipropellant Thrusters and Engines Using 98% Hydrogen Peroxide as Oxidizer [interaktyvus]. *Aerospace* 12(10):879. 2025 September [žiūrėta 2026-03-13]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/396041746_Development_of_Green_Bipropellant_Thrusters_and_Engines_Using_98_Hydrogen_Peroxide_as_Oxidizer>
19. NAMMO. *220N Monopropellant Thruster* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-14]. Prieiga per internetą: <<https://www.nammo.com/product/220n-h2o2-thruster/>>
20. ŁUKASIEWICZ INSTITUTE OF AVIATION. *IN monopropellant HTP thruster* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-14]. Prieiga per internetą: <<https://ilot.lukasiewicz.gov.pl/wp-content/uploads/2023/11/1-N-monopropellant-HTP-thruster-2-compressed.pdf>>
21. ARKADIA SPACE. *Monopropellant* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-14]. Prieiga per internetą: <<https://arkadiaspace.com/portfolio/monopropellant/>>
22. FRANKEN, Thim. *Design of a modular one Newton hydrogen peroxide monopropellant thruster, including feed system and test setup* [interaktyvus]. Master Thesis TU Delft – Aerospace Engineering. 2020 [žiūrėta 2026-03-14]. Prieiga per internetą: <<https://repository.tudelft.nl/record/uuid:611512d2-fb1c-41bb-ace0-fc9e77f5600f>>
23. URAS, Andrea. *Design and simulation of a 1N hydrogen peroxide monopropellant thruster* [interaktyvus]. Master Thesis. Politecnico Di Milano School of Industrial and Information

- Engineering. 2019 [žiūrėta 2026-03-14]. Prieiga per internetą: <https://www.politesi.polimi.it/retrieve/a81cb05d-beb4-616b-e053-1605fe0a889a/2020_06_Uras.pdf>
24. NISSAN, Dror. *Development and Testing of HTP Monopropellant Thruster for Space Applications* [interaktyvus]. University of Padova. March 2022 [žiūrėta 2026-03-14]. Prieiga per internetą: <https://cisas.unipd.it/sites/cisas.unipd.it/files/rp_34_Nissan_Dror_f.pdf>
 25. HONKAWA ROCKETRY. *Pressure Fed Rockets: Regulated vs. Blowdown* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-14]. Prieiga per internetą: <<https://www.honkawarocketry.com/propulsion-systems>>
 26. *X-15 Hypersonic Research Program*. Encyclopedia. Feb 28, 2014 [žiūrėta 2026-03-15]. Prieiga per internetą: <<https://www.nasa.gov/reference/x-15/>>
 27. KOOPMANS, Robert Jan, SHRIMPSON, John S., ROBERTS, Graham T. and MUSKER, Anthony J. A one-dimensional multicomponent two-fluid model of a reacting packed bed including mass, momentum and energy interphase transfer [interaktyvus]. *International Journal of Multiphase Flow*. Volume 57. 2013. Pages 10-28, [žiūrėta 2026-02-14]. ISSN 0301-9322. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.06.005>>
 28. FOGLER H. Scott. *Elements of Chemical Reaction Engineering* [interaktyvus]. Third Edition. Published by Asoke K. Ghosh, Prentice-Hall of India Private Limited, M-97, Connaught Circus, New Delhi-110001. 1999 – 967 p. [žiūrėta 2026-01-26]. ISBN-81: 203-2234-7. Prieiga per internetą: <https://madar-ju.com/storage/images/files/file_17385878671A62u.pdf>
 29. RICHARD NAKKA'S EXPERIMENTAL ROCKETRY WEB SITE. *Solid Rocket Motor Theory – Nozzle Theory* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-27]. Prieiga per internetą: <https://www.nakka-rocketry.net/th_nozz.html>
 30. ASPIRE SPACE. *The Thrust Optimised Parabolic nozzle. Technical papers by Rick Newlands* [interaktyvus]. 2017 04 18 [žiūrėta 2026-03-27]. Prieiga per internetą: <<http://www.aspirespace.org.uk/downloads/Thrust%20optimised%20parabolic%20nozzle.pdf>>
 31. RICHARD NAKKA'S EXPERIMENTAL ROCKETRY WEB SITE. *Solid Rocket Motor Theory – Thrust* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-27]. Prieiga per internetą: <https://www.nakka-rocketry.net/th_thrst.html>
 32. UTAH STATE UNIVERSITY. *Hydrogen Peroxide Rocketry: Use and Safety Manual. Chapter 7: H2O2 Material Compatibility* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-28]. Prieiga per internetą: <https://mae-nas.eng.usu.edu/Peroxide_Web_Page/chapter_7.html>
 33. INDUSTRIAL SPECIALTIES MFG. *Hydrogen peroxide compatibility chart* [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2026-03-28]. ISO 9001:2015. Prieiga per internetą: <<https://www.industrial-spec.com/images/files/hydrogen-peroxide-material-compatibility-chart-from-ism.pdf>>
 34. PARKER. *Pulse Valves. Ultra Low Leak Extreme Performance Valve* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-28]. Prieiga per internetą: <<https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Precision-Fluidics/Miniature-Solenoid-Valves/PulseValves.pdf>>
 35. FESTO. *Solenoid valve VZWD-B-L-M22C-M-G18-15-V-36-I-A1-80-R1* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-28]. Prieiga per internetą: <<https://www.festo.com/lt/en/a/8214498/>>
 36. DIRECT INDUSTRY. *Connect. Direct-operated solenoid valve P7129* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-28]. Prieiga per internetą: <<https://www.directindustry.com/prod/gevasol/product-243174-2623292.html>>

37. PARKER. *Series 99. Miniature High Speed and Pressure Gas Control Valve* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-28]. Prieiga per internetą: <<https://allsensors.eu/wp-content/uploads/2024/08/Series-99-Gas-datasheet.pdf>>
38. IDEL'CHIK I. E. *Handbook of Hydraulic Resistance. Coefficients of local resistance and of friction* [interaktyvus]. Israel Program for Scientific Translations, 1966 – 517 p. [žiūrėta 2026-03-29]. AEC-tr-6630. Prieiga per internetą: <<https://www.nrc.gov/docs/ML1220/ML12209A041.pdf>>
39. JAYANTI, Sreenivas. *Bends, Flow and Pressure Drop in* [interaktyvus]. Thermopedia. 2 February 2011 [žiūrėta 2026-03-29]. Prieiga per internetą: <<https://www.thermopedia.com/content/577/>>
40. SWAGELOK. *Swagelok tubing data sheet* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-30]. Prieiga per internetą: <<https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/en/ms-01-107.pdf>>
41. ESA. *A.6.3. Stainless Steel AISI 316L. Material properties* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-30]. Prieiga per internetą: <http://esmat.esa.int/Services/Preferred_Lists/Materials_Lists/a63.htm>
42. SWAGELOK. *Swagelok Tubing* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-03-30]. Prieiga per internetą: <<https://products.swagelok.com/en/all-products/tubing-tube-accessories/tubing/c/811?clp=true>>
43. HOWELL, GLEN. *Aerospace Fluid Component Designers' Handbook. Vol. I.* Redondo Beach CA: TRW Systems Group. 1970 – 87 p. [žiūrėta 2026-03-31]. RPL-TOR-64-25COY. Prieiga per internetą: <<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD0874542.pdf>>
44. BABCOCK AND WILCOX COMPANY. *Steam: Its Generation and Use* [interaktyvus]. Library of Congress Catalog Number: 92-74123 2005 – 1119 p. [žiūrėta 2026-03-31]. ISBN 0-9634570-1-2. Prieiga per internetą: <<https://www.rexresearch1.com/SteamLibrary/SteamItsGenerationUseStultz.pdf>>
45. FARDIN, Marc, HAUTEFEUILLE, Mathieu and SHARMA, Vivek. *Spreading, pinching, and coalescence: the Ohnesorge units* [interaktyvus]. Soft Matter, 2022, 18 (17), [žiūrėta 2026-03-31] pp.3291-3303. Prieiga per internetą: <<https://hal.science/hal-03795917/document>>
46. HEINZEN, Christoph, BERGER Andreas and MARISON Ian. W. *Use of Vibration Technology for Jet Break-Up for Encapsulation of Cells and Liquids in Monodisperse Microcapsules* [interaktyvus]. January 2004 [žiūrėta 2026-03-31]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-1638-3_14>
47. SUTTON, George P. and BIBLARZ Oscar. *Rocket propulsion elements* [interaktyvus]. Ninth Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2017 – 767 p. [žiūrėta 2026-04-01]. ISBN 9781118753880. Prieiga per internetą: <<https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/DESIGN%20SISTEM%20DAYA%20GERAK/Rocket%20Propulsion%20Elements.pdf>>
48. HAWE HYDRAULIK. *Pressure loss through an orifice* [interaktyvus]. Fluidlexikon. [žiūrėta 2026-04-01]. Prieiga per internetą: <<https://www.hawe.com/fluid-lexicon/pressure-loss-through-an-orifice/>>
49. HAIXIN – MOL. *Palladium catalyst* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-04-01]. Prieiga per internetą: <<https://www.hxmol.com/product/palladium-catalyst>>
50. GOLIJANEK-JĘDRZEJCZYK, Anna, MROWIEC, Andrzej, KLESZCZ, Sławosz, HANUS Robert, ZYCH, Marcin and JASZCZUR Marek. *A numerical and experimental analysis of multi-hole orifice in turbulent flow* [interaktyvus]. Measurement, Volume 193. 2022. 110910 [žiūrėta

2026-04-01]. ISSN 0263-2241. Prieiga per internetą:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224122001919>>

51. CASU, Santiago, GEIGER, Bastian, KIEMEL, Rainer, LESTRADE Jean-Yves and ANTHOINE Jérôme. Development and characterization of a catalyst for the decomposition of hydrogen peroxide [interaktyvus]. AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum. Indianapolis, United States. August 2019 [žiūrėta 2026-04-02]. Prieiga per internetą: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02320354>>
52. MERCK. *Particle Size Conversion Table* [interaktyvus]. [žiūrėta 2026-04-02]. Prieiga per internetą: <<https://www.sigmaaldrich.com/LT/en/support/calculators-and-apps/particle-size-conversion-table>>

Priedai

1 priedas. Reikalavimai projektuojamam varikliui

1. Raketinis variklis turi generuoti $20 \pm 10\%$ N traukos jėgą;
2. Raketinis variklis turi būti suprojektuotas veikti naudojant 98% koncentracijos vandenilio peroksida;
3. Raketinis variklis turi būti suprojektuotas veikti pulsavimo režimu;
4. Raketinio variklio tūta turi būti suprojektuota atsižvelgus į atmosferos slėgį jūros lygyje;
5. Minimalus I_{sp} vakuume turi būti 160 s.
6. Raketinio variklio operacinio slėgio režiai turi būti nuo 3 iki 15 bar;
7. Didžiausias numatomas darbinis slėgis MEOP (angl. *Maximum Expected Operating Pressure*) neturi būti didesnis nei 25 bar;
8. Stiprumo patikrinimo slėgis turi būti didesnis nei 1,5 karto MEOP;
9. Sprogimo slėgis turi būti didesnis nei 2,5 karto MEOP;
10. Raketinio variklio medžiagos turi būti suderinamos su didelės koncentracijos vandenilio peroksidu;
11. Raketinis variklis turi būti struktūriškai lankstus;
12. Variklis turi būti valdomas impulsiniu įjungimu ir išjungimu.
13. Turi būti parinktas impulsinis solenoidinis vožtuvas;
14. Raketinio variklio vožtuvas turi naudoti medžiagų suderinamumo klasės 2 medžiagas;
15. Užpildymo tūris tarp vožtuvo ir purkštuko turi būti minimalus;
16. Raketinis variklis turi gebėti užtikrinti minimalų impulsą per ne mažesnę, kaip 50 ms ir ne didesnę, kaip 100 ms laiko tarpą po signalo į vožtuvą padavimo;
17. Per ne daugiau kaip 100 ms turi būti atliekami šie veiksmai:
 - 17.1. Išsiunčiamas elektrinis signalas;
 - 17.2. Vožtuvas yra atveriamas;
 - 17.3. Raketinis kuras yra paduodamas;
 - 17.4. Skilimo reakcijos pagalba yra pasiekiamas 90% nominalaus darbinio slėgio/traukos;
18. Raketinis variklis turi būti atsparus garų kamščių (angl. *Vapour lock*) susidarymui;
19. Didžiausia rekomenduotina vandenilio peroksido temperatūra neturi viršyti vandenilio peroksido virimo temperatūros (150 °C prie 1 atmosferos slėgio borosilikato stiklo inde);

20. Šilumos pernaša turi būti minimali. Kuro padavimo vamzdeliai neturi įkaisti daugiau, kaip 25 °C žemiau vandenilio peroksido detonacijos (įskaitant katalitinius veiksnius);
21. Kuro purkštukas turi gebėti pakankamai atomizuoti paduodamą kurą;
22. Raketiniame variklyje turi būti numatytos vietos jutikliams;
23. Raketinio variklio gamyba turi būti įmanoma (jokių nerealių projektinių sprendimų);
24. Didžiausias kuro galimas nuotėkis per mechaninius sujungimus neturi būti didesnis nei 30 cm³/s He;

2 priedas. Vidinės balistikos matematinio modelio *Python* kodas

```
# HTP Skilimo Modelis
# Autoriai: Thim Franken; Ferran Valencia Bel
# 2020
#
# Modifikavo: Ažuolas Paulikas MDM-4/1
#
# Magistro darbui: Vandenilio peroksidu varomo raketinio variklio projektavimas ir
vidinės balistikos tyrimas
# Kauno Technologijos Universitetas
# 2026

''' Išvalyti konsolę '''
import os
valyti = lambda: os.system('cls')
valyti()

''' Pridėti bibliotekas '''
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

''' Funkcijų apibrėžimas '''
def entalpija(Medziaga, faze, temperatura): # [J] Entalpijos skaičiavimas
    temp_mastuotas = temperatura/1000

    if Medziaga == 'H2O2' and faze == 'D': # D = dujos (G)
        a_1 = 4.27611269E00; a_2 = -5.42822417E-04; a_3 = 1.67335701E-05
        a_4 = -2.15770813E-08; a_5 = 8.62454363E-12; b_1 = -1.77542989E04
        H =
(a_1+a_2*temperatura/2+a_3*temperatura**2/3+a_4*temperatura**3/4+a_5*temperatura**4/5+b
_1/temperatura)*R_universali*temperatura/1000

    elif Medziaga == 'H2O2' and faze == 'S': # S = skystis (L)
        H = -187.86+0.089377*(temperatura - 298.15) # [kJ/mol]

    elif Medziaga == 'H2O' and faze == 'D':
        if temperatura <= 1000:
            a = 3.947960830E+04; b = 5.755731020E+02
            c = 9.317826530E-01; d = 7.222712860E-03
            e = -7.342557370E-06; f = 4.955043490E-09
            g = -1.336933246E-12; H_c = -3.303974310E+04
        else:
            a = -1.034972096E+06; b = -2.412698562E+03
            c = 4.646110780; d = 2.291998307E-03
            e = -6.836830480E-07; f = 9.426468930E-11
            g = -4.822380530E-15; H_c = - 1.384286509E+04
        H =
(a/temperatura**2+b/temperatura*np.log(temperatura)+c+d*temperatura/2+e*temperatura**2/
3\
+f*temperatura**3/4+g*temperatura**4/5+H_c/temperatura)*R_universali*temperatura/1000
    else:
        if Medziaga == 'H2O' and faze == 'S':
            a = -203.6060; b = 1523.29; c = -3196.413
            d = 2474.455; e = 3.855326; f = -256.5478

        elif Medziaga == 'O2' and temperatura <= 700:
            a = 31.32234; b = -20.23531; c = 57.86644
            d = -36.50624; e = -0.007374; f = -8.903471

        elif Medziaga == 'O2' and temperatura > 700:
```

```

        a = 30.03235; b = 8.772972; c = -3.988133
        d = 0.788313; e = -0.741599; f = -11.32468
    H =
    a*temp_mastuotas+b*temp_mastuotas**2/2+c*temp_mastuotas**3/3+d*temp_mastuotas**4/4-
    e/temp_mastuotas+f
    return H

def silumos_talpa(Medziaga, faze, temperatura): # [J] Šiluminės talpos Cp skaičiavimas
    temp_mastuotas = temperatura/1000.
    if Medziaga == 'H2O2' and faze == 'S':
        rezultatas = 0.626*4.18*molinis_mases_HTP

    elif Medziaga == 'H2O2' and faze == 'D':
        a = 34.25667; b = 55.14445; c = -35.15443; d = 9.08744; e = -0.422157
        rezultatas =
        a+b*temp_mastuotas+c*temp_mastuotas**2+d*temp_mastuotas**3+e/temp_mastuotas**2

    elif Medziaga == 'H2O' and faze == 'S':
        a = -203.6060; b = 1523.29; c = -3196.413; d = 2474.455; e = 3.855326
        rezultatas =
        a+b*temp_mastuotas+c*temp_mastuotas**2+d*temp_mastuotas**3+e/temp_mastuotas**2

    elif Medziaga == 'H2O' and faze == 'D' and temperatura <= 1000:
        a = -3.947960830E+04; b = 5.755731020E+02; c = 9.317826530E-01; d =
        7.222712860E-03
        e = -7.342557370E-06; f = 4.955043490E-09; g = -1.336933246E-12
        rezultatas =
        (a/temperatura**2+b/temperatura+c*d*temperatura+e*temperatura**2+f*temperatura**3+g*tem
        peratura**4)*R_universali

    elif Medziaga == 'H2O' and faze == 'D' and temperatura > 1000:
        a = 1.034972096E+06; b = -2.412698562E+03; c = 4.646110780; d = 2.291998307E-03
        e = -6.836830480E-07; f = 9.426468930E-11; g = -4.822380530E-15
        rezultatas =
        (a/temperatura**2+b/temperatura+c*d*temperatura+e*temperatura**2+f*temperatura**3+g*tem
        peratura**4)*R_universali

    elif Medziaga == 'O2' and temperatura <= 700:
        a = 31.32234; b = -20.23531; c = 57.86644; d = -36.50624; e = -0.007374
        rezultatas =
        a+b*temp_mastuotas+c*temp_mastuotas**2+d*temp_mastuotas**3+e/temp_mastuotas**2

    elif Medziaga == 'O2' and temperatura > 700:
        a = 30.03235; b = 8.772972; c = -3.988133; d = 0.788313; e = -0.741599
        rezultatas =
        a+b*temp_mastuotas+c*temp_mastuotas**2+d*temp_mastuotas**3+e/temp_mastuotas**2
    return rezultatas

def klampumas_skystis(koncentracija, temperatura): # [Pa*s] Skysčio klampumo
skaičiavimas
    f = 13.41977711; e = 0.004703055; d = -0.054949
    c = 0.414061249; b = -27367.27532; a = 263.6414493
    g = -3.078536604
    klampumas_sk = np.exp(1/(a/temperatura+b/temperatura**2+c*np.log(temperatura)\
+d*koncentracija+e*koncentracija**2+f*koncentracija/temperatura+g))
    return klampumas_sk

def klampumas_dujos_grynos(medziaga, temperatura): # [Pa*s] Gryno dujų klampumo
skaičiavimas
    if medziaga == 'H2O2':
        if temperatura < 1000:
            a = 0.99686871; b = -0.41461068e2; c = 0.871729e4; d = -0.15770256e1

```

```

else:
    a = 0.57419481e0; b = -0.50408983e3; c = 0.48898234e5; d = 0.17621537e1
elif medziaga == 'H2O':
    if temperatura < 1000:
        a = 0.78387780E0; b = -0.38260408E3; c = 0.49040158E5; d = 0.85222785E0
    else:
        a = 0.50714993E0; b = -0.68966913E3; c = 0.87454750E5; d = 0.30285155E1
elif medziaga == 'O2':
    if temperatura < 1000:
        a = 0.61936357E0; b = -0.44608607E2; c = -0.13460714E4; d = 0.19597562E1
    else:
        a = 0.63839563E0; b = -0.12344438E1; c = 0.22885810E5; d = 0.18056937E1
klampumas = np.exp(a*np.log(temperatura)+b/temperatura+c/temperatura**2+d)*1e-7
return klampumas

def klampumas_dujos_misiny(temperatura, mol_frakcijos): # [Pa*s] Dujų mišinio klampumo
skaičiavimas
    rusiu_sarasas = ['H2O2', 'H2O', 'O2']
    kritines_temperaturos = [728, 647, 154.58] # [K] Kritinė temperatūra
    kritiniai_slėgiai = [220, 220.64, 50.43] # [Pa] Kritinis slėgis
    dipoliu_momentai = [2.26, 1.8546, 0] # [C*m] Dipolio momentas
    molines_mases = [34, 18, 32] # [kg/mol] Molinė masė
    redukuoti_dipoliai = []

    for i in range(len(rusiu_sarasas)):
        reduk_dip =
52.46*dipoliu_momentai[i]**2*kritiniai_slėgiai[i]/kritines_temperaturos[i]**2
        redukuoti_dipoliai.append(reduk_dip)

    dipoliu_matrica = np.zeros((len(rusiu_sarasas),len(rusiu_sarasas)))
    for i in range(len(rusiu_sarasas)):
        for j in range(len(rusiu_sarasas)):
            dipoliu_matrica[i][j] = (redukuoti_dipoliai[i]*redukuoti_dipoliai[j])**0.5

    gryni_klampumai = np.zeros(len(rusiu_sarasas))
    redukuotos_temperaturos = np.zeros(len(rusiu_sarasas))
    poliarumo_veiksniu = np.zeros(len(rusiu_sarasas))
    saveikos_nariai = np.zeros(len(rusiu_sarasas))
    susidurimo_integralai = np.zeros(len(rusiu_sarasas))
    maišymo_koeficientai = np.zeros(len(rusiu_sarasas))

    reduk_temp_matrica = np.zeros((len(rusiu_sarasas), len(rusiu_sarasas)))
    poliarumo_matrica = np.zeros((len(rusiu_sarasas), len(rusiu_sarasas)))
    saveikos_matrica = np.zeros((len(rusiu_sarasas), len(rusiu_sarasas)))

    for i in range(len(rusiu_sarasas)):
        gryni_klampumai[i] = klampumas_dujos_grynos(rusiu_sarasas[i],temperatura)
        redukuotos_temperaturos[i] = temperatura/kritines_temperaturos[i]
        poliarumo_veiksniu[i] =
(redukuotos_temperaturos[i]**3.5+(10*redukuoti_dipoliai[i])**7)\
/(redukuotos_temperaturos[i]**3.5*(1+(10*redukuoti_dipoliai[i])**7))
        saveikos_nariai[i] =
(1+0.36*redukuotos_temperaturos[i]*(redukuotos_temperaturos[i]-
1))**(1/6)*poliarumo_veiksniu[i]/(redukuotos_temperaturos[i]**0.5)
        susidurimo_integralai[i] =
molines_mases[i]**0.25/((gryni_klampumai[i]*saveikos_nariai[i])**0.5)

    for i in range(len(rusiu_sarasas)):
        for j in range(len(rusiu_sarasas)):
            reduk_temp_matrica[i][j] =
temperatura/((kritines_temperaturos[i]*kritines_temperaturos[j])**0.5)

```

```

        poliarumo_matrica[i][j] =
(reduk_temp_matrica[i][j]**3.5+(10*dipoliu_matrica[i][j])**7)\
        /(reduk_temp_matrica[i][j]**3.5*(1+(10*dipoliu_matrica[i][j])**7))
        saveikos_matrica[i][j] =
((molines_mases[i]*molines_mases[j])/(32*(molines_mases[i]+molines_mases[j]))\
        **3)**0.5*
(susidurimo_integralai[i]+susidurimo_integralai[j])**2*(1+0.36*reduk_temp_matrica[i][j]
*\
        (reduk_temp_matrica[i][j]-
1)**(1/6)*poliarumo_matrica[i][j]/(reduk_temp_matrica[i][j]**0.5)
        for i in range(len(rusiu_sarasas)):
            dalinis_sum = 0
            for k in range(len(rusiu_sarasas)):
                if k != i:
                    dalinis_sum +=
mol_frakcijos[k]*saveikos_matrica[i][k]*(3+(2*molines_mases[k]/molines_mases[i]))
                    maisymo_koeficientai[i] =
mol_frakcijos[i]*gryni_klampumai[i]/(mol_frakcijos[i]+gryni_klampumai[i]*dalinis_sum)
                    klampumas_mis = 0

        for i in range(len(rusiu_sarasas)):
            sum_zemesnis = 0
            for j in range(i):
                sum_zemesnis += saveikos_matrica[i][j]*maisymo_koeficientai[j]
            sum_kryzminis = 0
            for j in range(len(rusiu_sarasas)):
                for k in range(len(rusiu_sarasas)):
                    if j != i and k != i:
                        sum_kryzminis +=
saveikos_matrica[i][j]*saveikos_matrica[i][k]*maisymo_koeficientai[j]*maisymo_koeficien
tai[k]
                    klampumas_mis += maisymo_koeficientai[i]*(1+2*sum_zemesnis+sum_kryzminis)
        return klampumas_mis

def tankis_HTP_skystis(temp_skystis): # [kg/m^3] Skystojo HTP tankis
    rho_HTP_skystis = 1597+0.0784*temp_skystis-0.00197*temp_skystis**2
    return rho_HTP_skystis

def tankis_H2O_skystis(temp_skystis): # [kg/m^3] Skystojo vandens tankis
    r = [0.9998396, 0.018224944, -7.92221e-06, -5.544846e-08, 1.497562e-10, -3.932952e-
13, 0.018159725] # konstantos
    temp_celsijus = temp_skystis-273.15
    rho_H2O_skystis =
(r[0]+r[1]*temp_celsijus+r[2]*temp_celsijus**2+r[3]*temp_celsijus**3\
+r[4]*temp_celsijus**4+r[5]*temp_celsijus**5)/(1+r[6]*temp_celsijus)*1000
    return rho_H2O_skystis

def garo_slėgis(medziaga, temp_skystis): # [Pa] Garų slėgio skaičiavimas
    if medziaga == 'H2O':
        if temp_skystis < 363.15:
            koef = [24.8436, -3511.54, -4.61453, -3.60245E-3, -7.73423E-6, \
1.78355E-8, -2.27008E-13]
        else:
            koef = [38.8572, -3627.72, -11.2133, -4.74132E-3, 0, 0, 0]
    else:
        koef = [19.389127, -2861.9133, -3.2418662, -1.0799994E-4, \
-7.9189289E-6, 1.5411774E-8, -8.1926991E-12]

    log10_garo_sl =
koef[0]+koef[1]/temp_skystis+koef[2]*np.log10(temp_skystis)+koef[3]*temp_skystis\
+koef[4]*temp_skystis**2+koef[5]*temp_skystis**3+koef[6]*temp_skystis**4
    pvap = 10**log10_garo_sl

```

```

return pvap*133.32237

''' =====
      Inicijavimas
===== '''
global R_universali
R_universali = 8.314          # Universalioji dujų konstanta
pi = np.pi                  # Pi skaičius

molinis_mases_HTP = 34.015   # [g/mol] HTP molinė masė
molinis_mases_H2O = 18.015   # [g/mol] H2O molinė masė
molinis_mases_O2 = 31.999    # [g/mol] O2 molinė masė

temp_ref = 298.15; temp = temp_ref # [K] Pradinė temperatūra
slėgis = 15.967e5              # [Pa] Įtekėjimo slėgis

sluoksniio_ilgis = 0.05       # [m] Pasirinktas katalizatoriaus sluoksniio ilgis
masės_srautas = 0.0127       # [kg/s] Masės srauto greitis
sluoksniio_degradacija = 0    # [%] Katalizatoriaus sluoksniio degradacija
konc_HTP_pradzia = 0.98      # [-] Pradinė vandenilio peroksido koncentracija

kamosos_skersmuo = 0.032      # [m] Skaidymo kamosos skersmuo
sluoksniio_skerspjuvis = (pi*kamosos_skersmuo**2)/4 # [m^2] Katalizatoriaus sluoksniio
priekinė paviršiaus plotas

''' Du katalizatoriaus sluoksniiai '''
sluoksniio_padalijimo_poz = 0.10 * sluoksniio_ilgis # [-] Antrojo katalizatoriaus
pozicija

# 1-asis sluoksniis (smulkus)
granulės_skersmuo_1 = 1.0e-3
# [m] Katalizatoriaus granulės skersmuo
tuščios_frakcija_1 =
0.36+0.1*(granulės_skersmuo_1/kamosos_skersmuo)+(0.7*(granulės_skersmuo_1/kamosos_skers
muo)**2) # [%] Tuščios dalies frakcija sferinėms granulėms

# 2-asis sluoksniis (stambios granulės)
granulės_skersmuo_2 = 6.73e-3
# [m] Katalizatoriaus granulės skersmuo
tuščios_frakcija_2 =
0.36+0.1*(granulės_skersmuo_2/kamosos_skersmuo)+(0.7*(granulės_skersmuo_2/kamosos_skers
muo)**2) # [%] Tuščios dalies frakcija sferinėms granulėms

# Laikiklių geometrijos parametrai
skylių_skaičius = 367        # [-] Skylių skaičius laikiklėje
skylės_skersmuo = 1.0e-3    # [m] Skylės skersmuo
išleidimo_koef = 0.6286     # [-] Išleidimo koeficientas
laikiklio_tuščios_veiksn = 1.0 # [-] Laikiklio tuščio/atviro ploto koeficientas
laikiklio_skersmuo = kamosos_skersmuo # [m] Laikiklio skersmuo (lygus kamaiai)

laikiklio_dslėgis = 1.706e5  # [Pa] Katalizatoriaus laikiklio slėgio kritimas
laikiklis_pridėtas = False

''' Pradinės reikšmės '''
granulės_skersmuo = granulės_skersmuo_1 # [m] Katalizatoriaus granulės skersmuo
tuščios_frakcija = tuščios_frakcija_1   # [-] Tuščios dalies frakcija

kietoji_frakcija = 1. - tuščios_frakcija
# [-] Kietoji frakcija
specifinis_paviršius = 4*kietoji_frakcija/granulės_skersmuo
# [1/m] Katalizatoriaus sluoksniio sąsajos ploto konstanta

```

```

tallmadge_K = 150/granulės_skersmuo**2*kietoji_frakcija**2/(1-kietoji_frakcija)**3
# [-] Tallmadge lygties konstanta K
tallmadge_nj = 4.2/granulės_skersmuo**(7/6)*kietoji_frakcija**(7/6)/(1-
kietoji_frakcija)**3 # [-] Tallmadge lygties konstanta nj

''' Degalų pradinės sąlygos '''
konc_HTP_dujos_pradzia = konc_HTP_pradzia*slėgis/(R_universali*temp_ref) # [-] Pradinė
dujinio HTP koncentracija
konc_HTP_skystis_pradzia = (1.0479+2.455e-3*konc_HTP_pradzia*100+1.781e-
5*(konc_HTP_pradzia*100)**2-6.76e-4*(temp_ref-273.15)-2.4e-7*(temp_ref-273.15)**2-
3.98e-6*konc_HTP_pradzia*100*(temp_ref-273.15))*1.0e6/molinis_mases_HTP # [-] Pradinė
skystojo HTP koncentracija
konc_HTP_duj = konc_HTP_dujos_pradzia # [-] Dujinio HTP koncentracija
konc_HTP_sk = konc_HTP_skystis_pradzia # [-] Skystojo HTP koncentracija

molinis_mases_mis_pradzia = 1/(konc_HTP_pradzia/molinis_mases_HTP+(1-
konc_HTP_pradzia)/molinis_mases_H2O) # [kg/m^3] Bendros molinės masės pradinė sąlyga

''' Garų slėgio ir frakcijų pradinės sąlygos '''
pvap_HTP_pradzia = garo_slėgis('H2O2', temp_ref) # [Pa] HTP garų slėgis
pvap_H2O_pradzia = garo_slėgis('H2O', temp_ref) # [Pa] H2O garų slėgis
garų_frakcija_HTP_pradzia = pvap_HTP_pradzia / slėgis # [-] Pradinė HTP garų frakcija
garų_frakcija_H2O_pradzia = pvap_H2O_pradzia / slėgis # [-] Pradinė H2O garų frakcija
garų_frakcija_HTP = garų_frakcija_HTP_pradzia # [-] HTP garų frakcija
garų_frakcija_H2O = garų_frakcija_H2O_pradzia # [-] H2O garų frakcija

''' Entalpijų pradinės sąlygos '''
H_HTP_pradzia =
konc_HTP_pradzia/molinis_mases_HTP*molinis_mases_mis_pradzia*(garų_frakcija_HTP_pradzia
*(34.25667*(temp_ref/1000)+55.18445*(temp_ref/1000)**2/2-
35.15443*(temp_ref/1000)**3/3+9.08744*(temp_ref/1000)**4/4+0.422157/(temp_ref/1000)-
13.8034)+(1-garų_frakcija_HTP_pradzia)*(-187.86)) # [J] Pradinė HTP entalpija
H_H2O_sk_pradzia = entalpija('H2O', 'S', temp_ref) # [J] Pradinė skystojo vandens
entalpija
H_H2O_duj_pradzia = entalpija('H2O', 'D', temp_ref) # [J] Pradinė vandens garų
entalpija
H_H2O_pradzia = (garų_frakcija_H2O_pradzia * H_H2O_duj_pradzia + (1.-
garų_frakcija_H2O_pradzia) * H_H2O_sk_pradzia) * (1. - konc_HTP_pradzia) /
molinis_mases_H2O * molinis_mases_mis_pradzia # [J] Pradinė vandens entalpija

''' Modeliavimo parametrai '''
žingsnio_dydis = 0.0001 # [m] Žingsnio dydis

pos = 0; pozicijos = [0] # [m] Pradinė padėtis
konv_dujos = 0 # [%] Pradinis dujų konversijos koeficientas
konv_skystis = 0 # [%] Pradinis skysčio konversijos koeficientas
konversija = 0 # [%] Pradinis bendros konversijos koeficientas

''' =====
Duomenų registravimas
===== '''
konv_dujos_ist = [konv_dujos]; konv_skystis_ist = [konv_skystis]; konv_ist =
[konversija] # Konversijos
temp_ist = [temp]
# [K] Temperatūros
rxn_greitis_duj_ist = []; rxn_greitis_sk_ist = []
# [-] Reakcijos greičiai
Kc_duj_ist = []; Kc_sk_ist = []; Kt_duj_ist = []; Kt_sk_ist = []
# [-] Reakcijos greičiai
konc_HTP_duj_ist = []
# [-] Dujinio HTP koncentracija

```

```

kl_skystis_ist = []; kl_dujos_ist = []
# [Pa*s] Klampumai
rho_sk_ist = []; rho_duj_ist = []; rho_bend_ist = []
# [kg/m^3] Tankiai
greitis_ist = []
# [m/s] Greičiai
slėgis_ist = [slėgis]
# [Pa] Slėgiai
H_H2O_duj_ist = []; H_H2O_sk_ist = []; H_H2O_ist = []; H_O2_ist = []; H_delta_ist = []
# [J] Entalpijos
srautas_duj_ist = []; srautas_bend_ist = []; srautas_HTP_sk_ist = [];
srautas_HTP_duj_ist = [] # [mol/s] Srautai
srautas_H2O_ist = []; srautas_HTP_ist = []; srautas_H2O_duj_ist = []; srautas_O2_ist =
[] # [mol/s] Srautai
frakcija_sk_ist = []; frakcija_duj_ist = []
# [-] Skysčio/dujų frakcijos

''' =====
    Srauto pradinės sąlygos
    ===== '''
srautas_HTP_sk = konc_HTP_pradzia*masės_srautas*(1-
garų_frakcija_HTP_pradzia)*1000/molinis_mases_HTP;
srautas_HTP_sk_ist.append(srautas_HTP_sk) # [mol/s] Skystojo HTP srautas
srautas_HTP_duj =
konc_HTP_pradzia*masės_srautas*garų_frakcija_HTP_pradzia*1000/molinis_mases_HTP;
srautas_HTP_duj_ist.append(srautas_HTP_duj) # [mol/s] Dujinio HTP srautas
srautas_HTP = srautas_HTP_sk+srautas_HTP_duj; srautas_HTP_ist.append(srautas_HTP)
# [mol/s] HTP srautas
srautas_H2O = (1-konc_HTP_pradzia)*masės_srautas*1000/molinis_mases_H2O;
srautas_H2O_ist.append(srautas_H2O) # [mol/s]
Vandens srautas
srautas_H2O_sk = srautas_H2O*(1-garų_frakcija_H2O_pradzia)
# [mol/s] Skystojo H2O srautas
srautas_H2O_duj = srautas_H2O*garų_frakcija_H2O_pradzia;
srautas_H2O_duj_ist.append(srautas_H2O_duj)
# [mol/s] Dujinio H2O srautas
srautas_O2 = 0; srautas_O2_ist.append(srautas_O2)
# [mol/s] Deguonies srautas
srautas_duj = srautas_HTP_duj+srautas_H2O_duj+srautas_O2;
srautas_duj_ist.append(srautas_duj)
# [mol/s] Dujų mišinio srautas
srautas_sk = srautas_HTP_sk+srautas_H2O_sk; srautas_bend = srautas_duj+srautas_sk;
srautas_bend_ist.append(srautas_bend) # [mol/s] Skystojo
tirpalo srautas

mol_frakcija_H2O_sk = srautas_H2O_sk/srautas_sk; mol_frakcija_HTP_sk =
srautas_HTP_sk/srautas_sk; mol_frakcija_sk = srautas_sk/srautas_bend # [-]
Skystojo vandens molinė frakcija
mol_frakcija_HTP_duj = srautas_HTP_duj/srautas_duj; mol_frakcija_H2O_duj =
srautas_H2O_duj/srautas_duj; mol_frakcija_O2_duj = srautas_O2/srautas_duj # [-]
Dujinio HTP molinė frakcija
mol_frakcija_duj = srautas_duj/srautas_bend
# [-] Dujų molinė frakcija

molinis_mases_sk =
mol_frakcija_HTP_sk*molinis_mases_HTP+mol_frakcija_H2O_sk*molinis_mases_H2O
# [kg/mol] Skystojo mišinio molinė masė
molinis_mases_duj =
mol_frakcija_HTP_duj*molinis_mases_HTP+mol_frakcija_H2O_duj*molinis_mases_H2O+mol_frakc
ija_O2_duj*molinis_mases_O2 # [kg/mol] Dujų mišinio molinė masė

```

```

masės_frakcija_sk =
mol_frakcija_sk*molinis_mases_sk/(mol_frakcija_sk*molinis_mases_sk+mol_frakcija_duj*molinis_mases_duj);
frakcija_sk_ist.append(masės_frakcija_sk) # [-] Skysčio frakcija
masės_frakcija_duj =
mol_frakcija_duj*molinis_mases_duj/(mol_frakcija_sk*molinis_mases_sk+mol_frakcija_duj*molinis_mases_duj);
frakcija_duj_ist.append(masės_frakcija_duj) # [-] Dujų frakcija

masių_frakcija_H2O_sk =
mol_frakcija_H2O_sk*molinis_mases_H2O/(mol_frakcija_H2O_sk*molinis_mases_H2O+mol_frakcija_HTP_sk*molinis_mases_HTP) # [-] Skystojo H2O masės frakcija
masių_frakcija_HTP_sk =
mol_frakcija_HTP_sk*molinis_mases_HTP/(mol_frakcija_H2O_sk*molinis_mases_H2O+mol_frakcija_HTP_sk*molinis_mases_HTP) # [-] Skystojo HTP masės frakcija

rho_H2O_sk = tankis_H2O_skystis(temp) # [kg/m^3] Skystojo vandens tankis
rho_HTP_sk = tankis_HTP_skystis(temp) # [kg/m^3] Skystojo HTP tankis
rho_duj = slėgis/((R_universali*1000/molinis_mases_duj)*temp) # [kg/m^3] Dujų dalies tankis
rho_sk = 1/(masių_frakcija_H2O_sk/rho_H2O_sk+masių_frakcija_HTP_sk/rho_HTP_sk) # [kg/m^3] Skysčio dalies tankis
rho_bendras = 1/(masės_frakcija_sk/rho_sk+masės_frakcija_duj/rho_duj) # [kg/m^3] Bendras mišinio tankis

greitis = masės_srautas/(rho_bendras*sluoksniu_skerspjuvis*tuščios_frakcija) # [m/s] Greitis
greitis_duj_ist = [greitis]; greitis_ist = [greitis] # [m/s] Greičiai
visiškai_išgarinta = 0

''' =====
Pagrindinis ciklas
===== '''
pradetas = False
while pos < sluoksniu_ilgis:
    # Perjungti tarp sluoksnių
    if pos < sluoksniu_padalijimo_poz:
        granulės_skersmuo = granulės_skersmuo_1
        tuščios_frakcija = tuščios_frakcija_1
    else:
        granulės_skersmuo = granulės_skersmuo_2
        tuščios_frakcija = tuščios_frakcija_2

    ''' Pridėti laikiklio slėgio kritimą '''
    if not laikiklis_pridėtas:
        skylių_ploto_santykis =
        (skylių_skaičius*skylės_skersmuo**2)/laikiklio_skersmuo**2 # [m] Skylių ploto ir sluoksniu skerspjuvio santykis
        rho_laik = rho_bendras
        # [kg/m^3] Bendras mišinio tankis prie laikiklio
        tūr_srautas_laik = masės_srautas/rho_laik
        # [m^3/s] Tūrinis srautas prie laikiklio
        laikiklio_dSlėgis = (rho_laik/2)*((4*tūr_srautas_laik*np.sqrt(1-skylių_ploto_santykis**2))/(išleidimo_koef*laikiklio_tuščios_veiksn*skylių_skaičius*np.pi*skylės_skersmuo**2))**2 # [Pa] Laikiklio slėgio kritimas pagal angos lygtį
        slėgis -= laikiklio_dSlėgis
        laikiklis_pridėtas = True

# Perskaičiuoti priklausomus parametrus
kietoji_frakcija = 1-tuščios_frakcija
specifinis_paviršius = 4*kietoji_frakcija/granulės_skersmuo
tallmadge_K = 150/granulės_skersmuo**2*kietoji_frakcija**2/(1-kietoji_frakcija)**3

```

```

tallmadge_nj = 4.2/granulės_skersmuo**(7/6)*kietoji_frakcija**(7/6)/(1-
kietoji_frakcija)**3

if temp > 550:
    žingsnio_dydis = 0.000001
if pradetas == True:
    if temp == temp_ist[-2]:
        žingsnio_dydis = 0.01
pradetas = True

pos += žingsnio_dydis; pozicijos.append(pos)

''' SKAIDYMO REAKCIJOS SKAIČIAVIMAI '''
sk_plotas = specifinis_paviršius * masės_frakcija_sk # [m^2] Katalizatoriaus
reakcijos paviršiaus plotas
duj_plotas = specifinis_paviršius * masės_frakcija_duj # [m^2] Katalizatoriaus
reakcijos paviršiaus plotas

Kc_duj = 10*np.exp(-4.18e3/R_universali/temp)*duj_plotas*(1-sluoksniu_degradacija)
# [-] Reakcijos greičio konstanta
Kt_duj = 1.0e15*np.exp(-2e5/R_universali/temp)
# [-] Reakcijos greičio konstanta
Kc_sk = 2.6e4*np.exp(-52.5e3/R_universali/temp)*sk_plotas*(1-sluoksniu_degradacija)
# [-] Reakcijos greičio konstanta
Kt_sk = 6.3e5*np.exp(-71e3/R_universali/temp)
# [-] Reakcijos greičio konstanta
Kc_duj_ist.append(Kc_duj); Kc_sk_ist.append(Kc_sk)
Kt_duj_ist.append(Kt_duj); Kt_sk_ist.append(Kt_sk)

rxn_greitis_duj = -(Kc_duj+Kt_duj)*konc_HTP_duj # [-] Dujų reakcijos greitis
rxn_greitis_sk = -(Kc_sk+Kt_sk)*konc_HTP_sk # [-] Skysčio reakcijos greitis
rxn_greitis_duj_ist.append(rxn_greitis_duj);
rxn_greitis_sk_ist.append(rxn_greitis_sk)

if konversija == 1:
    rxn_greitis_duj = 0
    rxn_greitis_sk = 0

srautas_HTP_ankst = srautas_HTP_ist[-1]

d_srautas_HTP_duj = rxn_greitis_duj*sluoksniu_skerspjuvis*žingsnio_dydis # [mol/s]
Reakcijos suvartojimas
d_srautas_HTP_sk = rxn_greitis_sk*sluoksniu_skerspjuvis*žingsnio_dydis # [mol/s]
Reakcijos suvartojimas
d_srautas_HTP_duj = max(d_srautas_HTP_duj, -srautas_HTP_duj) # [mol/s]
d_srautas_HTP_sk = max(d_srautas_HTP_sk, -srautas_HTP_sk) # [mol/s]

d_srautas_HTP_bendras = d_srautas_HTP_duj+d_srautas_HTP_sk # [mol/s] Bendras
molinis nuostolis
d_konversija = -d_srautas_HTP_bendras/srautas_HTP_ist[0] # [mol/s] Konversijos
prieaugis (teigiamas)
konversija += d_konversija
konversija = min(konversija, 1)
konv_ist.append(konversija)

pvap_HTP = garo_slėgis('H2O2', temp) # [Pa] Atnaujintas HTP garų slėgis
pvap_H2O = garo_slėgis('H2O', temp) # [Pa] Atnaujintas vandens garų slėgis
if (pvap_HTP/slėgis) < 1:
    garų_frakcija_HTP = pvap_HTP/slėgis
else:
    garų_frakcija_HTP = 1
if (pvap_H2O/slėgis) < 1:

```

```

    garų_frakcija_H2O = pvap_H20/slėgis
else:
    garų_frakcija_H2O = 1

''' Frakcijos ir srautai '''
srautas_HTP = konc_HTP_pradzia*masės_srautas*1000/molinis_mases_HTP*(1-konversija)
# [mol/s] HTP molinis srautas
srautas_H2O =
srautas_H2O_ist[0]+konc_HTP_pradzia*masės_srautas*1000/molinis_mases_HTP*konversija #
[mol/s] H2O molinis srautas
srautas_O2 = konc_HTP_pradzia*masės_srautas*1000/molinis_mases_HTP*0.5*konversija
# [mol/s] Deguonies molinis srautas
srautas_HTP_ist.append(srautas_HTP); srautas_H2O_ist.append(srautas_H2O);
srautas_O2_ist.append(srautas_O2)
srautas_HTP_sk = srautas_HTP*(1-garų_frakcija_HTP) # [mol/s] Skystojo HTP molinis
srautas
srautas_HTP_duj = srautas_HTP*garų_frakcija_HTP # [mol/s] Dujinio HTP molinis
srautas
srautas_HTP_sk_ist.append(srautas_HTP_sk);
srautas_HTP_duj_ist.append(srautas_HTP_duj)
srautas_H2O_sk = srautas_H2O*(1-garų_frakcija_H2O) # [mol/s] Skystojo vandens
molinis srautas
srautas_H2O_duj = srautas_H2O*garų_frakcija_H2O # [mol/s] Vandens garų molinis
srautas
srautas_H2O_duj_ist.append(srautas_H2O_duj)
srautas_duj = srautas_HTP_duj+srautas_H2O_duj+srautas_O2 # [mol/s] Dujų mišinio
molinis srautas
srautas_sk = srautas_HTP_sk+srautas_H2O_sk # [mol/s] Skystojo mišinio
molinis srautas
srautas_bend = srautas_duj+srautas_sk # [mol/s] Bendro mišinio
molinis srautas
srautas_duj_ist.append(srautas_duj); srautas_bend_ist.append(srautas_bend)
if srautas_sk == 0 and visiškai_išgarinta == 0:
    visiškai_išgarinta = 1

frakcija_HTP =
(np.array(srautas_HTP_sk_ist)+np.array(srautas_HTP_duj_ist))/np.array(srautas_bend_ist)
frakcija_H2O = np.array(srautas_H2O_ist)/np.array(srautas_bend_ist)
frakcija_O2 = np.array(srautas_O2_ist)/np.array(srautas_bend_ist)

mol_frakcija_HTP_duj = srautas_HTP_duj/srautas_duj #
[-] Dujinio HTP molinė frakcija
mol_frakcija_H2O_duj = srautas_H2O_duj/srautas_duj #
[-] Dujinio H2O molinė frakcija
mol_frakcija_O2_duj = srautas_O2/srautas_duj #
[-] Deguonies molinė frakcija
duj_mol_frakcijos = [mol_frakcija_HTP_duj, mol_frakcija_H2O_duj,
mol_frakcija_O2_duj] # [-] Dujų molinės frakcijos
molinis_mases_duj =
mol_frakcija_HTP_duj*molinis_mases_HTP+mol_frakcija_H2O_duj*molinis_mases_H2O+mol_frakc
ija_O2_duj*molinis_mases_O2 # [kg/mol] Dujų molinė masė

if srautas_sk > 0:
    mol_frakcija_H2O_sk = srautas_H2O_sk/srautas_sk # [-] Skystojo H2O frakcija
    mol_frakcija_HTP_sk = srautas_HTP_sk/srautas_sk # [-] Skystojo HTP frakcija
    masių_frakcija_H2O_sk =
mol_frakcija_H2O_sk*molinis_mases_H2O/(mol_frakcija_H2O_sk*molinis_mases_H2O+mol_frakci
ja_HTP_sk*molinis_mases_HTP) # [-] Skystojo vandens masės frakcija
    masių_frakcija_HTP_sk =
mol_frakcija_HTP_sk*molinis_mases_HTP/(mol_frakcija_H2O_sk*molinis_mases_H2O+mol_frakci
ja_HTP_sk*molinis_mases_HTP) # [-] Skystojo HTP masės frakcija

```

```

        molinis_mases_sk =
mol_frakcija_HTP_sk*molinis_mases_HTP+mol_frakcija_H2O_sk*molinis_mases_H2O
# [-] Skysčio molinė masė
    else:
        mol_frakcija_H2O_sk = 0
        mol_frakcija_HTP_sk = 0
        masių_frakcija_H2O_sk = 0
        masių_frakcija_HTP_sk = 0
        molinis_mases_sk = 0

        mol_frakcija_sk_sraute = srautas_sk/srautas_bend # [-] Skysčio srauto molinė
frakcija
        mol_frakcija_duj_sraute = srautas_duj/srautas_bend # [-] Dujų srauto molinė
frakcija

        masės_frakcija_sk =
mol_frakcija_sk_sraute*molinis_mases_sk/(mol_frakcija_sk_sraute*molinis_mases_sk+mol_fr
akcija_duj_sraute*molinis_mases_duj); frakcija_sk_ist.append(masės_frakcija_sk) # [-]
Skysčio srauto masės frakcija
        masės_frakcija_duj =
mol_frakcija_duj_sraute*molinis_mases_duj/(mol_frakcija_sk_sraute*molinis_mases_sk+mol_
frakcija_duj_sraute*molinis_mases_duj); frakcija_duj_ist.append(masės_frakcija_duj) #
[-] Dujų srauto masės frakcija

        ''' Šiluma '''
        Cp_HTP_sk = silumos_talpa('H2O2', 'S', temp); Cp_HTP_duj = silumos_talpa('H2O2',
'D', temp) # [J/kg*K] Atnaujinta skystojo HTP šiluminė talpa
        Cp_H2O_sk = silumos_talpa('H2O', 'S', temp); Cp_H2O_duj = silumos_talpa('H2O',
'D', temp) # [J/kg*K] Atnaujinta skystojo H2O šiluminė talpa
        Cp_O2 = silumos_talpa('O2', 'D', temp)
# [J/kg*K] Atnaujinta deguonies šiluminė talpa

        H_H2O_duj = entalpija('H2O', 'D', temp) # [J] Atnaujinta vandens garų entalpija
        H_H2O_sk = entalpija('H2O', 'S', temp) # [J] Atnaujinta skystojo vandens
entalpija
        H_H2O_duj_ist.append(H_H2O_duj); H_H2O_sk_ist.append(H_H2O_sk)

        H_O2_atnauj = entalpija('O2', 'D', temp) # [J] Atnaujinta deguonies entalpija
        H_HTP_duj = entalpija('H2O2', 'D', temp) # [J] Atnaujinta dujinio HTP
entalpija
        H_HTP_sk = entalpija('H2O2', 'S', temp) # [J] Atnaujinta skystojo HTP
entalpija

        H_H2O_atnauj = garų_frakcija_H2O*H_H2O_duj+(1-garų_frakcija_H2O)*H_H2O_sk # [J]
Atnaujinta vandens entalpija
        H_HTP_atnauj = garų_frakcija_HTP*H_HTP_duj+(1-garų_frakcija_HTP)*H_HTP_sk # [J]
Atnaujinta HTP entalpija
        H_O2_ist.append(H_O2_atnauj); H_H2O_ist.append(H_H2O_atnauj)

        H_delta = (H_H2O_atnauj+0.5*H_O2_atnauj-H_HTP_pradzia+H_H2O_pradzia)*1000 #
[J/mol] Entalpijos pokytis
        H_delta_ist.append(H_delta)

        Cp_bendras =
(srautas_HTP_duj*Cp_HTP_duj+srautas_HTP_sk*Cp_HTP_sk+srautas_H2O_sk*Cp_H2O_sk+srautas_H
2O_duj*Cp_H2O_duj+srautas_O2*Cp_O2) # [J/(K*s)] Bendras mišinio šiluminis pajėgumas
        dTdl =
(rxn_greitis_duj+rxn_greitis_sk)*sluoksniu_skerspjuvis*tušcios_frakcija*H_delta/Cp_bend
ras
        temp += dTdl*žingsnio_dydis; temp_ist.append(temp)
        temp_pakoreguota = np.array(temp_ist)+224.23

```

```

''' Atnaujintos skysčio savybės '''
rho_H2O_sk = tankis_H2O_skystis(temp) # [kg/m^3] Atnaujintas skystojo
H2O tankis
rho_HTP_sk = tankis_HTP_skystis(temp) # [kg/m^3] Atnaujintas skystojo
HTP tankis
rho_duj = slėgis/((R_universali*1000/molinis_mases_duj)*temp) # [kg/m^3]
Atnaujintas dujų mišinio tankis
konc_HTP_duj = srautas_HTP_duj/(masės_frakcija_duj*masės_srautas/rho_duj);
konc_HTP_duj_ist.append(konc_HTP_duj) # [-] Dujinio HTP koncentracija
if srautas_sk > 0:
    rho_sk = 1/(masių_frakcija_H2O_sk/rho_H2O_sk +
masių_frakcija_HTP_sk/rho_HTP_sk) # [kg/m^3] Atnaujintas skystojo mišinio tankis
    rho_bendras = 1/(masės_frakcija_sk/rho_sk + masės_frakcija_duj/rho_duj)
# [kg/m^3] Atnaujintas bendras mišinio tankis
    konc_HTP_sk = srautas_HTP_sk/(srautas_sk*molinis_mases_sk/1000/rho_sk)
# [-] Skystojo HTP koncentracija
else:
    rho_sk = 0
    rho_bendras = rho_duj
    konc_HTP_sk = 0
    rho_bend_ist.append(rho_bendras); rho_sk_ist.append(rho_sk);
rho_duj_ist.append(rho_duj)

greitis = masės_srautas/(rho_bendras*sluoksniu_skerspjuvis*tuščios_frakcija);
greitis_ist.append(greitis) # [m/s] Skysčio greitis

if srautas_sk > 0:
    kl_skystis = klampumas_skystis(mol_frakcija_HTP_sk, temp) # [Pa*s] Atnaujintas
skysčio klampumas
else:
    kl_skystis = 0
if srautas_duj > 0:
    kl_dujos = klampumas_dujos_misiny(s(temp, duj_mol_frakcijos) # [Pa*s]
Atnaujintas dujų klampumas
else:
    kl_dujos = 0

kl_skystis_ist.append(kl_skystis); kl_dujos_ist.append(kl_dujos)

''' Slėgio kritimas '''
greitis_sk = greitis # [m/s] Skysčio greitis

if rho_sk > 0:
    rho_sk_efekt = max(rho_sk, 1e-6)
else:
    rho_sk_efekt = rho_duj
kl_sk_efekt = max(kl_skystis, 1e-6)

# Tallmadge lygtis
dP_sk =
tallmadge_K*kl_sk_efekt*greitis_sk+tallmadge_nj*rho_sk_efekt**(5/6)*greitis_sk**(11./6.
)*kl_sk_efekt**(1/6)
dP_duj =
tallmadge_K*kl_dujos*greitis_sk+tallmadge_nj*rho_duj**(5/6)*greitis_sk**(11/6)*kl_dujos
**(1/6)

if slėgis > 1e5:
    slėgis -= (dP_sk+dP_duj)*žingsnio_dydis
    slėgis_ist.append(slėgis)

''' =====
Braižymas

```

```

===== '''
print("\n=== Slėgio ir ilgio lentelė ===")
print(f"{'Ilgis [m]':>12} | {'Slėgis [bar]':>14} | {'ΔP žingsnis [bar]':>18}")
print("-" * 50)

for i in range(1, len(slėgis_ist)):
    L_dabar = pozicijos[i]
    P_dabar = slėgis_ist[i] / 1e5
    dP = (slėgis_ist[i-1] - slėgis_ist[i]) / 1e5

    print(f"{L_dabar:12.5f} | {P_dabar:14.5f} | {dP:18.5f}")

print("\nBendras ΔP per sluoksni: {:.4f} bar".format((slėgis_ist[0] - slėgis_ist[-1]) /
1e5))
print("\nMaksimali temperatūra sluoksnyje: {:.4f} K".format(temp_pakoreguota[-1]))

plt.figure()
plt.subplot(311)
plt.grid()
plt.plot(pozicijos, temp_pakoreguota)
plt.xlabel('Ilgis [m]')
plt.ylabel('Temperatūra [K]')
plt.title('Temperatūros priklausomybė nuo ilgio')

plt.subplot(312)
plt.plot(pozicijos, frakcija_HTP, label = 'HTP')
plt.plot(pozicijos, frakcija_H2O, label = 'H2O')
plt.plot(pozicijos, frakcija_O2, label = 'O2')
plt.xlabel('Ilgis [m]')
plt.ylabel('Molinė frakcija [-]')
plt.title('Molinių dalies priklausomybė nuo ilgio')
plt.legend()

rėžis = len(slėgis_ist)
pozicijos = pozicijos[:rėžis]
plt.subplot(313)
plt.plot(pozicijos, np.array(slėgis_ist)/1e5)
plt.xlabel('Ilgis [m]')
plt.ylabel('Slėgis [bar]')
plt.title('Slėgio priklausomybė nuo ilgio')
plt.show()

```

3 priedas. Įlinkio nuostolių koeficientai vamzdžiams [44]

