

ĮSIURBIMO KOLEKTORIAUS PAVIRŠIAUS TEKSTŪROS ĮTAKOS ORO SRAUTO PRALAIMUMUI TYRIMAS

Vytautas ŠUKEVIČIUS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: vytautas.sukevicius@vdu.lt

Audrius ŽUNDA, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: audrius.zunda@vdu.lt

Santrauka

Straipsnyje nagrinėjama įsiurbimo kolektoriaus vidinio paviršiaus tekstūros įtaka oro srauto pralaidumui, siekiant optimizuoti vidaus degimo variklių tūrinį efektyvumą. Tyrimo problema grindžiama poreikiu mažinti srauto pasipriešinimą įsiurbimo sistemoje naudojant biomimetinius sprendimus. Darbe taikytas skaitmeninio modeliavimo metodas: sukurti trys trimačiai (3D) modeliai su skirtingomis paviršiaus charakteristikomis – etaloninis modelis lygiu paviršiumi ir du modeliai su biomimetinėmis tekstūromis („ryklės odos“ ir „lotoso lapo“). Oro srauto dinamika, slėgio nuostoliai ir pasipriešinimo jėga analizuoti taikant skaičiuojamosios skysčių dinamikos (CFD) simuliaciją. Rezultatai atskleidė, kad priešingai nei tikėtasi, abi biomimetinės tekstūros padidino bendrą pasipriešinimo jėgą nuo 1,07 karto iki 1,26 karto, lyginant su etaloniniu modeliu. Nustatyta, kad netinkamas tekstūros mastelis veikia kaip papildomas paviršiaus šiurkštumas, sukeliantis srauto turbulenciją. Darbe pateikiamos rekomendacijos dėl tolesnio tekstūrų optimizavimo mikronų lygiu.

Reikšminiai žodžiai: įsiurbimo kolektorius, paviršiaus tekstūra, oro srauto pralaidumas, CFD simuliacija, biomimetika, ryklės odos tekstūra.

Įvadas

Šiuolaikinėje automobilių pramonėje, siekiant atitikti griežtėjančius „Euro 7“ emisijų standartus, esminis dėmesys skiriamas vidaus degimo variklių efektyvumo didinimui. Vienas iš pagrindinių variklio našumą ribojančių veiksnių yra įsiurbimo sistemos aerodinaminiai nuostoliai. Įsiurbimo kolektoriaus vidinio paviršiaus kokybė tiesiogiai veikia srauto trintį ir slėgio kritimą, o tai savo ruožtu lemia tūrinį efektyvumą ir degalų sąnaudas (Suhaimi et al., 2013).

Tradiciniai inžineriniai sprendimai dažniausiai apsiriboja paviršiaus poliravimu, siekiant maksimalaus lygumo. Tačiau gamtoje sutinkamos struktūros, pavyzdžiui, ryklės oda ar lotoso lapas, pasižymi unikaliomis hidrodinaminėmis savybėmis, kurios leidžia sumažinti trintį net ir esant dideliems greičiams (Bixler, Bhushan, 2013). Ryklės odos tekstūra, sudaryta iš mikroskopinių V formos briaunelių (ribletų), aviacijoje leidžia sumažinti srauto pasipriešinimą iki 5–8 %. Tuo tarpu lotoso lapo tekstūra vertinama dėl savo superhidrofobiškumo ir gebėjimo minimalizuoti kontaktinį plotą su skysčiu.

Šio tyrimo aktualumas grindžiamas poreikiu perkelti šiuos biomimetinius principus į automobilių įsiurbimo sistemas. Nors teorinės prielaidos žada pasipriešinimo mažinimą, praktinis pritaikymas ribotoje kolektoriaus geometrijoje reikalauja detalaus skaitmeninio modeliavimo.

Tyrimo tikslas – skaičiuojamosios skysčių dinamikos (CFD) metodu ištirti ir įvertinti biomimetinių paviršiaus tekstūrų („ryklės odos“ ir „lotoso lapo“) įtaką oro srauto pralaidumui ir dinaminėms savybėms įsiurbimo kolektoriuje.

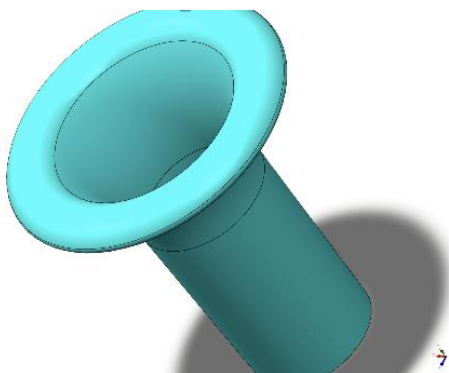
Iškeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Sukurti trijų konfigūracijų įsiurbimo kolektoriaus 3D modelius (lygų, su ryklės odos ribletais ir lotoso lapo papildomais) ir parinkti simuliacijos parametrus, atitinkančius realias variklio darbo sąlygas prie 20 m/s srauto greičio.
2. Kiekybiškai įvertinti ir palyginti slėgio kritimo ir bendros pasipriešinimo jėgos pokyčius tekstūruotuose modeliuose, lyginant su etaloniniu lygiu paviršiumi.
3. Ištirti paviršiaus tekstūros įtaką oro srauto greičio pasiskirstymui ir nustatyti srauto branduolio dinamikos pokyčius dėl sienelių šiurkštumo padidėjimo.

Tyrimų objektas ir metodai

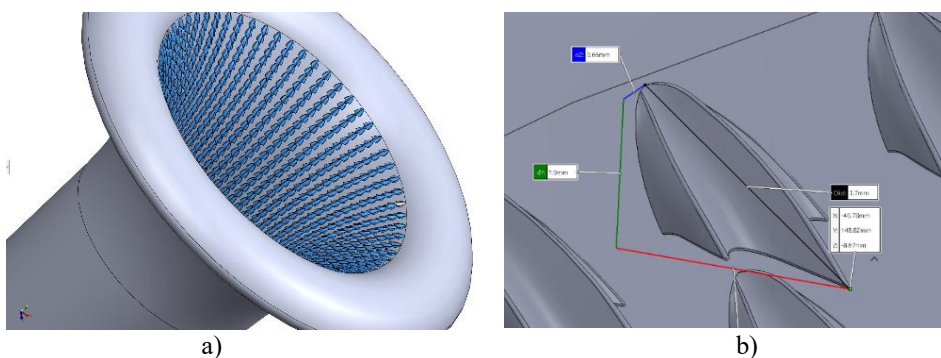
Tyrimas atliekamas naudojant skaitmeninio modeliavimo metodus, siekiant palyginti oro srauto elgseną standartiniame ir tekstūruotuose įsiurbimo kolektoriaus modeliuose.

Tyrimo objektas – įsiurbimo kolektorius (ortakis), kurios vidinio paviršiaus charakteristikos modifikuojamos naudojant biomimetinius principus. Tyrimui sukurti trys trimačiai (3D) modeliai. Kontrolinis modelis: standartinis kolektorius lygiu vidiniu paviršiumi. Šio modelio vaizdas pateiktas 1 paveiksle.



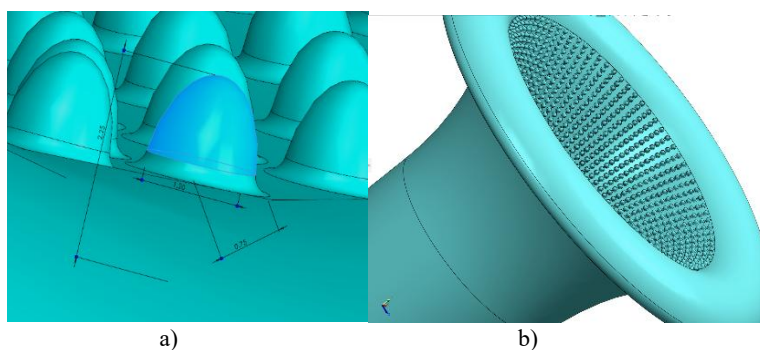
1 pav. Įsiurbimo kolektoriaus lygiu paviršiumi modelis
Fig. 1. The intake manifold flat surface model

Modelis su ryklio odos tekstūra (žr. 2 pav.): paviršius padengtas smulkiomis W formos briaunelėmis (ribletais), imituojančiomis trumpapelekio Mako ryklio (*Isurus oxyrinchus*) odos dantukus. Paviršius padengtas 60 juostų po 60 elementų vienodais atstumais (iš viso 3600 elementų ant paviršiaus).



2 pav. Įsiurbimo kolektoriaus su ryklio odos paviršiaus tekstūra modelis: bendras vaizdas a), „ryklio odos“ elemento vaizdas b)
Fig. 2. The intake manifold with shark skin surface texture model: general view a), view of the "shark skin" element b)

Modelis su lotoso lapo tekstūra (žr. 3 pav.): vidinis paviršius padengtas smulkiomis pusiau sferinėmis iškyšomis (papilomis), kurios imituoja lotoso (*Nelumbo nucifera*) lapų mikrostruktūrą. Paviršius padengtas 90 juostų po 90 elementų vienodais atstumais (iš viso 8100 elementų ant paviršiaus).



3 pav. Įsiurbimo kolektoriaus su lotoso lapo paviršiaus tekstūra modelis: bendras vaizdas a), „lotoso lapo“ elemento vaizdas b)
Fig. 3. The intake manifold with lotus leaf surface texture model: general view a), view of the "lotus leaf" element b)

Geometriniai modeliai sukurti naudojant SolidWorks programinę įrangą, taikant *Revolve*, *Loft* ir *Curve Driven Pattern* funkcijas tekstūroms ant išlenktų paviršių suformuoti.

Tyrimų metodika ir simuliacijos parametrai

Skaičiuojamosios skysčių dinamikos (CFD) analizė atlikta naudojant *ASUS ROG STRIX SCAR* nešiojamąjį kompiuterį su *Intel Ultra 9 275HX* procesoriumi, *RTX 5090 24 GB* vaizdo plokštė, *64 GB RAM* darbine atmintimi bei *Ansys Discovery Enterprise* programiniu paketu. Geometriniai *Solidworks* .sldprt failai prieš įkeliant į *Ansys Discovery Enterprise* buvo konvertuoti į šiai programai labiau tinkamus *STEP AP217* failus. Simuliacijoms pasirinktas interaktyvus skaičiavimo režimas (*Explore stage*), leidžiantis realiu laiku stebėti srauto dinamikos pokyčius.

Pagrindinės simuliacijos sąlygos:

- Darbinė terpė: oras (dujos).
- Kraštinės sąlygos (*Boundary Conditions*):
 - Įėjimo srauto greitis (*Flow Inlet*): 20 m/s.

- Išėjimo slėgis (*Flow Outlet*): 0 Pa (santykinis statinis slėgis).
- Sienelių sąlygos: stacionari sienelė (*Stationary Wall*) su specifiniu šiurkštumu, priklausomai nuo modelio tipo.
- Baigtinių elementų tinklas (*Mesh*):
 - Naudojamas didelio tankio tinklas, kurį sudaro nuo ~1,17 mln. iki ~1,39 mln. elementų ir virš 5–6 mln. plokštumų (priklausomai nuo tekstūros sudėtingumo). Toks detalumas užtikrina tikslų srauto elgsenos fiksavimą ties ribiniu sluoksniu.

Simuliacijos metu vertinami šie parametrai: maksimalus oro srauto greitis, slėgio kritimas, pasipriešinimo jėga.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Atlikta *CFD* simuliacija leido kiekybiškai įvertinti biomimetinių tekstūrų įtaką oro srauto charakteristikoms. Tyrimo rezultatai rodo, kad paviršiaus modifikacijos daro tiesioginę įtaką srauto greičiui ir pasipriešinimui (slėgio kritimui) įsiurbimo trakte.

Pagrindiniai simuliacijos duomenys pateikiami 1 lentelėje.

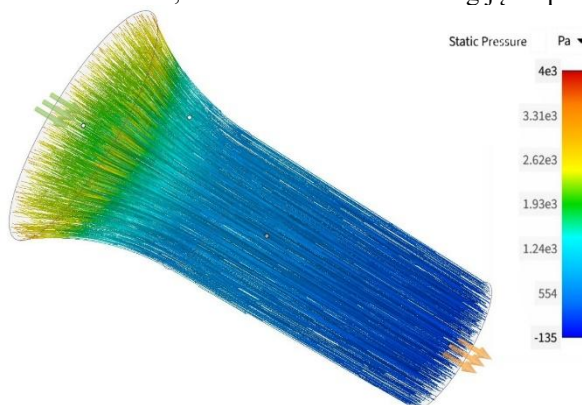
1 lentelė. Simuliacijos rezultatų palyginimas

Table 1. Comparison of simulation results

	Etaloninis be tekstūros <i>Plain</i>	Ryklės odos tekstūra <i>Shark skin</i>	Lotuso lapo tekstūra <i>Lotus leaf papillae</i>
Pasipriešinimo jėga, N <i>Total Drag Force, N</i>	0,00714 N	0,01619 N	0,01481 N
Slėgio kritimas, Pa <i>Pressure Drop, Pa</i>	167,90 Pa	367,97 Pa	403,44 Pa
Srauto debitas, m ³ /s <i>Volume Flow Rate, m³/s</i>	0,12646 m ³ /s	0,12644 m ³ /s	0,12617 m ³ /s
Maks. greitis, m/s <i>Max. velocity, m/s</i>	72,03 m/s	76,57 m/s	77,73 m/s

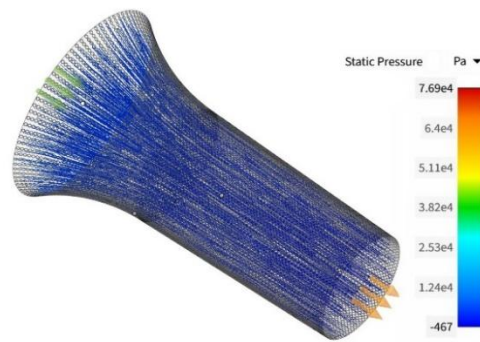
Priešingai nei tikėtasi, abi biomimetinės tekstūros padidino bendrą pasipriešinimo jėgą (angl. drag force), lyginant su lygiu paviršiumi: ryklės odos modelio pasipriešinimas išaugo apie 1,26 karto, o lotuso lapo tekstūros – apie 1,07 karto. *CFD* analizės kontekste tai rodo, kad tekstūros elementai buvo per dideli, lyginant su ribinio sluoksnio storium, todėl jie veikė ne kaip trinties mažinimo priemonė, o kaip paviršiaus šiurkštumas, padidinantis formos pasipriešinimą.

Etaloninis modelis pasirodė esąs energiškai efektyviausias, nes orui judėti užteko mažiausio slėgio skirtumo (167,90 Pa). Didžiausias slėgio kritimas užfiksuotas lotuso lapo tekstūros modelyje (403,44 Pa). Tai indikuoja, kad pusiau sferinės papilos sukūrė stiprius lokalius sūkurius, kurie išsklaidė srauto energiją ir apsunkino oro judėjimą traktu.

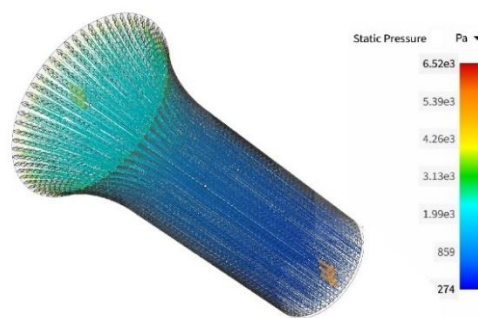


4 pav. Statinio slėgio vektoriai įsiurbimo kolektoriaus modelyje be tekstūros

Fig. 4. Static pressure vectors in the intake manifold model without texture



5 pav. Statinio slėgio vektoriai įsiurbimo kolektoriaus modelyje su lotuso lapo tekstūra
Fig. 5. Static pressure vectors in an intake manifold model with a lotus leaf texture



6 pav. Statinio slėgio vektoriai įsiurbimo kolektoriaus modelyje su ryklio odos tekstūra
Fig. 6. The intake manifold with shark skin surface texture model

Įdomu tai, kad nepaisant skirtingų tekstūrų, tūrinis srauto debitas visuose modeliuose išliko beveik identiškas ($\sim 0,126 \text{ m}^3/\text{s}$). Tai reiškia, kad tekstūros „neuždusina“ variklio įsiurbimo, tačiau dėl jų orą „įtraukti“ tampa sunkiau. Tekstūruotuose modeliuose stebimas šiek tiek didesnis maksimalus greitis ($76,57\text{--}77,73 \text{ m/s}$) rodo, kad tekstūros nustumia pagrindinį didelio greičio srauto branduolį toliau nuo sienelių.

Rekomendacijos tolesniam tekstūrų optimizavimui

Remiantis atlikta analize, nustatyta, kad pagrindinė neigiamų rezultatų priežastis – tekstūros mastelio neatitikimas srauto fizikinėms charakteristikoms. Siekiant praktinio trinties mažinimo efekto, rekomenduojama:

- **tekstūros aukščio optimizavimas:** ribletų ar papilų aukštis privalo neviršyti klampiojo ribinio sluoksnio storio (angl. *viscous sublayer*), kad elementai nesukeltų papildomos turbulencijos. Tolimesniuose tyrimuose rekomenduojama tekstūros mastelį mažinti nuo dabartinių milimetrinių reikšmių iki $50\text{--}150 \mu\text{m}$, derinant tai su specifiniu Reynoldso skaičiumi.

- **geometrinio išdėstymo tankis:** būtina eksperimentuoti su tekstūros elementų žingsniu, siekiant rasti balansą tarp paviršiaus sąlyčio ploto mažinimo ir sukuriavimo intensyvumo.

- **hibridinis modeliavimas:** rekomenduojama integruoti kintamo aukščio tekstūras tose kolektoriaus vietose, kur srauto greitis yra didžiausias (pvz., išlinkio vidinėje dalyje), taip lokalizuojant pasipriešinimo mažinimo efektą.

Išvados

1. Sėkmingai sukurti ir išbandyti trys skaitmeniniai modeliai su $\sim 1,39$ mln. elementų tinklu leido nustatyti, kad biomimetinės tekstūros iš esmės keičia oro srauto charakteristikas įsiurbimo trakte.

2. Nustatyta, kad ryklio odos tekstūra padidino pasipriešinimo jėgą 1,26 karto, o lotuso lapo tekstūra sukėlė didžiausią slėgio kritimą ($403,44 \text{ Pa}$), kas rodo, jog tekstūros elementai veikia kaip kliūtys, o ne kaip srauto stabilizatoriai.

3. Analizė parodė, kad nors tūrinis debitas išliko stabilus ($0,126 \text{ m}^3/\text{s}$), maksimalus srauto greitis tekstūruotuose modeliuose išaugo iki $7,9\%$, nes tekstūros „nustumia“ pagrindinį srauto branduolį toliau nuo sienelių, taip susiaurindamos efektyvųjų srauto kanalą.

Literatūra

1. Badr, A., Albahadili, S., & Jabbar, T. (2022). Experimental and theoretical study to improve the spark ignition engine performance. <https://doi.org/10.4108/cai.7-9-2021.2314807>

2. Bao, G. (2023). Influence of spiral airway structure parameters of dual-airway diesel engine on airway performance. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3457633/v1>
3. Birtok-Băneasă, C., Budiul-Berghian, A., Socalici, V., & Bucevschi, R. (2019). Simulation of thermal transfer through the polyamide intake manifold. *Materiale Plastice*, 56(1), 190–193. <https://doi.org/10.37358/mp.19.1.5149>
4. Bixler, G. D., & Bhushan, B. (2013). Fluid drag reduction with shark-skin riblet inspired microstructured surfaces. *Advanced Functional Materials*, 23, 4507–4528. <https://doi.org/10.1002/adfm.201203683>
5. Díez, G., Soto, M., & Blanco, J. M. (2015). Biological characterization of the skin of shortfin mako shark *Isurus oxyrinchus* and preliminary study of the hydrodynamic behaviour through computational fluid dynamics: Hydrodynamics of *Isurus oxyrinchus* skin. *Journal of Fish Biology*, 87, 123–137. <https://doi.org/10.1111/jfb.12705>
6. Ensikat, H. J., Ditsche-Kuru, P., Neinhuis, C., & Barthlott, W. (2011). Superhydrophobicity and surface aggregation of ethoxylated surfactants on *Nelumbo nucifera* and *Brassica oleracea* leaves. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2, 152–161. <https://doi.org/10.3762/bjnano.2.19>
7. Google. (2026). Gemini (1.5 Flash versija) [Didysis kalbos modelis]. <https://gemini.google.com> (Užklausa: „Sutvarkyti mokslinio straipsnio tekstą ir literatūros sąrašą pagal pateiktus simuliacijos rezultatus“, 2026 m. kovo 12 d.).
8. Pahmi, M., Mat, S., Nasruddin, A., Ismail, M., & Yusof, M. (2014). The analysis of intake manifold air stream velocity on different material roughness. *Applied Mechanics and Materials*, 661, 143–147. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.661.143>
9. Singh, A., Dubey, A., & Singh, R. (2018). To determine the effect of dimpled poppet valve on the flow in engine cylinder by port flow simulation. *MATEC Web of Conferences*, 221, Article 04009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822104009>
10. Suhaimi, S., Mamat, R., Abdullah, A., Aziz, A., & Abdullah, N. (2013). Investigation of intake flow rate and swirl motion of SI engine. *Applied Mechanics and Materials*, 465–466, 409–417. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.465-466.409>
11. Sulaiman, S., Murad, S., Ibrahim, I., & Karim, Z. (2010). Study of flow in air-intake system for a single-cylinder go-kart engine. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 1, 91–104. <https://doi.org/10.15282/ijame.1.2010.8.0008>
12. Valiavalappil, A. (2021). Numerical and computational fluid dynamics analysis of airflow in the air intake manifold of a 1.8 L engine with respect to different intake velocity. *Yanbu Journal of Engineering and Science*, 18(1). <https://doi.org/10.53370/001c.28092>
13. Zhang, C., Gao, M., Liu, G., Zheng, Y., Xue, C., & Shen, C. (2022). Relationship between skin scales and the main flow field around the shortfin mako shark *Isurus oxyrinchus*. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, Article 742437. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.742437>

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF INTAKE MANIFOLD SURFACE TEXTURE ON AIRFLOW PERMEABILITY

Abstract

This paper investigates the aerodynamic effects of biomimetic surface textures within an internal combustion engine's intake manifold using high-fidelity CFD simulations. Three models (Plain, Shark Skin texture, and Lotus leaf texture) were compared at an inlet velocity of 20 m/s. Results indicate that the biomimetic textures significantly increased total drag force (up to 1,26 times) and pressure drop (up to 403 Pa), acting as surface roughness rather than drag reducers. This suggests that the scale of the textures was too large relative to the boundary layer, leading to increased turbulence. Future research should focus on micro-scale optimization to achieve potential drag reduction benefits.

Keywords: intake manifold, surface texture, airflow permeability, CFD simulation, biomimetics, shark skin, lotus effect.