



Kauno technologijos universitetas

Cheminės technologijos fakultetas

**Oro srauto modeliavimas kompozitinėse mikro/nano
pluoštinėse filtrinėse medžiagose**

Baigiamasis magistro projektas

Gediminas Valenta

Autorius

Prof. Dainius Martuzevičius

Vadovas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Cheminės technologijos fakultetas

**Oro srauto modeliavimas mikro/nano kompozitinėse
pluoštinėse medžiagose**

Baigiamasis magistro projektas

Aplinkosaugos inžinerija (6211EX003)

Gediminas Valenta

Projekto autorius

Prof. Dainius Martuzevičius

Vadovas

Prof. Linas Kliučininkas

Recenzentas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Cheminės technologijos fakultetas

Gediminas Valenta

Oro srauto modeliavimas mikro/nano kompozitinėse pluoštinėse medžiagose

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasis 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;
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalintas iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Gediminas Valenta

Patvirtinta elektroniniu būdu

Valenta Gediminas. Oro srauto modeliavimas mikro/nano kompozitinėse pluoštinėse medžiagose. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. Dainius Martuzevičius; Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Aplinkos inžinerija (E03), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: oro srauto modeliavimas, filtravimas, nanopluoštas, mikropluoštas, kompozitinis pluoštas, baigtinio tūrio metodas.

Kaunas, 2023. 72 p.

Santrauka

Šiame baigiamajame projekte nagrinėjami naujausi mikropluoštų, nanopluoštų ir jų kompozitų taikymo oro filtravimo sistemose moksliniai tyrimai. Nagrinėjami įvairūs kompozitams tinkami pluoštai ir apžvelgiamos sudėtingos mikropluoštų ir nanopluoštų struktūrų morfologijos oro filtravimo srityje. Naudojant inžinerinę "SolidWorks 2022" programą, iš netvarkingų polipropileno gijų pluoštų buvo sukurtos trys skirtingos 3D struktūros, kurių kiekvienos ilgis – 1 mm, o skersmuo – 0,3 μm ir 3,0 μm atitinkamai. Skaitmeninė skysčių dinamikos analizės būdu, programoje esančios „Flow Simulation“ funkcijos, buvo analizuojamas oro srauto skverbimasis tarp šių gijų ir pagrindinių parametrų apskaičiavimas.

Buvo sukurtas labai tankus baigtinių elementų tinklelis, kad būtų galima tiksliai modeliuoti oro srautą per pluoštines medžiagas, užfiksuojant gijų apvalumą, smulkias detales, susikirtimus ir kitus paviršius. Parametrai buvo parinkti rankiniu būdu, o tinklelio generavimą atliko programinė įranga. Skaičiavimo laikas, priklausomai nuo konstrukcijos sudėtingumo, svyravo nuo kelių minučių iki kelių valandų. Skaičiavimams pagreitinti ir atlikti buvo naudojami keturi kompiuterinės įrangos įrenginiai. Matavimai buvo atliekami, kai įvesties paviršiaus greitis buvo 5,3 cm/s, o išvesties – 101325 Pa atmosferos slėgis. Atliekant išorinę analizę dėmesys skirtas laminarinių charakteristikų srautui, atsižvelgiant ir į gravitacijos poveikį. Skaičiavimo sritis ir baigtinių elementų tinklelis buvo optimizuoti atsižvelgiant į kompiuterinės įrangos galimybes, todėl skaičiavimai truko nuo kelių iki kelių dešimčių ar net šimtų valandų.

Pastebėti reikšmingi oro srauto skverbties skirtumai tarp mikropluoštų ir nanopluoštų gijų. Mikropluoštai pasižymėjo lokaliu turbulentiškumu savo paviršiuje, o tam tikrose vietose srautas sustojo. Tuo tarpu srautas aplink nanopluoštus pasižymėjo neslystančiu efektu. Priešingai nei tikėtasi, slėgio nuostoliai šiame tyrime svyravo tik nuo 0,3 iki 2,0 Pa. Paviršinis greitis filtro pradžioje gerokai sumažėjo, o vėliau visoje skaičiavimo srityje išlaikė 1 – 5 mm/s greitį.

Valenta Gediminas. Air Flow Modeling Within Composite Micro/Nano Fibrous Filter Materials. Master's Final Degree Project supervisor prof. Dainius Martuzevičius; Faculty of Chemical Technology, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Environmental Engineering (E03), Engineering Sciences.

Keywords: air flow modeling, filtration, microfiber, nanofiber.

Kaunas, 2023. 72 pages.

Summary

This final project examines recent research on the application of microfibers, nanofibers, and their composites in air filtration systems. Various fibers suitable for composites have been considered, and the complex morphologies of micro- and nano-fiber structures in air filtration are reviewed. Utilizing SolidWorks, three different 3D structures were created from disordered polypropylene filament fibers, each with a length of 1 mm and diameters of 0.3 μm and 3.0 μm . Numerical fluid dynamics analysis and FlowSimulation were employed to analyze the airflow penetration between these filaments and calculate the main parameters.

A suitable finite element mesh was generated to accurately simulate the airflow through the fibrous materials, capturing filament roundness, fine details, intersections, and other surfaces. The parameters were manually selected, and the software performed the mesh generation. The computational time ranged from minutes to several hours depending on the structural complexity. Four pieces of computer equipment were utilized for the calculations. The measurements were conducted with a surface velocity of 5.3 cm/s at the input and an atmospheric pressure of 101325 Pa at the output. The analysis focused on external flow with laminar characteristics, while considering gravity effects. The computational domain and finite element mesh were optimized based on the capabilities of the computer equipment, resulting in computation times ranging from a few hours to several dozen or even hundreds of hours.

Significant differences in airflow penetration were observed between the microfibers and nanofibers. The microfibers exhibited localized turbulence on their surface, causing flow stagnation in certain areas, while the flow around the nanofibers exhibited a non-slip effect. Contrary to expectations, the pressure loss in this study ranged only from 0.3 to 2.0 Pa. The surface velocity was substantially reduced at the beginning of the filter and then maintained a velocity of 1 to 5 mm/s throughout the computational domain.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų sąrašas	11
1. Literatūros apžvalga	13
1.1. Kietosios dalelės	13
1.2. Filtrų tipai	14
1.3. Filtravimo medžiagų tipai.....	15
1.3.1. Neaustinės medžiagos	16
1.3.2. Neaustinės kompozitinės medžiagos	20
1.3.3. Mikropluoštai ir nanopluoštai.....	20
1.4. Moksliniai tyrimai	22
1.4.1. Slėgio nuostoliai ir efektyvumo modelis [1]	22
1.4.2. Oro filtro SFD modeliavimas su nanopluoštu sustiprintomis medžiagomis [16]	24
1.4.3. Filtro efektyvumas kaip nanodalelių greičio ir formos funkcija [24].....	25
1.4.4. Nanopluošto ir mikropluošto kompozitinio filtro filtravimo savybės [32]	27
1.5. Literatūros apžvalgos apibendrinimas	29
2. Tyrimų metodika	30
2.1. Filtro pluoštinės medžiagos morfologinių savybių vertinimas	30
2.2. Skaičiuojamoji fluidų dinamika	30
2.3. Filtrinės struktūros modeliavimo metodika.....	33
2.4. „SolidWorks 2022“ programinė įranga	33
2.5. Naudota kompiuterinė įranga	35
2.6. Rezultatų apdorojimas	36
3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas.....	37
3.1. Struktūros paruošimas	37
3.2. Baigtinių elementų tinklo generavimas	42
3.3. Fluido savybių ir fizikinių aplinkybių apibrėžimas.....	46
3.4. Srities apibrėžimai ir kraštinės sąlygos	47
3.5. Lygčių skaičiavimai ir kontrolė.....	48
3.6. Rezultatų pateikimas ir vizualizavimas.....	49
3.6.1. Greičio rezultatai kontūriniuose skaičiuojamuosiuose skerspjūviuose	49
3.6.2. Slėgio rezultatai skaičiuojamuosiuose kontūriniuose skerspjūviuose.....	53
3.6.3. Srauto trajektorija	54
Išvados	57
Rekomendacijos.....	58
Literatūros sąrašas	59
Priedai.....	63
1 priedas. Neatitikimas bandant sujungti gijas ne toje pačioje plokštume, naudojant funkciją „Combine“	63
2 priedas. Neatitikimas bandant sujungti gijas ne toje pačioje plokštume, naudojant funkciją „Intersect“	64
3 priedas. Nanopluoštas iš 300nm diametro raitytų gijų	65

4	priedas. Nanoplušto gijų tarpusavio atstumų parinkimas.....	66
5	priedas. Struktūros patikrinimas su funkcija „patikrinti geometriją“	67
6	priedas. Baigtinio elemento tinklelio nustatymai	68
7	priedas. Programos persikrovimai, strigimai, funkcijų neveikimas.	69
8	priedas. Įrangos resursų naudojimas.....	70
9	priedas. Programos resursų naudojimo mažinimas	71
10	Priedas. Modeliavimo skaičiavimo laikas	72

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Įvairių pluoštų įvairūs parametrai.....	17
2 lentelė. Įvairių pluoštų įvairūs parametrai – 1 lentelės pratęsimas	18
3 lentelė. Naudotų filtrų savybės.....	23
4 lentelė. Sumodeliuoti ir išmatuoti slėgio nuostoliai.....	24
5 lentelė. Skverbties vertės, kai greitis 10,4 cm/s	25
6 lentelė. Skirtingų filtravimo mechanizmų dydžiai	26
7 lentelė. Mišrių nanoplušto ir mikroplušto filtrų fizinės savybės.....	28
8 lentelė. Duomenys apie polipropileną naudojami oro srauto modeliavimui.....	30
9 lentelė. Skaitmeninio modeliavimo (SFD) ir eksperimentinio metodo palyginimas.....	32
10 lentelė. Kompiuterinės sistemos reikalavimai atliekant tam tikro kompleksiško uždavinį „SolidWorks 2022“ programoje	34
11 lentelė. Darbo metu naudotų kompiuterių parametrai.....	36
12 lentelė. Skirtingų morfologijų filtrų charakteristika.....	40
13 lentelė. Trijų skirtingų sukurtų morfologijų tinklelio generavimo laikas, skaičiavimo elementų ir jų liečiančių paviršių bei iteracijų kiekis.....	46
14 lentelė. Modeliuojamo oro duomenys.....	47
15 lentelė. Formuojamo modelio įvedami pagrindiniai parametrai	48
16 lentelė. Sukurtų skirtingų filtrinių struktūrų modeliavimo skaičiavimo laikas ir gauti rezultatai	49

Paveikslų sąrašas

1 pav. Kietųjų dalelių klasifikacija ir dalelių šaltiniai [4].....	13
2 pav. $KD_{2.5}$ ir KD_{10} palyginimas su žmogaus plauku [11].....	14
3 pav. Kietųjų dalelių sulaikymo būdai [12].....	15
4 pav. Neaustinių medžiagų gamybos augimas Europoje nuo 2005 m. [1].....	16
5 pav. Įprastinių, mikropluoštų ir nanopluoštų skersmens palyginimas [3].....	21
6 pav. Nanovamzdelių palyginimas su kraujo kūneliu ir žmogaus plauku [3].....	21
7 pav. Filtravimo modelio schema. Kairėje - vienasluoksnis pluoštinis filtras, dešinėje - dvisluoksnis pluoštinis filtras. d – dalelės skersmuo.....	22
8 pav. Slėgio nuostolių priklausomybė nuo susidariusių nuosėdų kiekio.....	23
9 pav. Sudaryto modelio greičio modeliai [16].....	25
10 pav. Filtru efektyvumas kaip dalelių dydžio funkcija, kai srauto greitis 5 cm/s [24].....	26
11 pav. Filtru efektyvumas kaip dalelių dydžio funkcija, kai oro greitis 10 cm/s [24].....	27
12 pav. Filtru efektyvumas kaip dalelių dydžio funkcija, kai oro greitis 20 cm/s [24].....	27
13 pav. Nanopluoštų koncentracija prie mikropluošto. MF – nanopluošto maišymo frakcija [33] .	28
14 pav. „SolidWorks 2022“ 3D darbinė aplinka	34
15 pav. Suformuota 1 mm ilgio ir 3 μ m diametro gija μ m.....	37
16 pav. Suformuota 1 mm ilgio ir 300 nm diametro gija.....	38
17 pav. Suformuotas vieno sluoksnio mikropluoštas. Vaizdas iš viršaus.....	38
18 pav. Mikropluoštas po funkcijos „kombinuoti“. Vaizdas iš viršaus	39
19 pav. Suformuota nanopluoštas. Vaizdas iš viršaus	40
20 pav. Suformuota mikro-nano kompozitinė filtrinė struktūra, 0,45mm storio. Vaizdas iš viršaus	41
21 pav. Suformuota mikro-nano kompozitinė filtrinė struktūra, 0,138mm storio. Vaizdas iš viršaus	41
22 pav. Suformuota mikro-nano kompozitinė filtrinė struktūra, analogiška 1 paveikslėlyje, tik dvigubai storesnė – 0,276 mm. Vaizdas iš viršaus	42
23 pav. Baigtinių elementų tinklelio generavimas automatiškai būdu. Vaizdas iš priekio.....	42
24 pav. Automatiškai sugeneruoto baigtinio elemento tinklelio rezultatai. Kairėje kampe nurodyti 4 tinklelio lygmenys. Vaizdas iš priekio	43
25 pav. Baigtinio elemento tinklelio pavaizduoto 23 paveikslėlyje – greičio kitimo rezultatai. Vaizdas iš priekio	43
26 pav. Baigtinio elemento tinklelio rezultatai. Vaizdas iš priekio ir šono	44
27 pav. Baigtinio elemento tinklelio pavaizduotame 25 paveikslėlyje vizualas iš arčiau	45
28 pav. Baigtinių elementų tinklelis, sukurtas rankiniu būdu.....	45
29 pav. Baigtinio elemento tinklelio pavaizduoto 28 paveikslėlyje – vaizdas iš arčiau. Mikrogijų susikirtimo vieta ir dviejų nanogijų tinklelio kertami plotai	46
30 pav. Skaičiuojamosios srities dydžio pavaizdavimas filtro plote iš viršaus ir mastelis iš arčiau. 47	
31 pav. pavaizduotas skaičiuojamosios srities tūris per visą filtro storį. Vaizdas iš šono	48
32 pav. Greičio skerspjūvinis kontūras oro srauto įėjimo į filtrą pradžioje.....	50
33 pav. greičio skerspjūvinių kontūrų palyginimas, kai srautas teka iš dešinės į kairę oro srauto įėjimo į filtrą pradžioje: A – greičio skalėje aukščiausia riba 1 cm/s, B – greičio skalėje aukščiausia riba 0,5cm/s, C – greičio skalėje aukščiausia riba 0,1 cm/s. Kontūruose raudona spalva yra didžiausias greitis pagal nustatytą skalę, mėlyna žemiausias.	50
34 pav. Greičio pasiskirstymas skerspjūviniame kontūre prie mikrogijos, esančios filtro viduriniame sluoksnyje. Greičio skalėje aukščiausia riba 1 cm/s.....	51

35 pav. Greičio pasiskirstymas skerspjūviniame kontūre prie nanogijų oro srauto įėjime į filtrą pradžioje, kai greičio skalėje aukščiausia riba 1 cm/s	51
36 pav. Greičio pasiskirstymas skerspjūviniame kontūre, aptenkant nano gijas esančias filtro viduriniame sluoksnyje, kai aukščiausia riba greičio skalėje 1 cm/s	52
37 pav. Greičio skerspjūvinis kontūras per visą filtrą, kai greičio skalėje aukščiausia riba 0,1 cm/s. Vaizdas iš šono	52
38 pav. A, B ir D paveikslėliuose pavaizduotas slėgio susidarymas prie nanogijų. Paveikslėlyje C pavaizduota mikrogija ir slėgio susidarymai aplink ją. Paveikslėlis E rodo slėgio skalę paskaliais.	53
39 pav. Oro srauto skverbimasis pro mikrogiją	54
40 pav. Oro srauto skverbimasis pro susikirtusias mikrogijas	55
41 pav. Labai įdomus srauto tekėjimo linijų atvaizdavimas ant mikrogijos paviršiaus, kai oro srautas už pačios gijos sudaro greičio „duobę“	55
42 pav. Srauto skverbimasis pro nanogiją	56
43 pav. Srauto skverbimasis pro nanogiją	56

Santrumpų sąrašas

Sutrumpinimai:

CFD – skaičiuojamoji fluidų dinamika (SFD, angl. computational fluid dynamics);

KD – kietosios dalelės;

MF – maišymo frakcija;

PE – polietilenas;

PEO – poliolefinų elastomerai (angl. polyolefin elastomers);

PET – polietileno tereftalatas (angl. polyethylene terephthalate);

PP – polipropilenas;

ŠVOK – šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo sistema.

Įvadas

Jau ne vieną dešimtmetį yra tyrinėjami kompozitiniai mikro- ir nanopluoštai. Dėl savo didelio aktyvumo, mažo porų dydžio ir gerų fizikinių bei cheminių savybių šių dviejų pluoštų kompozitai yra laikomi išskirtiniais ir alternatyviais senų technologijų gaminamiems oro filtrams. Toks pluoštų sujungimas sumažina energijos sąnaudas, sumažina slėgio nuostolius ir daug efektyviau sugaudo įvairaus dydžio oro sraute esančias aerozolinių daleles, nei kad lyginant pluoštus atskirai.

Neaustinės medžiagos jau kelis dešimtmečius išstumia senesnes technologijas daugelyje pramonės sektorių, ne išimtis ir filtravimas. 2018 m. liepą Europos neaustinių medžiagų pramonės prekybos asociacija „EDANA“ aprašė filtrus, kurie gali būti gaminami su geresnėmis eksploatacinėmis savybėmis (ypač mažais slėgio nuostoliais ir puikiu filtravimo efektyvumu), palyginti su įprastinėmis filtravimo medžiagomis [1].

Nano technologijos kasdien tampa vis plačiau naudojamos dėl savo savybių. Pastebėta, kad mikro-nano technologijos gerokai padidina efektyvumą filtruoti smulkesnes kietasias daleles ar dujų molekules. Derinant skirtingus audinius arba pluoštų sluoksnius audinyje, galutiniame gautame gaminyje bus likusios kiekvieno iš jų savybės. Tokia skirtingų pluoštų suma vadinama kompozitiniu pluoštu. Pavyzdžiui, ŠVOK sistemų oro filtrų atveju nanomedžiagos filtro audinyje leidžia pasiekti didesnę filtravimo efektyvumą ir sumažinti slėgio nuostolius [2].

Lietuvą, kaip ir kitas pasaulio šalis, ypatingai prasidėjus globalaus masto epidemijai, labai palietė šalies ekonominis ir socialinis stabilumas. Strigo žaliavų tiekimo grandinės, trūko atsarginių dalių, išaugo jų kainos dėl mažos pasiūlos. Tokios globalinės krizės visada kelia iššūkį ne tik gyventojams, valstybės tarnautojams, bet ir mokslininkams, kurie yra priversti ieškoti išeities iš padėties [7]. Tokios problemos kaip žaliavų trūkumas, jų pabrangimas ir tiekimo laikas prailgina visą eksperimentinį laikotarpį, siekiant išgauti galutinį produktą. Todėl, kad to išvengti, kompiuterinės technologijos vis dažniau yra naudojamos, tiek tyrimų srityje, tiek ir praktikoje.

Darbo tikslas - išanalizuoti oro srauto pokyčius kompozitinėse mikro/nano filtrinėse medžiagose, taikant deterministinį modeliavimo būdą.

Uždaviniai:

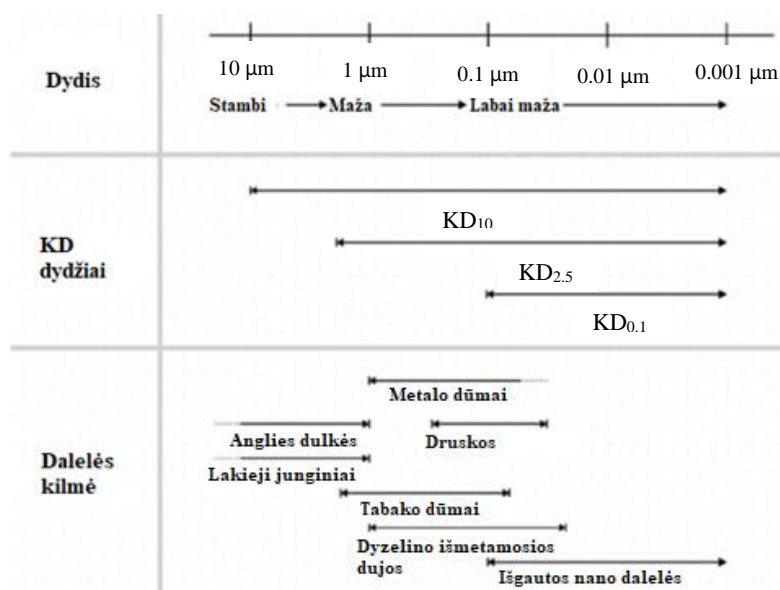
1. išanalizavus naujausią mokslinę ir praktinę literatūrą, bei kitus informacijos šaltinius susijusius su oro filtravimu mikropluoštuose, nanopluoštuose ir jų kompozituose, parinkti tinkamą oro srauto modeliavimo metodą bei parinkti tinkamą filtravimui pluoštinę medžiagą ir ją pritaikyti modelyje;
2. sukurti skaitmeninį 3D pluoštinį mikro/nano kompozitinį filtravimo modelį;
3. nustatyti pagrindines parametrų kiekybines vertes, kad įvertinti pasirinktų pluoštinių medžiagų ir sukurto modelio filtravimo savybes;
4. įvertinti mikro ir nanopluoštų gijų poveikį oro srauto judėjimui ir parengti rekomendacijas dėl programinės įrangos, modelio struktūros paruošimo ir oro srauto modeliavimo optimizavimo.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Kietosios dalelės

Tai dažnai sutrumpintai vadinamos KD ir skysčio lašeliais, esančiais ore visuma.. Kietųjų dalelių savybės priklauso nuo šaltinio, kilmės ir oro sąlygų geografinėje vietovėje. Skirtingi šaltiniai gamina konkrečių savybių kietasias daleles, kurių emisijos skiriasi. Įprastai kietasias daleles daugiausia sudaro jonai, reaktyviosios dujos, organiniai junginiai, metalai ir anglies dvideginio dalelės. Prie KD susidarymo prisideda gamtiniai šaltiniai, įskaitant dulkes, žiedadulkes ir ugnikalnių išmetimus. Kitos kietosios dalelės sukkeliamos iš žmonių veiklos, pavyzdžiui, pramonės objektai, elektrinės, transporto priemonės, deginimo įrenginiai, kaminai, deginamos pievos yra pagrindiniai kietųjų dalelių šaltiniai [4].

Kietųjų dalelių dydis svyruoja nuo $0,1 \mu\text{m}$ ($\text{KD}_{0.1}$), $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{KD}_{2.5}$) iki $10 \mu\text{m}$ (KD_{10}). Klasifikacija paprastai grindžiama dviem dydžių frakcijomis: KD_{10} , ir $\text{KD}_{2.5}$. Tokio diametro dalelių daugiausia susidaro dėl degimo procesų ir jas daugiausia sudaro metalai, angliavandeniliai ir antrinės dalelės, susidarantys dėl cheminių reakcijų su dujiniais junginiais atmosferoje (žr. 1 pav.). Ypatingas dėmesys skiriamas labai smulkioms dalelėms, kurių skersmuo mažesnis nei $0,1$ mikrometro – $\text{KD}_{0.1}$. Tokio mažo diametro nanodalelės įtraukiamos kaip vienos iš įkvėpamų ir pavojingų žmogui dalelių aplinkoje. Tuo tarpu didesnės dalelės, kurių dydis yra didesnis nei $10 \mu\text{m}$, per kelias valandas dėl gravitacijos nusėda ant žemės ir yra nelaikomos pavojingomis[5][27].



1 pav. Kietųjų dalelių klasifikacija ir dalelių šaltiniai [4]

Kietųjų dalelių keliamas pavojus daro įtaką ir gamtai. Didelė tarša ore yra viena iš pagrindinių rodiklių, kodėl pasaulyje vyksta katastrofiška klimato kaita. Didelė koncentracija kietųjų dalelių ore daro didelį poveikį saulės prasiskverbimui, matomumui ir visoms ekosistemoms. Toks poveikis analogiškai paveikia ir visą žemės ūkį, kadangi dėl tam tikro saulės šviesos intensyvumo sumažėjimo susilpnėja pasėlių fotosintezė. Taip pat ir dėl to, kad kietosios dalelės nusėda ant pačių pasėlių taip paveikiant jų kvėpavimą [6].

Vienas iš labiausiai žinomų pavyzdžių kaip atrodo didelė kietųjų dalelių koncentracija ore ir kaip ji paveikia aplinką gali būti dar 2021 metų pabaigoje Indijoje ir Kinijoje susidarę smogai. Šiaurinėje Kinijos dalyje ir pačiame Bejinge susidarė toks tirštas smogas, jog matomumas kai kuriose vietovėse sumažėjo iki mažiau nei 200 metrų. Kinija apie 60 proc. energijos gamina degindama anglis, todėl yra didžiausia pasaulyje šiltnamio efektą sukeltanti šalis, nors anksčiau didelio smogo atvejų pasitaikydavo vis rečiau, valdžios institucijoms teikiant pirmenybę aplinkos apsaugai. 2021 metų pabaigoje buvo ištikus žaliavų ir energijos krizė, dėl ko vėl buvo padidinta anglies gavyba [7][8][15].

Kalbant apie žalą žmogaus sveikatai, poveikį kvėpavimo takams bei širdies ir kraujagyslių sistemai, galima teigti, kad smulkesnės dalelės yra pavojingesnės nei stambesnės. Žmogaus nosies ertmėse esantys plaukeliai nėra tiek išsivystę, kad galėtų sustabdyti smulkias kietąsias daleles nuo patekimo į plaučius. Šios veikia viršutinius kvėpavimo takus, o plaučių alveolės - itin smulkios 0,1 μm ir mažesnio dydžio dalelės, pavyzdžiui, virusinės COVID-19, SARS ar H1N1 gripo virusas. Dėl tokios priežasties ir buvo sukurtos medicininės bei pramoninės kaukės nuo dujinių dalelių apsaugojimo. Paprastai kuo mažesnės ir lengvesnės dalelės tuo labiau jos yra kenksmingos, nes ilgiau išlieka ore ir gali lengvai patekti į plaučius ar kraujagysles [9][10][29].

Toliau pateiktame paveikslėlyje parodytas pavyzdys, kokios mažos gali būti šios dalelės palyginus su akimi matomais plaukais:



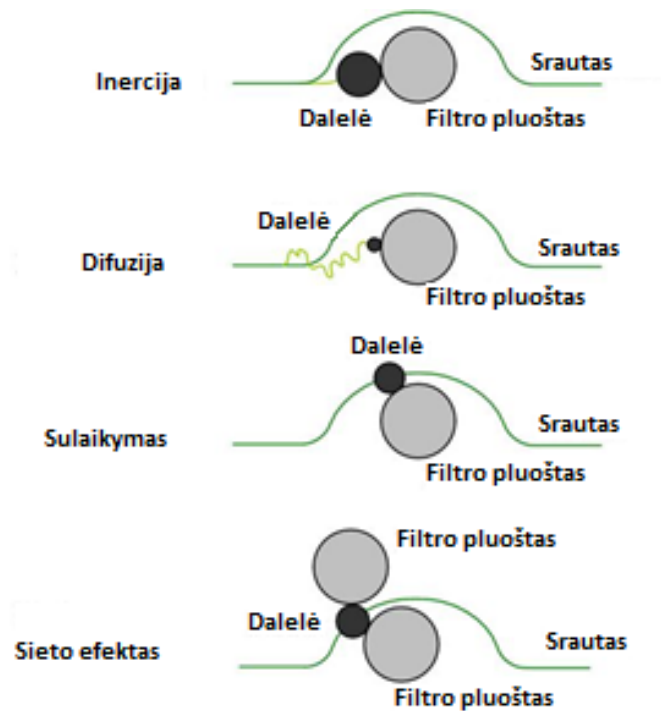
2 pav. $\text{KD}_{2.5}$ ir KD_{10} palyginimas su žmogaus plauku [11]

1.2. Filtrų tipai

Yra du pagrindiniai oro filtrų tipai: kietosioms ir dujinėms dalelėms filtruoti. Abiejų tipų filtrų tikslas yra tas pats - sumažinti ore esančių dalelių koncentraciją. Dalelių dydis, srauto greitis ir filtro konstrukcija kartu lemia filtravimo efektyvumą. Dujinės dalelės gali būti filtruojamos adsorbcijos būdu, pavyzdžiui aktyviosios anglies filtrais. Pačią adsorbciją lemia tarp molekulių veikiančios dispersijos jėgos arba Van der Waalso jėgos. Šios jėgos savo savybėmis panašios į gravitacijos jėgą. Apskritai kalbant, reikia paminėti, kad kietosios dalelės mechanškai gali būti pagaunamos, jeigu laikoma, kad pluoštai ir dalelės be įkrovos, keturiais pagrindiniais būdais (žr. 3 pav.):

- inercija. Kai dėl savo masės dalelė prilimpa prie pluošto, užuot praskridusi srautu;
- difuzija. Tai savaiminis ir nenuspėjamas mažų dalelių judėjimas, kurį lemia Brauno judėjimas. Judėdamos ore, šios dalelės susiduria su gijų paviršiais ir dėl susidūrimų yra sulaikomos. Dažniausiai ši sąlyga galioja smulkiausioms dalelėms, kurių diametras mažesnis nei 100 nanometrų;

- sulaikymu. Tai kai dalelės fiziškai liečiasi su filtravimo pluoštu ir prie jo prisitvirtina;
- įstrigimu. Tai yra vienas iš dažniausiai oro filtruose taikomų efektų, dėl savo principo paprastumo. Dalelė yra didesnė už tarpą tarp filtravimo pluoštų, todėl patenka į spąstus ir yra sulaikoma [12].



3 pav. Kietųjų dalelių sulaikymo būdai [12]

Oro filtrai yra naudojami labai daug kur, ypač kai oro kokybė yra labai svarbi, pavyzdžiui pastatų vėdinimo sistemose, ligoninėse, dažymo patalpose ir varikliuose. Taip pat orlaiviuose ir kitose žmogaus sukurtose aplinkose, pavyzdžiui, palydovuose ir erdvėlaiviuose ar transporto, šildymo, aušinimo, valymo, chemijos ir kitose pramonės srityse [10][13][31].

1.3. Filtravimo medžiagų tipai

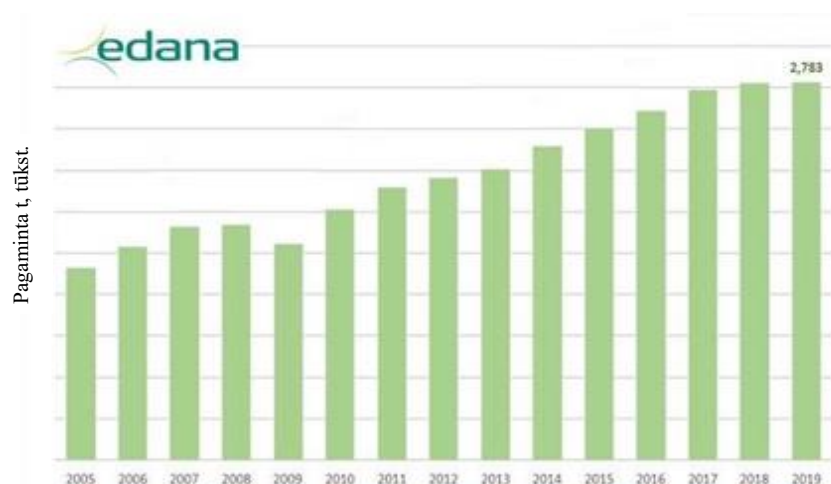
Oro filtravimas yra viena iš dinamiškiausių ir sparčiausiai augančių pramonės šakų. Dar ne taip senai atrodė, kad tai labai brandus sektorius su jau išsivysčiusiomis technologijomis. Keičiantis direktyvoms ir griežtėjant reikalavimams oro taršai, oro kokybei patalpose, lauke ir pramonės sektoriuose, laikoma, kad tai vienas iš svarbiausių akcentų aplinkosauginiu atžvilgiu. Dabar, mažėjant žaliavų ištekliams, vis labiau atsiranda naujų galutinių produktų panaudojimo būdų, perdirbimo galimybių, o naujai atrastos žaliavos ir jų fizikinės bei cheminės savybės keičia gamintojų ir naudotojų požiūrį į oro filtravimą. Todėl, galima teigti, jog šis sektorius nuolat tobulėja ir plečiasi.

Filtravimui naudojamos įvairios filtravimo medžiagos, įskaitant neaustines ir austines medžiagas, membranas ir aktyvuotą anglį. Tačiau neaustinės medžiagos yra plačiausiai naudojamos dėl savo savybių, tokių kaip mažesnio oro pasipriešinimo ir geresnio filtravimo efektyvumo nei austinių medžiagų. Siekiant pagerinti filtravimo procesus, filtravimui naudojami įvairūs pluoštai, daugiasūliai ir vienasūliai audiniai, o kai kuriais atvejais - mišiniai arba daugiau nei vieno iš pirmiau minėtų pluoštų deriniai - kompozitai.

1.3.1. Neaustinės medžiagos

Europos neaustinių medžiagų pramonės prekybos asociacijos teigimu, neaustinė medžiaga – tai pagamintas kryptingai arba atsitiktinai orientuotų pluoštų, sujungtų trinties, sanglaudos arba sukibimo būdu, paketas. ISO 9090 ir DIN EN 29092 normatyvuose neaustinė medžiaga taip pat apibrėžiama kaip pagamintas kryptingai arba atsitiktinai orientuotų pluoštų, pagamintų trinties arba sukibimo būdu, rulonas, išskyrus popierių ir gaminius, kurie yra austi, megzti, siūti, surišti su rišamaisiais siūlais ar gijomis arba velti šlapio malimo būdu, su papildomomis adatomis arba be jų.

Dar 2019 metais pagamindama beveik 2,783 milijono tonų neaustinių medžiagų (žr. 4 pav.) Europa užima svarbią vietą pasauliniame neaustinių medžiagų gamybos sektoriuje ir yra laikoma viena iš pirmaujančių pasaulio regionų šioje srityje. Šis regionas taip pat pasižymi aukštu kvalifikacijos darbuotojų potencialu, gausiais gamtos ištekliais ir palankiomis infrastruktūros sąlygomis, kurios skatina augimą ir plėtrą šioje pramonės šakoje. Neaustiniai filtravimo gaminiai sudaro apie 10 % pasaulinės filtravimui naudojamų neaustinių gaminių rinkos, kurių vertė 2019 m. siekė 8-10 milijardų dolerių. Naujausiomis žiniomis 2021 metais neaustinių medžiagų gamyba Europoje padidėjo iki 3,121 milijono tonų, o medžiagų skirtų oro ir dujų filtravimui gamyba kiekvienais metais paauga apie 4,0 % [14].



4 pav. Neaustinių medžiagų gamybos augimas Europoje nuo 2005 m. [1]

Neaustinių medžiagų privalumas yra tas, kad jos yra daugiavertiniai gaminiai, kuriuos galima įsigyti labai mažomis kainomis ir kurie pasižymi įvairiomis funkcinėmis savybėmis tokiomis, kaip didesnis pralaidumas, didesnis paviršiaus plotas, įvairių porų dydžiu, mažais slėgio nuostoliais, mažais energijos suvartojimais ir ilgesnio naudojimo laiku.

Atsižvelgiant į neaustinių audinių pobūdį, jie skirstomi į antipireninius, vandeniui nelaidžius ir vandeniui pralaidžius audinius. Visi neaustiniai audiniai gaminami iš anizotropiškai arba izotropiškai orientuoto pluošto, o neaustinių audinių tankis priklauso nuo pluošto tipo ir struktūros.

Neaustinių audinių, kurių pagrindą sudaro įvairūs pluoštai, savybės gali turėti savų privalumų ir trūkumų:

- Poliesterio audiniai išsiskiria puikiomis atsigavimo savybėmis, dideliu svorio atsparumu, išskirtiniu elastingumu ir efektyviais karščio palaikymo gebėjimais. Tačiau jie turi didelę polinkį pelyti, kas gali būti trūkumas tam tikroms taikymo sritims;

- Poliamidiniai audiniai pasižymi puikiu atsparumu nešvarumams, efektyvia apsauga nuo drėgmės, cheminių medžiagų atsparumu, geru elastingumu ir karščiui atspariomis savybėmis. Tačiau šie audiniai yra sudėtingi valdomi, pasižymi dideliu polinkiu pelyti ir tai padidina jų kainą;
- Viskožės pluoštas pasižymi geru tvirtumu, jį lengva valyti, jis mažiau arba nežymiai lupasi, pigus. Didžiausias trūkumas - mažas atsparumas drėgmei, sudėtingas tvarkymas ir prastas atsparumas dilimui;
- Poliakrilonitrilas pasižymi geru atsigavimu, puikiu atsparumu cheminėms medžiagoms, puikiu atsparumu drėgmei, tačiau jo kaina yra brangi ir jis turi polinkį atsilupinėti;
- Acetatiniai siūlai gerai atsigauja, lengvai klijuojami, mažai atsparūs dilimui ir nusidėvėjimui, bet už tai jų kaina yra maža;
- Medvilnė pasižymi mažu dilimu, geru atsparumu drėgmei, ją lengva tvarkyti, ji puikiai sugeria drėgmę ir kainuoja nedaug. Ji pasižymi neelastingu atsigavimu, prastu pluošto vienodumu, prastu atsparumu nešvarumams;
- Vilna pasižymi geru sugeriamumu, dideliu elastingumu, greitu atsistatymu, dideliu polinkiu atsilupinėti, dideliu susitraukimu, mažu stiprumu, mažu atsparumu dilimui.

1 lentelė. Įvairių pluoštų įvairūs parametrai

Kilmė	Tankis, g/cm ³	Atsparumas temperatūrai			Atsparumas korozijai		
		Sausas karštis, °C		Drėgnas karštis	Rūgščiai	Šarmams	Organiniams tirpikliams
		Pastovus	Nestabilus				
Poliamidas 6 (Perlon)		100	120	70	-	+	+ (išskyrus fenolį)
Poliamidas 11 (Rilsan)	1,04						
Poliamidas 66 (Nylon)	1,17						
Aromatiniai poliamidai (Nomex, Conex)	1,04	200/220	230/260	Hidrolizė	-	+	+ (išskyrus fenolį)
Poliesteris (Dacron, Tergfal, Terylene)	1,28-1,38	130/180	160/170	Hidrolizė	+	0	+ (išskyrus fenolį)
Polipropilenas	0,91	90/100	120	90-100	+	+	+
Poliakrilonitrilas (Dralon, Crylon, Orlon)		130	140	12-140	+	0	+
Polivinil chloridas (Rhovyl, Thermovyl)	1,4	60-70	70-80	60-70	++	+	0 (išskyrus fenolį)
Polifenileno sulfidas (Ryton)	1,37	190	230		++ (išskyrus azoto rūgštį)	++	+
Poliakrilonitrilas (Dralon, Crylon, Orlon)		130	140	12-140	+	0	+
Polivinil chloridas (Rhovyl, Thermovyl)	1,4	60-70	70-80	60-70	++	+	0 (išskyrus fenolį)

Polifenileno sulfidas (Ryton)	1,37	190	230		++ (išskyrus azoto rūgštį)	++	+
Politetrafluoretilenas (Teflon)	2,3	240	280		++	++	+
Stiklo pluoštas	2,50-2,55	280	300		+ (išskyrus HF)	-	+
Nerūdijančio plieno pluoštas		450			+-	+	+

2 lentelė. Įvairių pluoštų įvairūs parametrai – 1 lentelės pratęsimas

Kilmė	Atsparumas hidrolizei	Atsparumas dilimui	Nedegumas	Atsparumas trūkiams
Poliamidas 6 (Perlon)	0	++	Taip	4-5
Poliamidas 11 (Rilsan)				
Poliamidas 66 (Nylon)				
Aromatiniai poliamidai (Nomex, Conex)	0	++	Ne	5-6
Poliesteris (Dacron, Tergfal, Terylene)	-	++	Taip	6-8
Polipropilenas	++	+	Taip	6-8
Poliakrilonitrilas (Dralon, Crylon, Orlon)	+	0	Taip	4-6
Polivinil chloridas (Rhovyl, Thermovyl)	+	0	Ne	1-4
Polifenileno sulfidas (Ryton)	++	0	Ne	3-4
Politetrafluoretilenas (Teflon)	++	-	Ne	1-5
Stiklo pluoštas	++	-	Ne	3-7
Nerūdijančio plieno pluoštas	++		Ne	3-5

Atsižvelgiant į aukščiau pateiktos 1 lentelės duomenis polipropilenas yra pakankamai universalus polimeras, kuris galėtų būti tinkamas, kaip bandomoji filtravimo medžiaga šiam tyrimui. Polipropilenas (PP) pagal fizines savybes pasižymi puikiu tvirtumu ir standumu, todėl yra ilgaamžis ir vientisas. Nepaisant tvirtumo, polipropileno tankis palyginti nedidelis, todėl gaminiai yra lengvi. Be to, polipropilenas pasižymi mažu drėgmės absorbcijos lygiu, todėl užtikrina puikų stabilumą drėgnomis sąlygomis. [26].

Polipropileno (PP) būdingas aiškus lydymosi temperatūros intervalas: idealus izotaktinis polipropilenas lydosi maždaug 171 °C temperatūroje, o komercinio izotaktinio polipropileno lydymosi temperatūra svyruoja nuo 160 iki 166 °C.

Šis polimeras kambario temperatūroje yra išskirtinai atsparumas cheminėms medžiagoms - jis labai atsparus riebalams, įvairiems organiniams tirpikliams, daugeliui rūgščių ir šarmų, išskyrus stiprius oksidatorius. Dėl šio cheminio atsparumo polipropilenas puikiai tinka naudoti korozyvioje aplinkoje. [40].

Plastikiniuose gaminiuose gali būti tokių priedų kaip švinas ir kadmio, kurie yra žinomi toksinai. Tyrimai rodo, kad plastiko gaminiuose esantis kadmio gali patekti į aplinką dėl sąlyčio su skysčiais, per didelio susidėvėjimo ir netinkamo utilizavimo. Išsiplovimui įtakos turi tokie veiksniai kaip temperatūra, pH lygis ir sąlyčio trukmė. Visa tai sukelia labai žalingą poveikį įvairioms ekosistemoms. Be to, didelė dalis plastikų, įskaitant polipropilena, dažnai yra sudeginami, o ne perdirbami. Deginant tokius termoplastikus, kaip PP, gali išsiskirti pavojingų šalutinių produktų, tokiu kaip dioksinais ir vinilchloridas. Todėl labai rekomenduojama polipropileno gaminius kurti atsižvelgiant į perdirbimą, kad būtų skatinamas tinkamas atliekų tvarkymas ir mažinamas plastiko atliekų poveikis aplinkai. [28][42].

Taip pat yra nustatyta, kad mikrobu grupės, išskirtos iš dirvožemio mėginių, sumaišytų su krakmolu, gali skaidyti polipropilena. Suirusi medžiaga tinklelio pluošto paviršiuje sudaro į medžio žievę panašų sluoksnį. Dėl ko galima teigti, jog ši medžiaga gali būti perdirbama iš mikropluošto į nanopluoštą, kaip ir minėta literatūros apžvalgoje anksčiau 50 – 1000 nm skersmens. Tačiau, kol kas, perdirbama yra tik apie 1 % viso pasaulyje pagaminamo polipropileno. Likusi procentinė dalis paprastai yra utilizuojama sąvartynuose, kuriuose prireikia 20 – 30 metų pilnai susiskaidyti, arba sudeginama atliekų deginimo stotyse [39][40].

Polipropilenas yra pakankamai dažnai naudojamas neaustinis pluoštas oro filtravimo srityje dėl išskirtinio atsparumo cheminėms medžiagoms, didelio atsparumo tempimui, ekonomiškumo ir hidrofobiškumo. Polipropileno pluošto hidrofobinės savybės neleidžia absorbuoti drėgmės, dėl kurios gali augti mikrobai arba pablogėti filtro veikimas. Polipropileno neaustiniai pluoštai veiksmingai sulaiko smulkias daleles oro teršalus, kurie dažniausiai aptinkami patalpose ir lauke [25].

Oro filtravimo srityje neaustiniai kompoziciniai pluoštai dažnai naudojami siekiant padidinti filtravimo efektyvumą ir funkcionalumą. Kompozitinės filtravimo terpės gali būti sukurtos derinant polipropileno neaustinius pluoštus su kitomis medžiagomis ar priedais, pavyzdžiui, aktyvuotos anglies dalelėmis, ceolitais ar nanopluoštais [23].

1.3.2. Neaustinės kompozitinės medžiagos

Tai pažangių medžiagų, naudojamų oro filtravimo sistemose efektyviai surinkti ir pašalinti ore esančius teršalus, klasė. Šiuos kompozitus sudaro dvi skirtingos fazės: ištisinė fazė, vadinama matrica, ir dispersinė fazė, vadinama armatūra arba pluoštu. Neaustiniai pluoštai ypač svarbūs kuriant šiuos kompozitus. Skirtingai nuo austinių pluoštų, neaustinės medžiagos gaminamos mechaniniais, terminiais ar cheminiais procesais surišant ar sujungiant pluoštus. Šie pluoštai naudojami kaip kompozitų bazinė struktūra arba matrica.

Neaustiniai pluoštai pasižymi įvairiomis pageidaujamomis savybėmis oro filtravimo reikmėms, įskaitant didelį paviršiaus plotą, mažą pluošto skersmenį ir gebėjimą formuoti akytą struktūrą. Šios savybės leidžia efektyviai surinkti ir sulaikyti daleles, tuo pat metu išlaikant pakankamą oro srautą per filtravimo medžiagą.

Pasinaudojant unikaliomis neaustinių kompozicinių pluoštų savybėmis, oro filtravimo sistemose galima pasiekti puikių rezultatų, susijusių su dalelių surinkimo efektyvumu, pasipriešinimu oro srautui ir ilgaamžiškumu. Šių kompozicinių medžiagų konstrukcija ir sudėtis gali būti pritaikyta taip, kad atitiktų konkrečius filtravimo reikalavimus, taikomus įvairiose srityse, įskaitant ŠVOK sistemas, automobilių salono filtrus, pramoninius oro valytuvus ir kvėpavimo takų apsaugos prietaisus. [32].

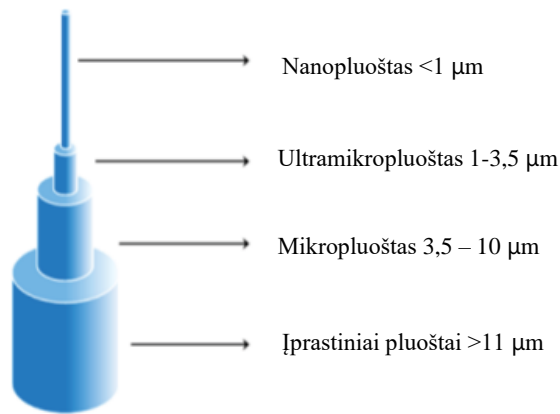
Pastaruoju metu, siekiant sukurti tvirtesnius kompozitus, polimerinės matricos stiprinamos mikro- ar nanopluoštais. Tokiu būdu neaustiniai kompozitai, kurių pagrindą sudaro mikropluoštai ar nanopluoštai, naudojami kaip pagrindinės medžiagos tekstilės pramonėje. Neaustiniai kompozitai – tai pluoštų ar gautų pluoštų, įterptų į kitą pluoštą, deriniai, t. y. po pluošto formavimo etapo pluoštai ir plastikas sujungiami konsolidacijos (matricos pluošto lydymo arba klijavimo) procesu, kad susidarytų galutinis neaustinis kompozitas. Šios medžiagos pasižymi dideliu smulkių ir itin smulkių dalelių filtravimo efektyvumu ir dėl unikalios struktūros santykinai mažu slėgio kritimu [19][38][40].

1.3.3. Mikropluoštai ir nanopluoštai

Mikropluoštai ir nanopluoštai laikomi perspektyvia filtravimo terpe. Šie pluoštai pasižymi puikiomis savybėmis, pavyzdžiui, mechaninėmis. Dėl didelio paviršiaus ploto ir masės santykio, didelio porų tūrio, mažo porų dydžio ir didelio tankio nanopluoštinės neaustinės medžiagos dažniausiai naudojamos įvairioms filtravimo reikmėms. Jos pasižymi itin dideliu smulkių ir itin smulkių dalelių filtravimo efektyvumu ir dėl unikalios struktūros santykinai mažu slėgio kritimu.

Pluoštiniai filtrai su nanopluoštais dažnai gaminami kaip daugiasluoksniai filtrai, sudaryti iš nanopluošto ir pagrindo, kurie suteikia filtrui reikalingas papildomas fizines ir mechanines savybes. Įdomu tai, jog daugybę polimerų rūšių galima perdirbti į nanopluoštus, kurių skersmuo svyruoja nuo 50 iki 1000 nm, kurie galėtų būti naudojami, kaip filtriniai pluoštai. [3].

Toliau 6 paveiksle parodytas įprastinių, mikropluoštų ir nanopluoštų skirtumas priklausomai nuo pluošto skersmens.

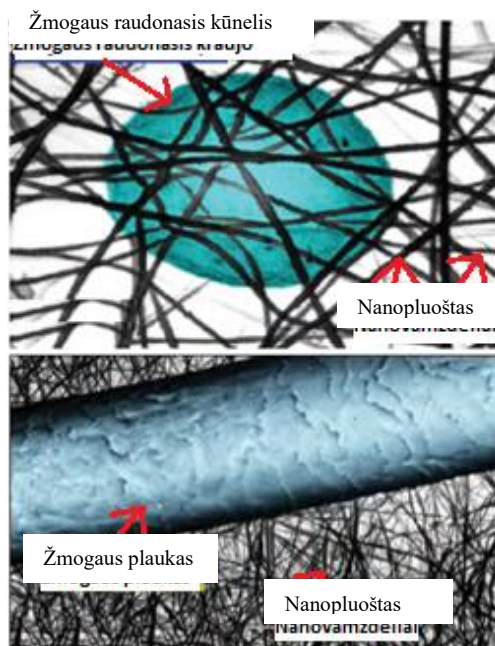


5 pav. Įprastinių, mikropluoštų ir nanopluoštų skersmens palyginimas [3]

Iš paveikslėlio gerai matyti, kad įprastinių pluoštų skersmuo yra didesnis nei 11 μm . Tuo tarpu kompozituose naudojami pluoštai yra dar mažesni – mikropluoštai ir nanopluoštai. Yra žinoma, kad skersmens sumažėjimas turi įtakos pluošto paviršiaus plotui, cheminėms, mechaninėms ir šiluminėms savybėms. Taip pat tai turi įtakos ir pluoštų tarpusavio sąveikai bei pačio kompozito.

Šiuo metu sintetiniai ir natūralūs, mikropluoštai ir nanopluoštai naudojami, kaip armatūra keliose polimerinėse matricose, pavyzdžiui, polikaprolaktone, nailone ir akrilo rūgštyje. Polipropilenas, nailonas, polistirenas, poliakrilnitrilas, polikarbonatas, PEO, PET ir vandenyje tirpūs polimerai yra naudojami elektriniame verpimo procese nanopluoštams gaminti. Šie nanopluoštai pasižymi puikiomis filtravimo savybėmis, dėl ko jie yra naudojami įvairioms filtravimo reikmėms [20].

Naudojant mikro- ir nanotechnologijų koncepciją, galima gaminti šiuos itin plonus mikro- ar nanopluoštinus neaustinių audinių kompozitus. Taikant šią koncepciją neaustiniams audiniams gaminti, galima pagerinti audinių ir kompozitų savybes, palyginti su įprastais audiniais ir kompozitais. Taip yra dėl to, kad polimerinėje matricoje sustiprintų lengvo svorio, didelio tankio, cheminio ir terminio stabilumo kompozito mechanines savybes.



6 pav. Nanovamzdelių palyginimas su kraujo kūneliu ir žmogaus plauku [3]

1.4. Moksliniai tyrimai

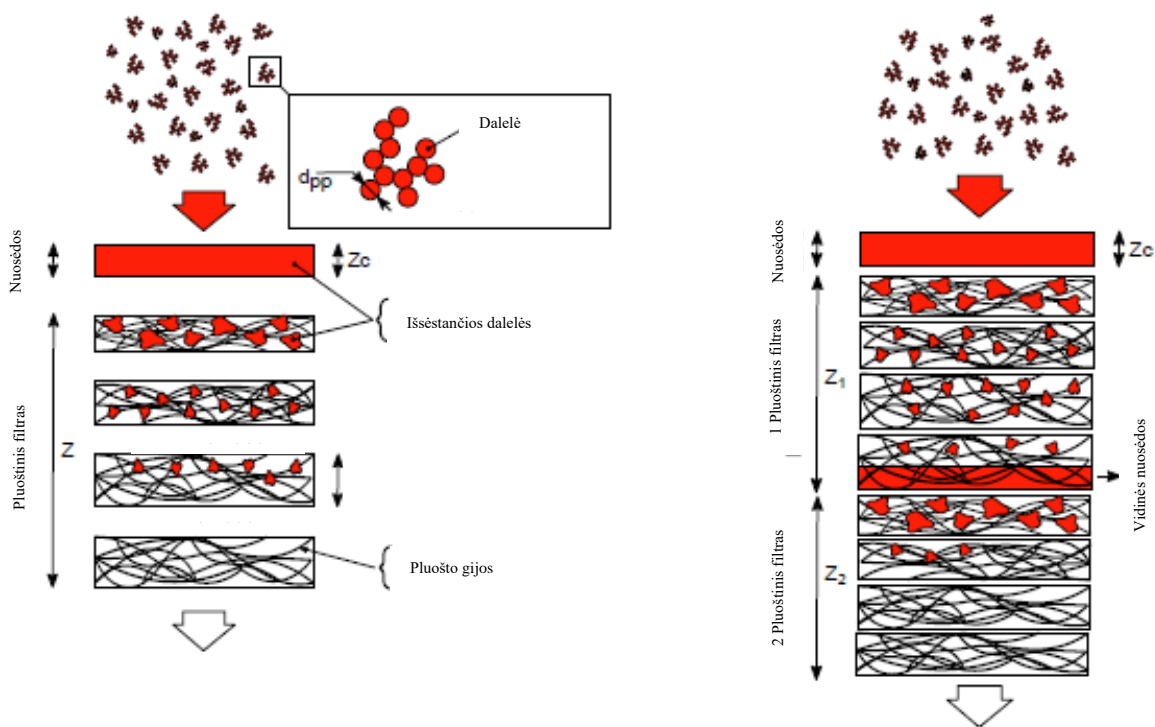
1.4.1. Slėgio nuostoliai ir efektyvumo modelis [1]

2019 m. prancūzų mokslininkų grupė nustatė, kad siekiant padidinti dalelių filtravimo efektyvumą, skirtingas pluoštines medžiagas galima sujungti nuosekliai. Atlikdami metodo tyrimą jie suprato, kad kiekvienas modelis turi savų privalumų ir trūkumų. Tačiau labiausiai šiam tyrimui tiko gardelės-Boltzmano metodas, skirtas nanodalelių nusėdimo ant dviejų nano- ir mikro- pluoštų efektyvumui apskaičiuoti.

Vėliau jis buvo išplėstas, kad būtų galima apskaičiuoti slėgio nuostolius ir sluoksninių filtrų struktūrą, sudarytą iš priekinio nanopluošto sluoksnio ir pagrindu laikomo mikropluošto sluoksnio, efektyvumą. Vienintelė problema buvo ta, kad jis dar nebuvo konfrontuotas su eksperimentiniais rezultatais.

Tokiu atveju, buvo sukurtas skaitmeninis skaičiuojamosios fluidų dinamikos (SDF, angl. – CFD) modelis, pagrįstas slėgio nuostolių ir efektyvumo modeliais, atsižvelgiant į filtro pluošto ir surinktų aglomeratų sąveiką. SFD modeliais bandoma imituoti skysčių ir dujų sąveiką, kai paviršiai apibrėžiami ribinėmis sąlygomis. Jais taip pat stebimas kietųjų dalelių srautas sistemoje.

Filtrai buvo suskirstyti į skirtingo storio sluoksnius (žr. 8 pav.). Pirmųjų penkių sluoksnių storis laikomas pastoviu ir lygus dvigubam Davieso skersmeniui, o kitų sluoksnių storis didėja pagal geometrinę eilutę (bendras santykis lygus 1,5). Šis metodas leidžia apriboti sluoksnių skaičių, o kartu ir skaičiavimo laiką, tuo pat metu teikiant pirmenybę pirmiesiems sluoksniams, kurių filtravimo efektyvumas turėtų sparčiai kisti. Filtravimo metu sluoksniuose surinktos dalelės sudarys slėgio nuostolius ir keis filtravimo efektyvumą.



7 pav. Filtravimo modelio schema. Kairėje - vienasluoksnis pluoštinis filtras, dešinėje - dvisluoksnis pluoštinis filtras. d – dalelės skersmuo.

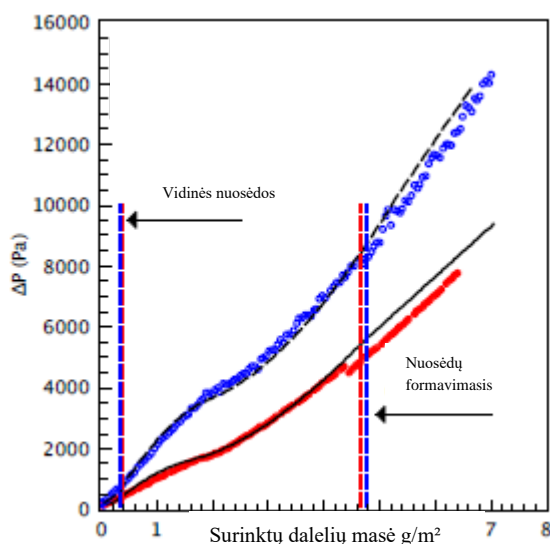
Reikėtų pabrėžti, kad pagrindinė šio metodo esmė – laikyti izotropinę pluoštinę terpę ir sulaikytas nuosėdas kiekviename sluoksnyje. Dėl to buvo apskaičiuoti skirtingi slėgio kritimai kiekviename sluoksnyje.

Apskaičiavus slėgio nuostolius, buvo skaičiuojamas filtravimo efektyvumas pasirenkant tris filtravimo procesus, tai inerciją, difuziją ir sulaikymą. Vėliau pagal modelį prognozuojamos charakteristikos buvo lyginamos su eksperimentiniais duomenimis. Lentelėje pateiktos tirtų filtrų savybės.

3 lentelė. Naudotų filtrų savybės

Filtru	A	B	C	D	E
Filtravimo grupė	HEPA (H)	Vidutinis (M)	Vidutinis (M)	Stambus (G)	Stambus (G)
Medžiaga	Stiklo pluoštas	PP	Stiklo pluoštas	PET	PET
Tankis	0,076	0,050	0,074	0,241	0,217
Storis	411	387	373	606	422
Vidutinis skersmuo, μm	0,92	2,2	5,1	26,8	16,9
Davieso skersmuo, μm	1,3	4,2	6,0	34,0	19,5

Kiekvienas filtras buvo išbandytas esant 2,5 cm/s (raudona juosta) ir 3,8 cm/s (mėlyna juosta) greičiui. Juodos spalvos linijos reiškia modelio rezultatus, o spalvotos linijos raudona ir mėlyna eksperimentiniai rezultatai. Pavyzdžiui, du filtrai D ir A kartu buvo matuojami esant 2,5 cm/s arba 3,8 cm/s filtravimo greičiui (žr. 8 pav.).



8 pav. Slėgio nuostolių priklausomybė nuo susidariusių nuosėdų kiekio

Čia matyti, kad slėgio nuostoliai greičiau didėja dėl susidariusių nuosėdų filtro viduje, kuris susidaro filtro paviršiuje dėl mažo pirmojo sluoksnio efektyvumo. Šiame etape slėgio kritimą daugiausia lemia susidarę išorinės nuosėdos ant paviršiaus.

Kadangi difuzinio režimo atveju filtravimo greičio didėjimas lemia efektyvumo mažėjimą, ši forma dar labiau išryškėja, kai greitis yra didelis. Iš tiesų filtravimo metu pirmasis filtras tampa vis efektyvesnis, o ore esančios dalelės surenkamos pirmajame filtre, kol susidaro pilnai padengtas nuosėdų paviršius.

1.4.2. Oro filtro SFD modeliavimas su nanopluoštu sustiprintomis medžiagomis [16]

Šį eksperimentą 2015 m. atliko Vokietijos mokslininkai. Šio tyrimo tikslas buvo sumodeliuoti nanopluošto sluoksnį ir celiuliozės atraminę terpę ir nustatyti, kaip tiksliai SFD modeliavimas, kuriame modeliuojamas srautas per abu sluoksnius, gali keisti slėgio nuostolius per sluoksnius ir kiekvieno iš jų dalelių surinkimo efektyvumą.

Iš pradžių jie lygiagrečiai brėžė skaitmenines linijas per nedidelio mėginio pavyzdžio modelį. Vėliau buvo priderinti duomenys prie pačio modelio. Dėl šios priežasties buvo naudojamas "logaritminės tikimybės" grafikas.

Po to modelio riboms pritaikytos Knudseno ilgio ir slydimo sąlygos. Vėliau, atlikus keletą SFD modeliavimų, buvo gauti tam tikri rezultatai, į kuriuos reikėjo atkreipti dėmesį. Tai slėgio nuostoliai, greitis ir dalelių prasiskverbimas pagal diametrą.

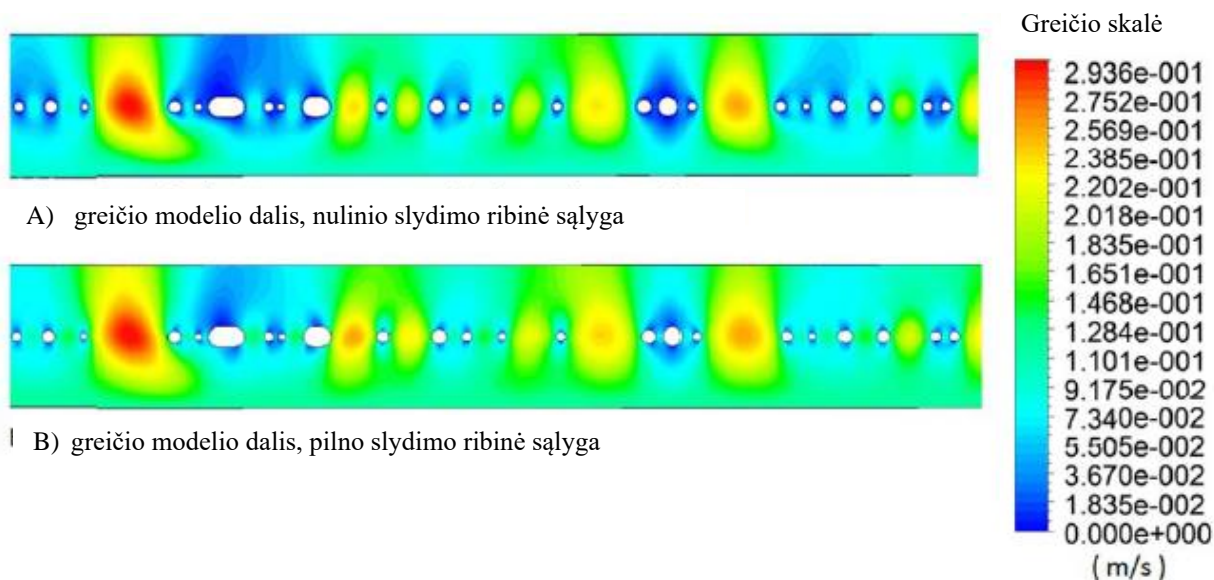
Buvo naudojama "ANSYS Fluent" modeliavimo programa ir sukurti du modeliai: vienas su nuliniu slydimu ties sudarytomis ribomis, o kitas - su visišku slydimu ties sudarytomis ribomis. Lentelėje pateikti tik SFD modeliuoti slėgio nuostoliai vien tik per nanopluošto tinklą, nes šiame eksperimente celiuliozinės atraminės terpės srautas nebuvo modeliuojamas.

Knudseno skaičiai visuose nanopluošto tinklo elementuose buvo pakankamai dideli, todėl visiško slydimo stulpelis turėtų būti teisingas. Todėl atrodo, kad nanopluošto sluoksnio indėlis į bendrą slėgio kritimą vis dėlto yra gana nedidelis.

4 lentelė. Sumodeliuoti ir išmatuoti slėgio nuostoliai

Paviršiaus greitis, cm/s	Nanopluošto slėgio nuostoliai, Pa		Eksperimentinis kompozitinės terpės slėgio nuostoliai, Pa
	Pilnas slydimas	Nėra slydimo	
5,2	8,9	13,8	108
6,5	11,1	17,2	131
7,8	13,3	20,6	155
10,4	17,8	27,5	204
13,0	22,2	34,4	258
15,6	26,7	41,3	306
17,3	20,6	45,8	340

Buvo gautas labai mažas skirtumas tarp nulinio ir visiško slydimo kraštinių sąlygų, atsižvelgiant į modelį pagal greičio skalę. Tuo tarpu jeigu žiūrėti į sulėtėjimą už mikrogijų, akivaizdžiai matyti, kad esant nulinio slydimo sąlygai susidaro didelis sulėtėjusio srauto plotas, nei kai galioja pilno slydimo sąlyga. Taip pat matomi didesni greičiai per palyginti plačias nanopluošto tinklo angas ir šių didesnių greičių įtaka srautui aplink netoliese esančius tinklo elementus.



9 pav. Sudaryto modelio greičio modeliai [16]

Naudojant polidispersinį DEHS aerozolį ir PMS LAS-X II lazerinį šviesos sklaidos aerozolio dalelių spektrometrą buvo išbandytas pluoštinis filtro mėginys. Nustatytas greitis buvo 10,4 cm/s.

Toliau lentelėje pateikiami šio bandymo rezultatai, iš kurių aiškiai matyti, kad esant mažėjant gijų diametru skverbties vertė didėja. Tai reiškia, kad jeigu filtriniame pluošte didžioji dalis sudarytu mažo diametro nanogijos, kartu su mikropluoštais galėtų sudaryti standų, aukšto dalelių sulaikymo efektyvumo ir mažų slėgio nuostolių filtrus.

5 lentelė. Skverbties vertės, kai greitis 10,4 cm/s

Diametras (nm)	110	134	173	224	296	397	520	671	866	1225	1732	2449
Skvarba (%)	67,4	72,2	66,5	61,0	53,0	41,0	27,3	18,6	11,7	3,8	1,2	0,6

1.4.3. Filtro efektyvumas kaip nanodalelių greičio ir formos funkcija [24]

Šio mokslinio tyrimo tikslas – ištirti filtro efektyvumo priklausomybę nuo dalelių formos, esant skirtingam dujų greičiui. Tyrime naudotos sferinės polistireno latekso (PSL), kubinės magnio oksido (MgO) ir kubinės suapvalintų kraštų natrio chlorido (NaCl) dalelės.

Eksperimentams naudotas 2 mm skersmens polipropileno filtras, kurio pluošto skersmuo 12 μm . Siekiant sumažinti galimą pluošto krūvio poveikį filtro veikimui, kiekvienas filtras prieš eksperimentą buvo neutralizuotas skalaujant izopropilo alkoholiu ir vėliau išdžiovintas džiovykloje.

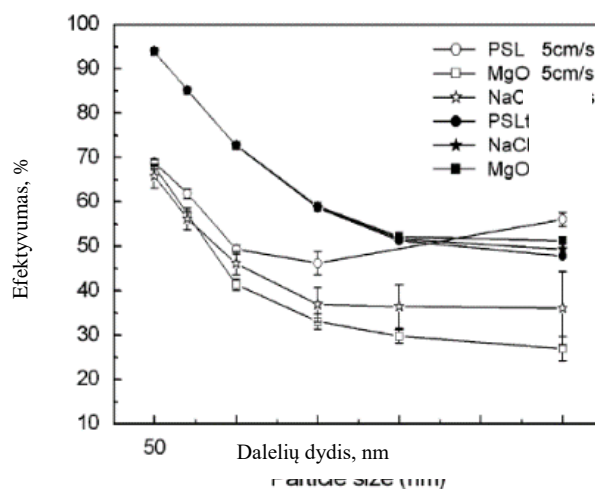
Trys didelio efektyvumo kietųjų dalelių oro (HEPA) filtrai buvo išdėstyti vienas paskui kitą prieš purškimo kamerą, kad iš įeinančio oro srauto būtų pašalinti bet kokie pašaliniai aerozoliai.

Taikydami šią eksperimentinę sąrangą ir procedūrą, tyrėjai siekė įvertinti dalelių formos įtaką filtro efektyvumui esant kontroliuojamam dujų greičiui. Šio tyrimo rezultatai suteikia vertingų įžvalgų apie oro filtrų filtravimo efektyvumą, kai susiduriama su nanodalelėmis.

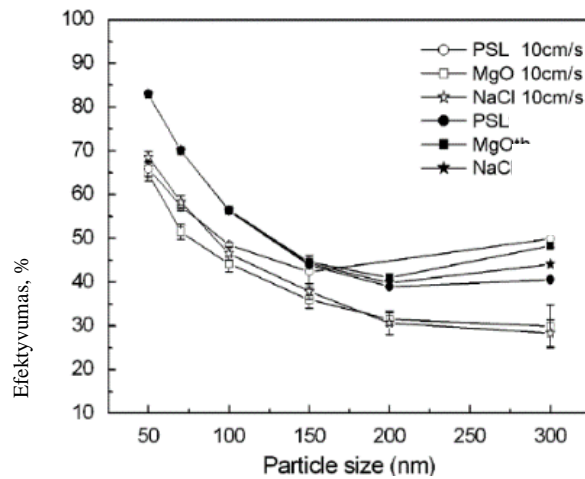
6 lentelė. Skirtingų filtravimo mechanizmų dydžiai

Greitis, m/s	Dalelių tipas	Filtravimo procesas			
		Sulaikymas	Difuzinis nusodinimas	Inercija	Elektrostatinis nusodinimas
a) Mažiausias dalelių skersmuo 50 nm					
0,05	PSL MgO NaCl	$8,90 \times 10^{-5}$	$4,54 \times 10^{-2}$	$1,08 \times 10^{-6}$ $3,70 \times 10^{-6}$ $2,23 \times 10^{-6}$	$1,027 \times 10^{-3}$
0,1	PSL MgO NaCl	$8,90 \times 10^{-5}$	$2,86 \times 10^{-2}$	$2,16 \times 10^{-6}$ $7,39 \times 10^{-6}$ $4,46 \times 10^{-6}$	$7,264 \times 10^{-4}$
0,2	PSL MgO NaCl	$8,90 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$4,31 \times 10^{-6}$ $1,48 \times 10^{-5}$ $8,91 \times 10^{-6}$	$5,136 \times 10^{-4}$
b) Didžiausias dalelių skersmuo 300 nm					
0,05	PSL MgO NaCl	$3,14 \times 10^{-3}$	$6,95 \times 10^{-3}$	$1,08 \times 10^{-4}$ $1,08 \times 10^{-3}$ $1,08 \times 10^{-4}$	$1,854 \times 10^{-3}$
0,1	PSL MgO NaCl	$3,14 \times 10^{-3}$	$4,38 \times 10^{-3}$	$1,08 \times 10^{-4}$ $1,08 \times 10^{-3}$ $1,08 \times 10^{-3}$	$1,31 \times 10^{-3}$
0,2	PSL MgO NaCl	$3,14 \times 10^{-3}$	$2,76 \times 10^{-3}$	$1,08 \times 10^{-3}$ $1,08 \times 10^{-3}$ $1,08 \times 10^{-3}$	$9,268 \times 10^{-4}$

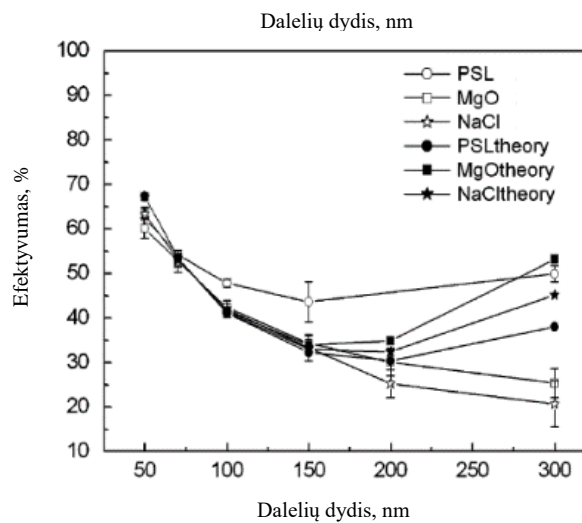
Toliau pateikiami eksperimentinio filtravimo efektyvumo rezultatai, kai filtravimo paviršiaus greitis yra 5, 10 ir 20 cm/s. Klaidų juostos rodo bent 30 eksperimentinių bandymų standartinę nuokrypį. Palyginimui su eksperimentiniais rezultatais taip pat pateikiamos atitinkamos teorinės filtravimo efektyvumo kreivės sekančiuose paveikslėliuose.



10 pav. Filtravimo efektyvumas kaip dalelių dydžio funkcija, kai srauto greitis 5 cm/s [24]



11 pav. Filto efektyvumas kaip dalelių dydžio funkcija, kai oro greitis 10 cm/s [24]



12 pav. Filto efektyvumas kaip dalelių dydžio funkcija, kai oro greitis 20 cm/s [24]

Iš diagramų matyti, kad sferinių PSL dalelių filtravimo efektyvumas yra didesnis, palyginti su nesferinių dalelių filtravimo efektyvumu. Remiantis klasikine filtravimo teorija, esant mažesniai nei 5 cm/s greičiui, pagrindinis mažų dalelių surinkimo mechanizmas yra difuzija. Inercija tuo tarpu, esant tokiam greičiui ir dalelių dydžiui, yra nereikšminga. Tačiau didėjant greičiui šie veiksniai, nors ir išlieka, tampa ne tokie svarbūs, o inercija pradeda vaidinti svarbų vaidmenį.

1.4.4. Nanoplūšto ir mikroplūšto kompozitinio filtro filtravimo savybės [32]

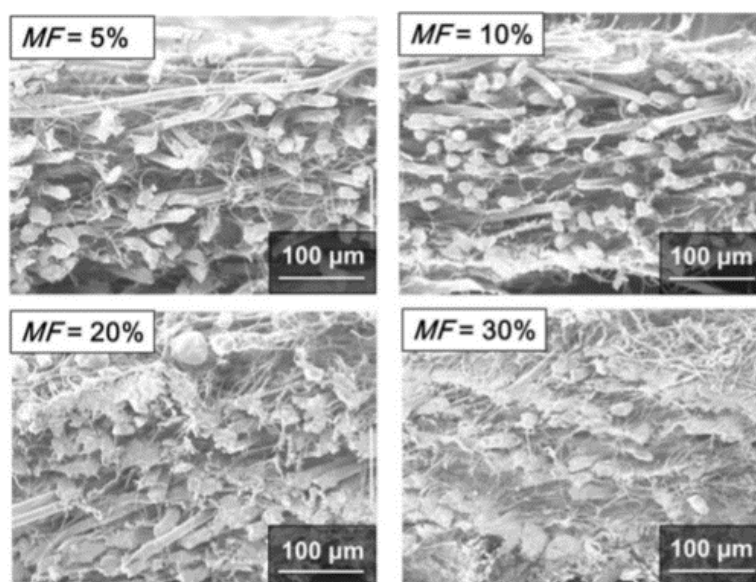
Šiame darbe buvo tiriama skirtingų santykių nanoplūšto (780 nm) ir mikroplūšto (11,2 μm) kompozitinių filtrų dalelių sulaikymo efektyvumas, siekiant maksimizuoti filtro kokybės koeficientą qF , priklausomai nuo nanoplūšto santykio filtrinėje medžiagoje. Nanoplūštai buvo disperguoti vandenyje naudojant paviršinio aktyvumo medžiagą kartu su monodispersiniais 11,2 μm PET plūštais.

Eksperimento metu buvo gaminami kompozitinių filtrų bandiniai su skirtingais nanodalelių ir mikroplūšto santykiais. Kiekvieno pavyzdžio filtravimo efektyvumas buvo įvertintas matuojant dalelių surinkimo efektyvumą kontroliuojamomis sąlygomis. Tiksliau, į oro srautą buvo įleista kontroliuojama bandomųjų dalelių koncentracija, o filtrų sugautos dalelės buvo kiekybiškai įvertinamos ir analizuojamos.

7 lentelė. Mišrių nanopluošto ir mikropluošto filtrų fizinės savybės

Maišymo frakcija, MF, %	Mikropluošto gijų skersmuo, μm	Nanopluošto gijų skersmuo, nm	Filtro storis, μm	Ploto tankis, g/m^2	Pakuojantysis tankis
5	11,2	780	276+-32	57,2	0,152
10	11,2	780	237+-47	58,4	0,172
20	11,2	780	235+-35	59,8	0,186
30	11,2	780	239+-20	62,2	0,195

13 paveikslėlyje pavaizduoti skerspjuviai, kuriuose matomi filtrai, paruošti esant skirtingoms maišymo frakcijoms. Kaip parodyta, atskiri nanopluoštai yra gerai išsklaidyti filtro matricoje esant 5 % ir 10 % maišymo frakcijoms, tačiau nanopluoštų kiekis nėra toks didelis, kad reikšmingai pakeistų slėgio kritimą.



13 pav. Nanopluoštų koncentracija prie mikropluošto. MF – nanopluošto maišymo frakcija [33]

Tyrimo išvadose pabrėžiama, kad didžiausias filtro kokybės koeficientas buvo pasiektas esant mažesnei nanodalelių frakcijai, konkrečiai - 5 % ir 10 % nanodalelių kiekiui. Ši išvada rodo, kad optimali pusiausvyra tarp nanodalelių koncentracijos ir mikropluošto matricos yra labai svarbi siekiant maksimaliai padidinti bendrą kompozitinių filtrų efektyvumą.

Rezultatai rodo, kad pernelyg didelis nanodalelių santykis nebūtinai gali padidinti filtravimo efektyvumą. Šis pastebėjimas pabrėžia, kaip svarbu kruopščiai suprojektuoti ir parinkti nanodalelių kiekį kompozitiniuose filtruose, kad būtų pasiektas norimas filtravimo efektyvumas.

Šie rezultatai suteikia vertingų įžvalgų kuriant ir optimizuojant kompozitinius filtrus, naudojamus įvairiose oro filtravimo srityse. Suprasdami nanodalelių santykio įtaką filtro kokybės koeficientui, tyrėjai ir inžinieriai gali priimti pagrįstus sprendimus projektuodami filtrus, kurių efektyvumas ir veiksmingumas sulaukiant ore esančias daleles yra didesnis.

1.5. Literatūros apžvalgos apibendrinimas

Apibendrinant galima teigti, jog kietųjų dalelių keliamas pavojus žmonėms ir gamtai, ateityje didės tik labiau. Sparčiai besivystant pramonei, o paklausai augant dar sparčiau, maža pasiūla yra nepakankama išpildyti poreikius šiuolaikiniame pasaulyje. Todėl yra privaloma ieškoti alternatyvų senoms technologijoms, kaip jas optimizuoti ar pakeisti naujomis. Kasmet griežtėjant aplinkosauginiams reikalavimams oro taršai, mokslininkams tenka vis intensyviau ieškoti alternatyvių pluoštų ir filtrų struktūrų, kaip sumažinti slėgio nuostolius ir tuo pačiu išlaikyti aukštą filtravimo efektyvumą.

Ekonominiams kaštams sumažinti ir tuo pačiu išsaugoti aplinką visada buvo sudėtinga. Tačiau dėl to visuomet vyksta moksliniai tyrimai, kuriuose siekiama aukščiausio balanso tarp ekonomikos ir aplinkosaugos. Iš šios literatūros apžvalgos galima suprasti, kad filtrų efektyvumas dažnai tiesiogiai priklauso nuo daugelio parametrų. Svarbiausia vaidmenį čia atlieka oro srauto greitis, slėgio nuostoliai, gijų diametrai, porėtumas ir filtro storis. Nanopluoštai ir mikropluoštai atskirai yra mažiau efektyvūs oro srauto filtravimui, nei kompozito. Todėl pluoštiniai kompozitai yra labai populiarūs mokslininkų tarpe, nes jie neturi didelių slėgio nuostolių ir išlaiko aukštą filtravimo efektyvumą su mažomis energijos sąnaudomis, bei išlaiko ilgesnį tarnavimo laiką.

Sekančiuose skyriuose, remiantis metodikomis, bus analizuojamas kompozitinio pluošto filtro skaičiuojamųjų skysčių dinamikos modelis. Bus sukurta 3D struktūra, tinkama oro srautui modeliuoti, parenkamas tinkamas baigtinių elementų tinklelis ir atlikta analizė, kaip oro srautas kinta tekant aplink skirtingų diametrų gijas, tokio tipo filtre. Atsižvelgiant į rezultatus, bus atliekami literatūros apžvalgoje aptartų modelių palyginimai su šiame projekte gautu modeliu ir jo rezultatais, bei struktūros parūšimo optimizavimo ir sistemos našumo optimizavimo rekomendacijos.

2. Tyrimų metodika

Šio tyrimo tikslui įgyvendinti pirmiausia turi būti parenkamas tinkamas modeliavimo metodas oro srauto prasiskverbimui modeliuoti per pasirinktas pluoštines medžiagas. Skysčių mechanikoje naudojamas diferencialines lygtis sunku išspręsti matematiškai. Dėl to, modelis bus analizuojamas vienoje populiariausių tarp inžinierių programinių įrangų „SolidWorks 2022“, kurios pagalba bus kuriamas trimatis oro filtro kompozitinis mikro/nano kompozitinis pluoštas. Programos funkcija „Flow Simulation“, naudodama baigtinių tūrių metodą, leis modeliuoti oro srauto prasiskverbimą per pluoštines medžiagas, parinkti įvedamus modelio parametrus, stebėti ir analizuoti dalelių judėjimą aplink gijas.

2.1. Filtro pluoštinės medžiagos morfologinių savybių vertinimas

Specifinių pluoštinių struktūrų formavimo raida žada sukurti labai efektyvius filtrus nanodalelėms surinkti. Pluoštinė medžiaga veikia sulaikydama oro sraute esančiančias daleles ant pluošto, esančio filtro gilumoje. Medžiagos filtravimo efektyvumas priklauso nuo sulaikomų dalelių fizikinių savybių ir diametro, pluošto gijų diametro, filtro porėtumo ir tokių medžiagos savybių, kaip pakuojantysis tankis. Tačiau neretai esant labai gerų savybių medžiagai, jų kaina būna tiek aukšta, kad tiesiog nebūtų verta pradėti jas gaminti ir komplektuoti į filtravimo įrenginius.

Kaip filtravimo medžiaga šiame darbe bus naudojamas polipropileno kopolimeras. Šis polimeras yra vienas universaliausių dėl savo tvirtumo ir lankstumo ir atsparumo aplinkos veiksniams. Taipogi, plačiai naudojamas visame pasaulyje ir nėra brangus. Lentelėje žemiau nurodyti kokie polipropileno parametrai yra jau paruošti programoje ir bus naudojami ruošiant pluoštus.

8 lentelė. Duomenys apie polipropilena naudojami oro srauto modeliavimui

Parametras	Vertė	Vienetai
Tamprumo modulis	896000000	N/m ²
Poissono koeficientas	0,4103	
Šlyties modulis	315800000	N/m ²
Masės tankis	890	kg/m ³
Tempimo stipris	27600000	N/m ²
Šiluminis laidumas	0,147	W/(m·K)
Savitoji šiluma	1881	J/(kg·K)

2.2. Skaičiuojamoji fluidų dinamika

Iš esmės laikui bėgant desiformuojanti medžiaga, pavyzdžiui, oras ar vanduo, vadinama skysčiu arba fluidu. Taip yra dėl to, kad jų dinaminės savybės tarpusavyje skiriasi labai minimaliai. Todėl skysčių ir oro srautų modeliavimas laikomas vienu ir tuo pačiu reiškiniu.

Skysčiai turi daug svarbių parametrų, kurie įtakoja skysčių tekėjimą, kaip srauto greitis, slėgis, tankis, skysčio klampumas ir tam tikromis sąlygomis temperatūrų skirtumai. Tad šioms fizikinėms savybėms aprašyti yra naudojamos sudėtingos matematinės lygtys, kurioms spręsti naudojami skaitiniai metodai ir algoritmai. Dažniausiai tokias sudėtingas lygtis spręsti paliekama kompiuteriams, tačiau ir šie sugeba pasiekti tik apytikslį sprendinį [35].

Skaičiuojamoji fluidų dinamika (SFD) - tai taikomosios matematikos, fizikos ir skaičiavimo programinės įrangos naudojimas, siekiant vizualizuoti skysčių ar dujų sąveiką, taip pat kaip dujos ar skystis veikia praeinančius objektus. Skaičiuojamoji skysčių dinamika remiasi Navjė-Stokso lygtimis, aprašančias klampių nespūdžių skysčių tekėjimą. Jos grindžiamos skysčio fizikinių savybių tvermės dėsnium. Šio dėsnio principas yra savybių, pavyzdžiui, masės, energijos ir judesio kiekio, kitimas objekte, kurį lemia įvesties ir išvesties parametrai. Taikydami šiuos dėsnius galime išvesti sekančias lygtis:

Masės tęstinumo lygtis arba pernašos lygtis atliekama pagal (2.2.1) formulę:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta(\rho u_i)}{\delta x_i} = 0; \quad (2.2.1)$$

čia ρ – skysčio tankis, kg/m³

t – laikas, s;

u – srauto greičio vektorinis laukas, m/s;

x – koordinatės.

Judesio kiekio lygtis apskaičiuojama pagal (2.2.2) formulę:

$$\frac{\delta(\rho u_j)}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x_i} \cdot (\rho u_i u_j) = -\frac{\delta P}{\delta x_j} - \frac{\delta \tau_{ij}}{\delta x_i} + \rho g_j; \quad (2.2.2)$$

$$\text{čia } \tau_{ij} = -\mu \left(\frac{\delta u_j}{\delta x_i} + \frac{\delta u_i}{\delta x_j} \right) + \frac{2}{3} \cdot \delta_{ij} \cdot \mu \cdot \frac{\delta u_k}{\delta x_k}; \quad (2.2.3)$$

τ_{ij} – įtempių tenzorius;

P – slėgis, Pa;

μ – dinaminis klampumas, Pa·s;

g – gravitacijos jėga, m/s².

Energijos lygtis apskaičiuojama pagal (2.2.4) formulę:

$$\frac{\delta \rho c_\mu T}{\delta t} + \frac{\delta \rho c_\mu u_i T}{\delta x_i} = -P \frac{\delta u_i}{\delta x_i} + \lambda \frac{\delta^2 T}{\delta x_i^2} - \tau_{ij} \cdot \frac{\delta u_j}{\delta x_i}; \quad (2.2.4)$$

čia c_μ – savitoji šiluminė talpa, J/(kg·K);

T – temperatūra, K.

Supaprastinus Navjė-Stokso lygtis, galima perrašyti jas į vieną bendrą lygtį (2.2.5):

$$\frac{\delta(\rho \Phi)}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x_i} \cdot \left(\rho u_i \Phi - \Gamma_\Phi \frac{\delta \Phi}{\delta x_i} \right) = q_\Phi; \quad (2.2.5)$$

čia Φ – skaliarinis dydis;

u_i – greičio vektorius, m/s;

Γ_Φ – difuzijos koeficientas, m²/s.

Norint ją išspręsti paprasčiau programine įranga kompiuteriu, lygtis turi būti pakeista į diskretinę formą. Šis procesas vadinamas diskretizacija. Tipiniai diskretizacijos metodai yra baigtinių skirtumų, baigtinių elementų ir baigtinių tūrių metodai. Toliau bus aprašomas baigtinio tūrio metodas. Šis

metodas nuo kitų skiriasi tuo, kad automatiškai bus pritaikomi visi trys apžvelgti dėsniai visose tūrio srityse. Dėl šios priežasties skaičiuojamojoje skysčių dinamikoje pirmenybė teikiama baigtinio tūrio metodui[43].

$$\int_V \frac{\delta(\rho\Phi)}{\delta t} dV + \int_S \left(\rho U_i \Phi - \Gamma \frac{\delta\Phi}{\delta x_i} \right) \cdot n_i dS = \int_V q_\Phi dV, \quad (2.2.6)$$

Fluidų dinamikos uždavinius galima išspręsti keliais metodais: analitiniu, eksperimentiniu ir kompiuteriniu modeliavimu. Kompiuterinis modeliavimas leidžia simuliuoti oro srautą, tačiau matematiškai negalima tiksliai atsakyti ar visada egzistuoja trimačiai sprendiniai. O jei jie egzistuoja, ar juose begalybės, vienaties ar trūkių.

Todėl, kad būtų lengviau ir paprasčiau atvaizduoti visą procesą, matematiniai modeliai yra vizualizuojami – sprendžiami kompiuterinio modeliavimo metodu. Tai leidžia daug detaliau įsigilinti į iškeltą užduotį ir yra palyginti daug pigesnis ir daugiau laiko sutaupantis būdas modeliuoti vykstančius reiškinius ir gauti tam tikrus rezultatus, bei simuliacijas. Tokiu būdu galima imituoti įvairiausias sąlygas, kokias eksperimento metu galbūt net nebūtų įmanoma sudaryti. Sekančioje lentelėje pateiktas palyginimas tarp skaičiuojamosios fluidų dinamikos ir eksperimentinio metodo.

9 lentelė. Skaitmeninio modeliavimo (SFD) ir eksperimentinio metodo palyginimas

	Skaitmeninis (SFD)	Eksperimentinis
Kaina	Maža	Didelė
Laikas	Trumpai	Ilgai
Mastelis	Bet koks	Mažas/vidutinis
Informacijos kiekis	Viskas	Tik žinomi ar išmatuoti parametrai
Pakartojamumas	Taip	Kartais galima
Saugumas	Taip	Kartais gali būti pavojinga

Skaičiuojamosios fluidų dinamikos privalumai:

- Analizės sąnaudos yra nedidelės, palyginti su eksperimentais.
- SFD analizei reikia mažiau laiko rezultatams gauti, palyginti su eksperimentine analize daugeliu sudėtingų atvejų.
- Atliekant eksperimentinius matavimus, negalima visose vietose išmatuoti tam tikrų parametrų.
- SFD analizėje pateikiama išsami ir daugelyje atvejų jau surinkta informacija, kurios papildomai ieškoti nereikia.
- Ją galima pritaikyti sprendžiant įvairias problemas įvairiomis aplinkybėmis.
- SFD analizė yra veiksmingas projektavimo optimizavimo metodas daugelyje pramonės šakų.
- Eksperimentinė analizė neretai gali būti ir pavojinga. Tuo tarpu skaitmeninis metodas to išvengia.

Toliau bus aptariamas skaitmeninės skaičiuojamosios (SFD) fluidų dinamikos metodas, naudojant baigtinio tūrio metodą Navjė-Stokso lygtims apskaičiuoti, naudojantis kompiuterine programine įranga. Šis metodas turi akivaizdžių pranašumų, palyginti su alternatyviais metodais, nes padeda giliau ištirti nagrinėjamą problemą ir yra ekonomišką būdas modeliuoti dinaminis reiškinius kartu su įvairiais kitais veiksniais ir sąlygomis.

2.3. Filtrinės struktūros modeliavimo metodika

Filtro morfologija, jo storis, pakuojantysis tankis, pluoštų gijų diametrai, porų dydis ir porėtumas turi didelę įtaką oro srauto prasiskverbimui tarp gijų. Tačiau viskas labai priklauso nuo to, kam yra naudojamas filtras, kokių savybių filtras turi būti ir kokioje aplinkoje filtras turės dirbti. Paprastai, nepriklausomai nuo to, koks vertinimo metodas taikomas, pirmenybė teikiama filtravimo efektyvumo nustatymui, o tik tada atsižvelgiama į slėgio nuostolius. Kadangi šiame tyrime bus analizuojamas oro srauto tekėjimas tarp mikro ir nano gijų ir srauto greičio pokyčiai, prieš modeliuojant reikėtų atkreipti dėmesį į šiuos dalykus:

Pirmiausia, reikėtų pasirinkti mikro ir nanopluoštų tinkamo diametro gijas. Mikropluoštas dažniausiai dėl savo gijų diametro sudaro neslydimo efektą, dėl to susidaro nemaži slėgio nuostoliai. Tuo tarpu nanopluoštas dėl savo ypatingai mažo gijų diametro sudaro slydimo efektą, srautas teka beveik nesulaikomas ir dėl to nanopluoštai nesudaro slėgio nuostolių [30].

Antra, reikėtų nustatyti pluošto sluoksnio storį. Šis rodiklis priklauso nuo oro filtro struktūros ir eksploataavimo sąlygų. Kadangi čia bus kompozitinis filtras iš mikro ir nanopluoštų, storis priklausys labiau nuo sluoksnių kiekio [41].

Trečia, reikėtų nepamiršti, kad struktūra nebūtų per daug glaudi arba per daug laisva. Atrodo, kad porų skaičių galima padidinti, tačiau tai gali sukelti dvi pasekmes. Viena iš jų yra ta, kad oro srautas netoli porų krašto kruopščiai neprateka ir susidaro sustingusi oro srauto erdvė, todėl sumažėja veiksmingas filtravimo plotas – ypač taip nutinka mikropluoštų filtruose dėl taip vadinamo neslydimo efekto. Kita priežastis yra ta, kad filtro porų dydis mažėja, kai didėja jų skaičius. Veikiant oro srauto slėgiui, minkšta filtravimo medžiaga tarp dviejų akių susispaudžia, todėl padidėja slėgio nuostoliai. Norint gauti didžiausią veiksmingą filtravimo plotą, reikia visapusiškai atsižvelgti į įvairius veiksnius, įskaitant abiejų pluoštų gijų diametrą, filtro storį ir atstumą tarp gijų [17][18].

2.4. „SolidWorks 2022“ programinė įranga

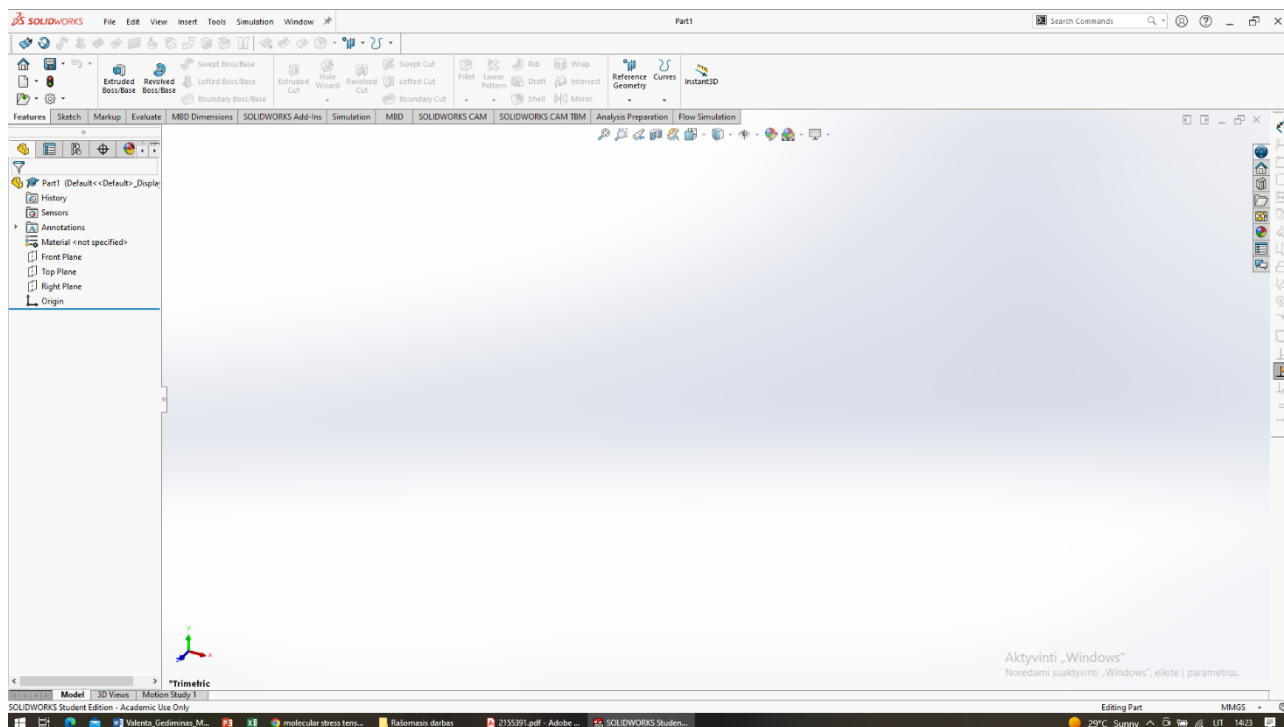
Kompiuterinis modeliavimas tapo labai svarbiu problemų analizės ir sprendimo įrankiu. Sprendžiamos yra ne tik sudėtingos lygtys, bet ir kuriama vizualizacija pačio proceso, kuri galima lengviau suprasti ir analizuoti. Viena populiariausių tarp inžinierių „SolidWorks“ 3D yra „Dassault Systèmes“ išleista kietojo kūno modeliavimo, kompiuterinio projektavimo (CAD) ir kompiuterinės inžinerijos (CAE) programa, kuri leidžia iš karto modeliuoti konstrukciją 3D formatu ir iš karto atlikti visus reikiamus pakeitimus.

"SolidWorks Flow Simulation" palaiko įvairias analizes, įskaitant vidinį ir išorinį srautus, laminarinį ir turbulentinį srautus, pastovios būsenos ir pereinamųjų procesų analizę, spūdžius ir nespūdžius srautus, šilumos perdavimo analizę ir daugelį kitų. Naudotojai gali modeliuoti įvairius fizikinius reiškinius, pavyzdžiui, skysčio tekėjimą, šilumos perdavimą, slėgio pasiskirstymą ir greičio profilius.

Programinėje įrangoje naudojamas galingas skaičiavimo sprendiklis, kuris efektyviai sprendžia skysčių tekėjimo ir šilumos perdavimo lygtis. Joje taikomas baigtinio tūrio metodas, kuriuo diskretizuojama sritis ir sprendžiamos skysčių srauto ir energijos lygtys, todėl gaunami tikslūs ir patikimi rezultatai.

Vaizdinės grafikos naudojimas padeda suprasti komponento funkcijas ir savybes. Tai taip pat palengvina paaiškinti mechaninių komponentų naudingumą modelyje, greitai iširti įvairius galimus suprojektuotus modelius. Tai leidžia įvertinti daugybę scenarijų pakeitus kokio nors parametro vertę.

Ekonomiškumas tampa šioje vietoje irgi svarbus, kadangi su programos pagalba modelio koncepcinis sudarymas sutrumpina gamybos laiką ir patobulina procesą. Taip pat vienas svarbiausių visiškai integruotos 3D projektavimo kūrimo aplinkos „SolidWorks“ privalumų yra tas, kad ji dar ir sumažina bet kokių žmogiškųjų klaidų riziką.



14 pav. „SolidWorks 2022“ 3D darbinė aplinka

Bet kokių atveju, bet koks struktūros formavimas ir srautų analizė reikalauja galingesnių kompiuterio parametrų. Žemiau lentelėje pateikti reikalingi kompiuterinės sistemos reikalavimai skirtingo sudėtingumo struktūroms formuoti ir skaičiavimus atlikti programoje „SolidWorks 2022“.

10 lentelė. Kompiuterinės sistemos reikalavimai atliekant tam tikro kompleksškumo uždavinius „SolidWorks 2022“ programoje

Parametrai/Modelio sudėtingumas	Paprastoms struktūroms iki 200 dalių ir paprastiems srauto matavimams	Kompleksinėms struktūroms, turinčioms iki 1000 dalių ir sudėtingesniems srauto matavimams	Labai kompleksinėms struktūroms, turinčioms daugiau nei 1000 dalių ir ypač sudėtingiems srauto matavimams
Procesorius	3,3 GHz arba greitesnis, Intel® Core i5, i7 arba ekvivalentas AMD®	3,3 GHz arba greitesnis, Intel® Core i5, i7 arba ekvivalentas AMD®	3,3 GHz arba greitesnis, Intel® Core i5, i7 arba ekvivalentas AMD®
Operacinė sistema	Windows® 11 ar 10	Windows® 11 ar 10	Windows® 11 ar 10
Atmintis	8GB ar daugiau	16GB ar daugiau	32GB ar daugiau
Kietasis diskas	SSD > 250GB	SSD > 250GB	SSD > 250GB

Vaizdo plokštė	NVIDIA® Quadro® A2000	NVIDIA® Quadro® RTX A4000	NVIDIA® Quadro® RTX A5000, A6000, 8000
----------------	-----------------------	---------------------------	--

Šioje programoje yra ir iš anksto įdiegtos universalios dokumentavimo parinktys, pavyzdžiui, kai kurių gaminių geometrijos ir matavimai, įvairių medžiagų specifikacijos ir kiti parametrai, kurie supaprastina visą komponentų dizaino parametrizavimo procesą.

„SolidWorks“ sukurtose struktūrose pati programa padeda aptikti neatitikimus ir leidžia dizaineriui atlikti modelių ir eskizų pakeitimus, kol jie dar nebaigti. Tai padidina modelio išbaigimo efektyvumą, nes vėliau nereikia iš naujo svarstyti koncepcijos.

„SolidWorks“ programinėje įrangoje, yra integruotas intuityvus skaitmeninis skaičiuojamosios fluidų dinamikos (SFD) metodas, leidžiantis greitai ir lengvai modeliuoti skysčių ir dujų srautus per struktūras, aplink jas vidinėje ar išorinėje aplinkoje tam tikrose nustatytose aplinkos sąlygose, kad būtų galima apskaičiuoti norimus parametrus.

SFD metodika leidžia padalinti modelio sritį į daugybę elementų ir pakeisti diferencialines lygtis jų algebriniais atitikmenimis. Taip galima gauti įvairių parametrų rezultatus, priklausomai nuo konkrečią problemą apibūdinančių kraštinių sąlygų.

„SolidWorks“ taip pat padeda apskaičiuoti jėgas, atsirandančias dėl slėgio, komponentų įtempių ir deformacijų, vibracijos ir temperatūros poveikio, taip pat ir oro srauto judėjimą ir jo pokyčius modelio tūryje. Todėl rezultatai yra nuoseklūs visame procese, o ir sumažėja brangiai kainuojančių klaidų ir problemų tikimybė.

Skysčių dinamikos skaitmeninis modeliavimas „SolidWorks“ programoje atliekamas keliais etapais:

- Struktūros sukūrimas;
- Baigtinių elementų tinklelio generavimas;
- Skysčio savybių ir fizikinių aplinkybių apibrėžimas;
- Srities apibrėžimai ir kraštinės sąlygos;
- Lygčių skaičiavimai ir kontrolė;
- Rezultatų pateikimas ir vizualizavimas.

2.5. Naudota kompiuterinė įranga

Darbo pradžioje buvo naudojamas vidutinių parametrų „Lenovo Y700“ nešiojamas kompiuteris. Tokio pajėgumo kompiuterio pakanka kelioms nesudėtingoms struktūroms paruošti. Taip pat, šiuo įrenginiu jau buvo atlikti tam tikri bandymai formuojant įvairias nesudėtingas struktūras ir atliekant srautų analizę – oro, vandens.

Vėliau struktūrai vis tankėjant ir ruošiant tikslesnių diametrų gijų pluoštus reikėjo galingesnių parametrų kompiuterio. Atliekant skaitmeninį modeliavimą reikia dar galingesnių parametrų kompiuterių, kad sumažinti skaičiavimo laiką ir struktūros koregavimą – dėl to, buvo panaudoti dar du Acer ir NZXT kompiuteriai (žr. 8 lentelę).

Viso šiame darbe buvo naudojami visi keturi skirtingų našumo parametrų kompiuteriai atliekant skirtingo sudėtingumo darbus. Tokiu būdu buvo sumažintas struktūros ruošimo, klaidų sprendimo, modelio paruošimo ir skaičiavimo laikas.

11 lentelė. Darbo metu naudotų kompiuterių parametrai

Parametrai/Pavadinimas	Lenovo Y700	Dell	Acer AN515-54	NZXT
CPU tipas	Intel® Core™ i5-6300HQ, 4 branduolių, 64-bit	Intel® Core™ i7-10850H, 6 branduolių, 64-bit	Intel® Core™ i7-9750H, 12 branduolių, 64-bit	AMD Ryzen 9 3900X, 12 branduolių- 64-bit
CPU greitis	2,30 GHz	2,70 GHz	2,60 GHz	3,79 GHz
GPU tipas	NVIDIA GeForce GTX 960M	NVIDIA Quadro P620	NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti	NVIDIA GeForce RTX 2060
RAM, operatyvioji atmintis	4,00 GB	16,00 GB	32,00 GB	64,00 GB
Operacinė sistema	Windows 10 Pro	Windows 10 Education	Windows 10 Pro	Windows 10 Pro

2.6. Rezultatų apdorojimas

Skysčių modeliavimo rezultatai gali būti veiksmingai pateikiami vizualiai, kad būtų lengviau stebėti vykstančius procesus ir prasmingai interpretuoti gautus rezultatus. Vien tik skaitinės vertės dažnai ne visiškai atspindi procesų dinamiką. Pagrindinis vizualizavimo tikslas - tiksliai ir aiškiai pateikti modeliavimo rezultatus. Šiam tikslui pasiekti taikomi įvairūs vizualizavimo metodai:

- Dvimačiai grafikai. Tai lentelės, grafikai ar diagramos kiekybiniais duomenimis atvaizduoti.
- Vektoriniuose grafikuose srauto laukas vaizduojamas vaizduojant greičio vektorius tam tikrose srityse vietose. Juose galima matyti skysčio judėjimo kryptį ir dydį, todėl galima vizualiai suprasti skysčio srauto modelius, sūkurius ir srovės linijas;
- Kontūriniai brėžiniai rodo konkretaus kintamojo ar savybės pasiskirstymą skaičiavimo srityje. Naudojant spalvinius gradientus šiuose grafikuose vizualiai parodoma, kaip dydis kinta visoje analizuojamoje srityje. Kontūriniai brėžiniai naudingi tokiems parametrams, kaip greitis, slėgis, temperatūra ar koncentracija, iliustruoti.;
- Animacija. Tai dinamiškai vaizdiniai modeliujamo skysčio srauto vaizdai laikui bėgant. Nuosekliai rodant keletą kadru ar momentinių nuotraukų, animacijos gali efektyviai perteikti skysčio elgsenos, pereinamųjų reiškinų ir dinaminių srauto modelių kitimą laike.

Šiame konkrečiame tyrime, kadangi konstrukcija bus konstruojama 3D formatu, dvimačiai vizualizavimo metodai nebus taikomi. Tačiau, siekiant veiksmingai vizualizuoti skysčio tekėjimo reiškinius, bus naudojami vektoriniai grafikai, kontūriniai grafikai ir animacijos metodai. Taikant šiuos vizualizavimo metodus, galima visapusiškai suprasti modeliujamus procesus ir jų charakteristikas, o tai taip pat padės analizuoti ir interpretuoti rezultatus.

3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Remiantis literatūros apžvalga ir metodine dalimi buvo sukurta filtrinė struktūra iš neaustinių mikro ir nano gijų pluoštų, bei sukalibruotas modelis. Taip pat atrandami labiausiai tinkami įvedami parametrai ir funkcijos, leidžiančios apskaičiuoti kuo daugiau nežinomųjų. Galutinė modelio struktūra buvo išgauta po daug nepavykusių bandymų ir skaičiavimų. Didžioji dalis klaidų buvo nenumatytos ir dėl to prailgino tyrimo procesą. Be to jos buvo dokumentuojamos, kad sekančiuose tyrimuose šių klaidų būtų galima išvengti.

Dažniausiai pasikartojančios klaidos buvo neįvertinamas skaičiuojamosios srities tūris ir besikertantys ar besiliečiantys paviršiai. Šios klaidos lėmė ilgesnį tyrimo laiką. Skaičiavimai programoje užtruko įvairiai nuo kelių minučių iki keliasdešimt valandų, kartais kelių šimtų valandų. Viskas priklausė nuo modelio įvedamų parametrų, struktūros sudėtingumo, dydžio parametrų, skaičiuojamojo tinklelio tankumo ir norimų gauti rezultatų.

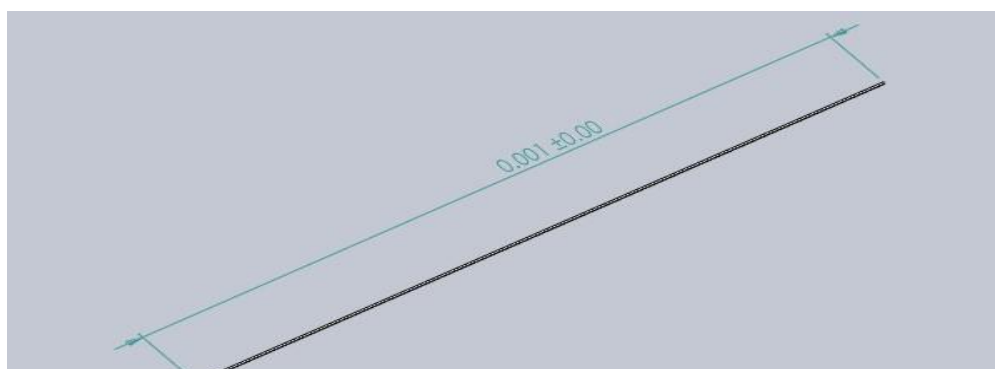
3.1. Struktūros paruošimas

Iš literatūros apžvalgos žinoma, kad neaustiniai mikropluoštiniai filtrai su nanopluoštais dažnai gaminami kaip daugiasluoksniai filtrai. Toks mikro/nano kompozitinis pluoštas skirtas efektyviam oro srauto filtravimui sudarytas iš netvarkingai ir tankiai išsidėsčiusių neaustinių mikro ir nanopluošto gijų, kurios suteikia filtrui esminių papildomų fizinių ir mechaninių savybių.

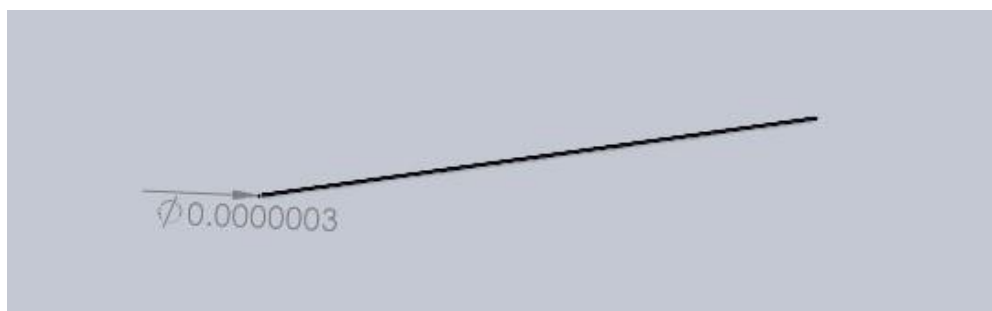
Dėl savo išskirtinės struktūros kompozitinis pluoštas išgauna didelį paviršiaus ploto ir masės santykį, mažų porų didelį tūrį. Tokia struktūra įprastai dėl savo palankių savybių pasižymi aukštu mažesnių už mikrometrą dalelių filtravimo efektyvumu, o tuo pačiu išlaiko santykinai mažus slėgio nuostolius [37].

Struktūra pirmiausia pradedama daryti nuo skirtingų pluoštų išgavimo – mikro ir nanopluošto atskirai. Kaip žinoma iš literatūros apžvalgos, polimerinės medžiagos, šiuo atveju polipropilenas, turi savybę gijas išlaikyti standžias. Gijų diametras buvo atsižvelgtas į tai, kad mikropluoštų gijų diametras dažniausiai būna nuo 3 iki 10 μm , o nanopluošto gijos nuo 100 iki 500 nm.

Kadangi šio tyrimo tikslas yra nustatyti kaip teka oro srautas mikro/nano kompozitiniame pluoštiniame filtre, tikintis, kad bus mažiausi slėgio nuostoliai – ruošiama struktūra iš 3 μm gijų mikropluošto ir iš 300 nm skersmens gijų nanopluošto, kai gijų ilgiai 1 mm. Toks ilgis pasirinktas dėl to, nes didesniuose modeliuose su bent 1cm ilgio gijomis, kompiuterio pajėgumų gali neužtekti. Žemiau paveikslėliuose 15 ir 16 pavaizduotos 3D formatu suformuotos mikro ir nano gijos.



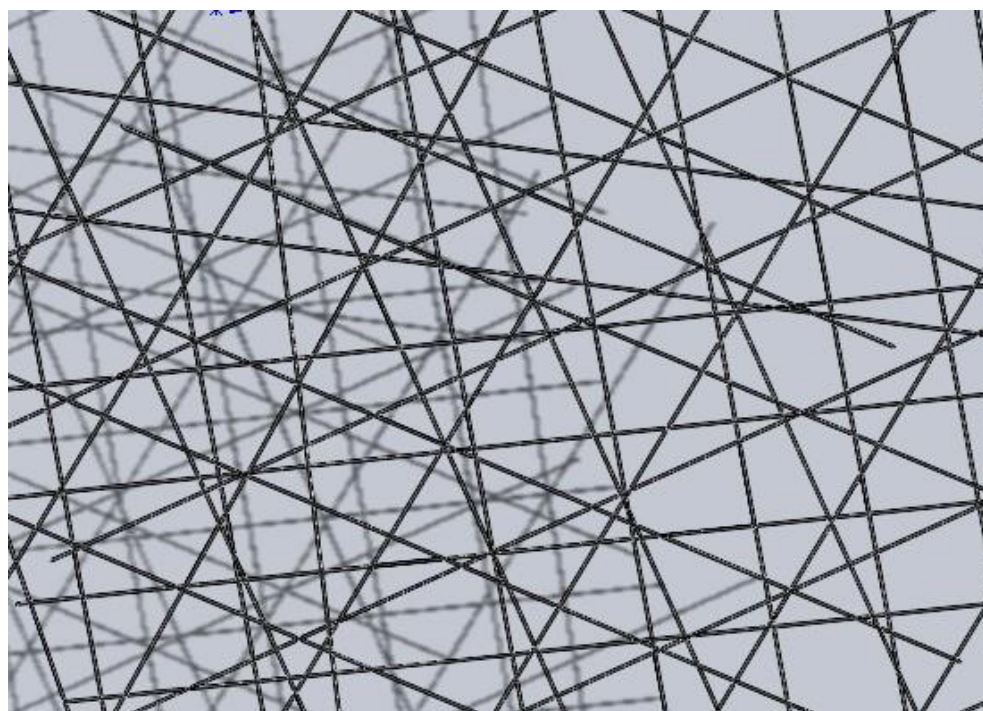
15 pav. Suformuota 1 mm ilgio ir 3 μm diametro gija μm



16 pav. Suformuota 1 mm ilgio ir 300 nm diametro gija

Paruoštos gijos gali būti pradedamos naudoti pluoštams gauti. Pirmiausia buvo pradėta ruošti mikropluoštą, kadangi šių gijų diametras yra didesnis, tokias dalis yra lengviau rasti ir valdyti užtrunka mažesnę laiko tarpą. Mikropluoštas turėjo būti sudarytas iš nesimetriškai sudėliotų gijų ir statmenai žvelgiant į pluoštą turėti vidutiniškai atstumus viena nuo kitos 1-50 μm . Todėl atitinkamai gijos buvo sudėliotos plokštumoje taip, kad atitiktų literatūros apžvalgoje apžvelgtus mikropluoštus.

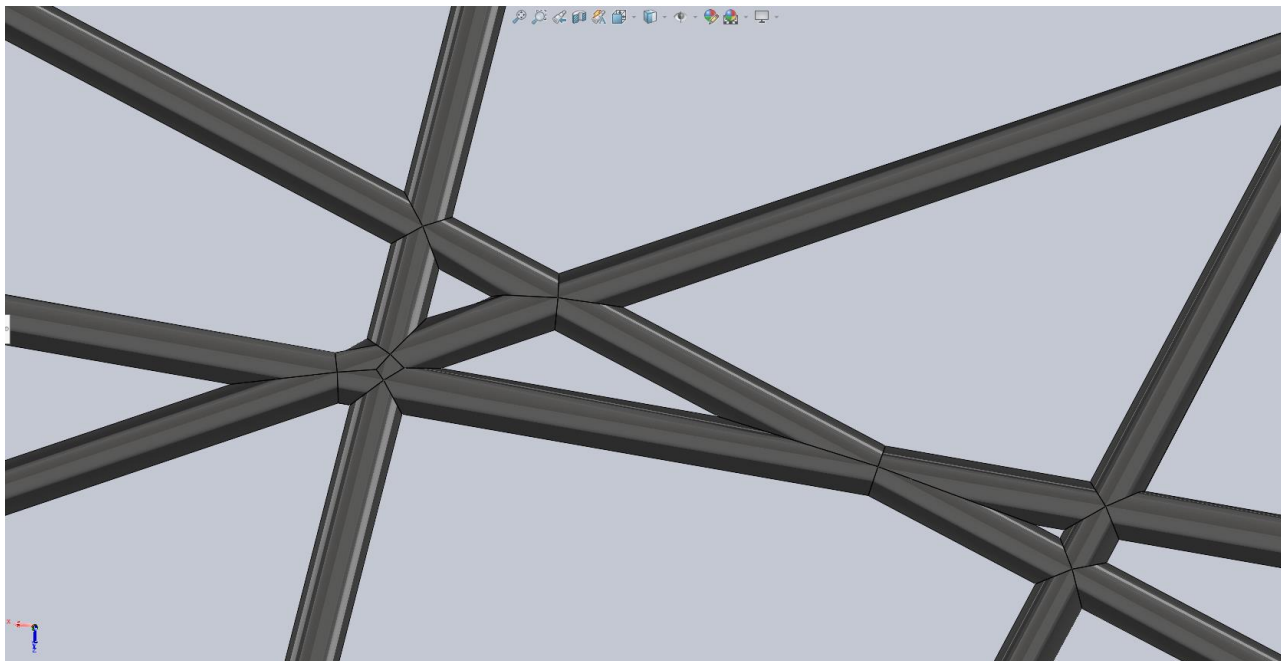
Būtina nepamiršti, kad kuriama struktūra yra tik galutinio paruošto filtro kažkelintoji tūrio dalis ir gijos nebūtinai bus taip identiškai išsidėstę, kaip kad suformuotame šio tyrimo mikropluošte Paveikslėlyje žemiau pavaizduotas pirmasis mikropluoštas iš 3 μm gijų.



17 pav. Suformuotas vieno sluoksnio mikropluoštas. Vaizdas iš viršaus

Tam, kad programa galėtų pradėti atlikti skaičiavimus – jokie paviršiai negali liestis ar kirstis kokios nors dalys. Šiame darbe nepavyko pakankamai tankiai sudėlioti gijų nesiliečiant, todėl buvo bandytos panaudoti dvi esamos funkcijos „SolidWorks“ programoje, leidžiančios tas dalis ar paviršius sujungti – „kombinuoti“ (angl. – „combine“) ir „susikirsti“ (angl. – „intersect“).

Abi funkcijos atlieka panašų procesą, tai yra sujungia tas vietas, kuriose dalys kertasi arba liečiasi, į vieną dalį. Vienas svarbus aspektas tai, kad ruošiant gijų mikropluoštą liestis dalys gali tik toje pačioje plokštumoje ir būti vienodo diametro, kitaip funkcijos tampa neveiksmingomis ir veda prie neatitikimų (Priedas 1, Priedas 2). Šiame tyrime gijos sudėliotos vienoje plokštumoje ir sėkmingai sujungtos „kombinuoti (angl. – „combine“)) funkcija. Žemiau paveikslėlyje pavaizduotos mikropluošto gijos didesniame mastelyje jau po kombinavimo funkcijos.



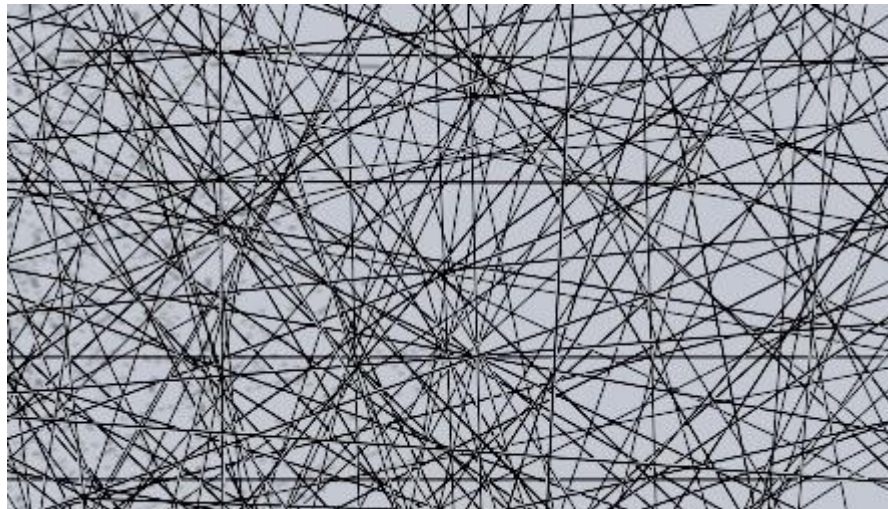
18 pav. Mikropluoštas po funkcijos „kombinuoti“. Vaizdas iš viršaus

Visada gavus bet kokią dalį, šiuo atveju pirmąjį mikropluoštą, būtina patikrinti ar geometrija šio konstrukto yra teisinga, nėra jokių klaidų – su funkcija „patikrinti geometriją“ (angl. – „check geometry“). Ši funkcija leidžia sutaupyti laiko iš anksto ir pavaizduoti visus esamus neatitikimus modelyje ir taip kiekvieną dalį peržiūrėjus atitinkamai paruošti be neatitikimų (5 priedas).

Kaip jau buvo minėta anksčiau, kompozitinis pluoštas susidaro iš mikropluoštų ir nanopluoštų. Todėl paruošus minėtąjį pluoštą, ruošiamas nanopluoštas. Šio pluošto paruošimas yra sudėtingesnis, nes pačios gijos yra 10 kartų mažesnės, o pats pluoštas, kaip žinoma iš literatūros apžvalgos, yra daug kartų tankesnis ir statmenai žvelgiant į pluoštą vidutiniškai turėti 1 nm – 1 μm atstumus tarp gijų [36].

Pirmiausia buvo bandoma ruošti nanopluoštą iš raitytų gijų (3 priedas). Šiuo atveju panaudoti susikirtimo ar sukombinavimo funkcijos taip, kaip su mikropluoštu programoje nepavyko – abejomis funkcijomis buvo pasiekti neatitikimai, kurie taip ir nebuvo išspręsti. Todėl gijos buvo formuojamos standžios kaip mikrogijos, kaip įmanoma mažesniais tarpais tarp gijų nesiliečiant, sluoksniuojant į penkis vidutiniškai 50nm atstumu atitolusius vienas ant kito sluoksnius.

Toks atstumas buvo parinktas ne be reikalo – programa tokį atstumą vertina kaip tarpą, o besikertančias gijas buvo galima atskirti sudėliojus skirtingose plokštumose. Atstumą sumažinus dar mažiau, programa gali tą vietą matyti, kaip dviejų dalių susilietimą, o tai gali sukelti neatitikimą. Žemiau 18 paveikslėlyje pavaizduotas suformuotas nanopluoštas.



19 pav. Suformuota nanopluoštas. Vaizdas iš viršaus

Iš literatūros apžvalgos žinoma, kad kompozitinių mikro/nano pluoštų filtrų storis dažniausiai būna 0,1 – 0,5 mm storio. Todėl šiam tyrimui buvo paruoštos trijų skirtingų morfologijų struktūros. Žemiau lentelėje išvardinti jų išmatavimai ir fizinės savybės.

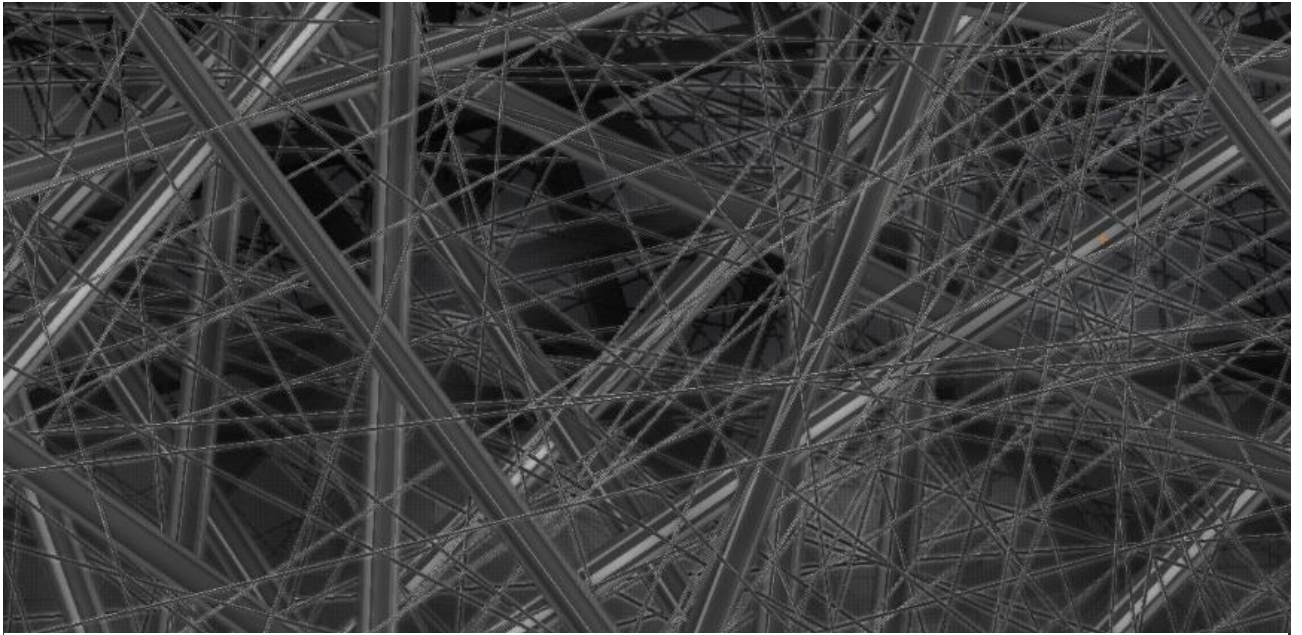
12 lentelė. Skirtingų morfologijų filtrų charakteristika

Morfologija (storis)	Mikro-nano (0,45mm)	Mikro-5 nano, (0,276mm)	Mikro-5 nano, (0,138mm)
Tarp nano vamzdelių, μm	0,05-1	0,05-1	0,05-1
Tarp mikro vamzdelių, μm	0,1-40,0	0,1-40,0	0,1-40,0
Tarp pluoštų, μm	0,05-0,7	0,05	0,05
Mikropluošto storis, μm	3	3	3
Nanopluošto storis, μm	1,7	8,5	8,5
Filtro ilgis x plotis, μm	1000x1000	1000x1000	1000x1000
Pakuojantysis tankis, %	7,48	3,416	3,416
Paviršiaus plotas, mm ²	32,46	12,65	6,33
Masė, mg	$2,054 \cdot 10^{-2}$	$5,744 \cdot 10^{-3}$	$2,872 \cdot 10^{-3}$

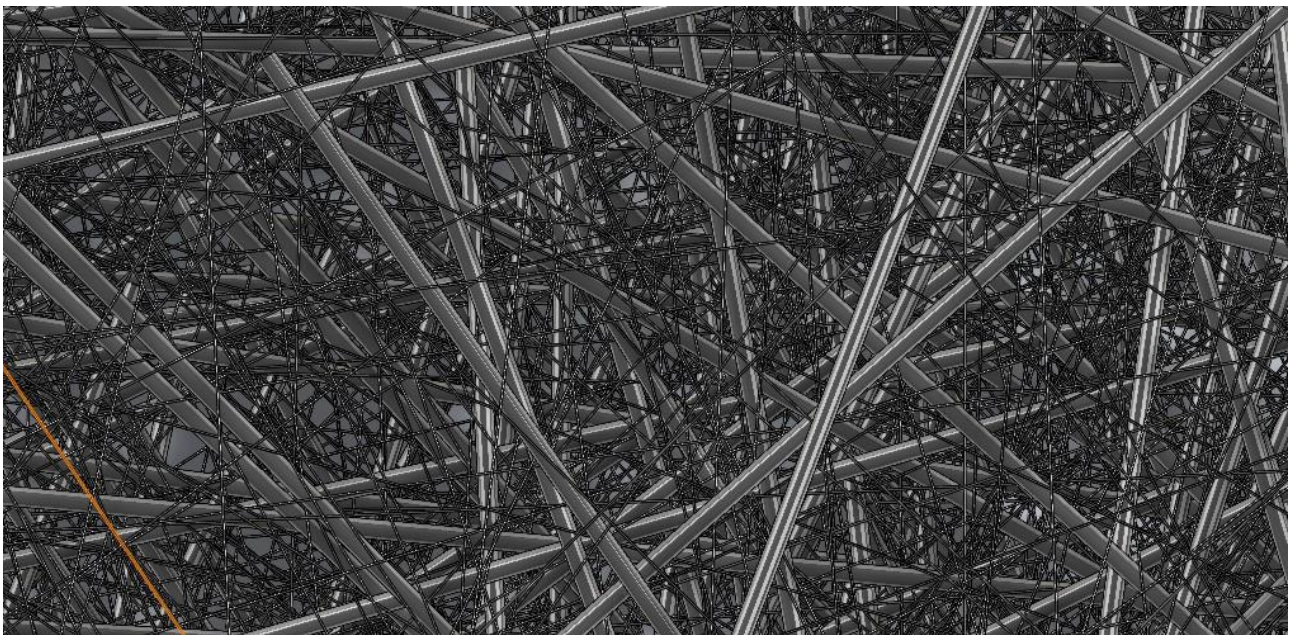
Abudu paruošti pluoštai, gali būti dedami vienas ant kito atsižvelgiant į vieną ir tą pačią plokštumą – kad pluoštai, būtų vienoje linijoje, neišsibarstę erdvėje. Vizualiai įvertinus SEM panašių kompozitinių pluoštų nuotraukas, buvo ruošiami panašūs kompozitai. Buvo nuspręsta, kad bus ruošiamas vienas iš mikropluoštų ir nanopluoštų paeiliui, o dar du padidinus nanopluoštų kiekį ant mikropluoštų penkis kartus vien dėl to, kad būtų tankesnis nanopluoštų sluoksnis [22][34].

Pradėjus formuoti sluoksnius iš skirtingų pluoštų, buvo pasiekta riba, kai nebuvo galima palikti mažesnio tarpo tarp pluoštų nei 50 nanometrų, taip pat, kaip ir formuojant nanopluoštą. Kitu atveju modeliavimo programa tą vietą mato, kaip besiliečiantį paviršių ir nesupranta ką su ja daryti. Dėl to buvo palikti atitinkami tarpai vienos ir kitose struktūrose, kad išvengti galimų neatitimų struktūroje ir vėliau atliekant skaičiavimus. Tarpai tarp mikropluoštų ir nanopluoštų vietomis palikti skirtingi ir didesni nuo 50 iki 700 nanometrų. Tam, kad pluoštai išsidėliotų į skirtingas puses, kiekvienas sluoksnis turėjo būti pasuktas į vieną ar į kitą pusę, dėl to kiekvienas sluoksnis buvo pasuktas

atsitiktinai 28° kampu, kad nei vienas sluoksnio gijos nebūtų nukreiptos į tą pačią pusę. Žemiau paveikslėliuose pateikiamos gautų struktūrų vizualizacijos.



21 pav. Suformuota mikro-nano kompozitinė filtrinė struktūra, 0,138mm storio. Vaizdas iš viršaus



20 pav. Suformuota mikro-nano kompozitinė filtrinė struktūra, 0,45mm storio. Vaizdas iš viršaus

Dėl savo didelio paviršiaus ploto ir didelio akytumo tokie kompozitiniai filtrai nanoplušto pagalba turėtų nesudaryti didelių slėgio nuostolių ir likti aukšto dalelių sulaikymo efektyvumo. Taip turėtų

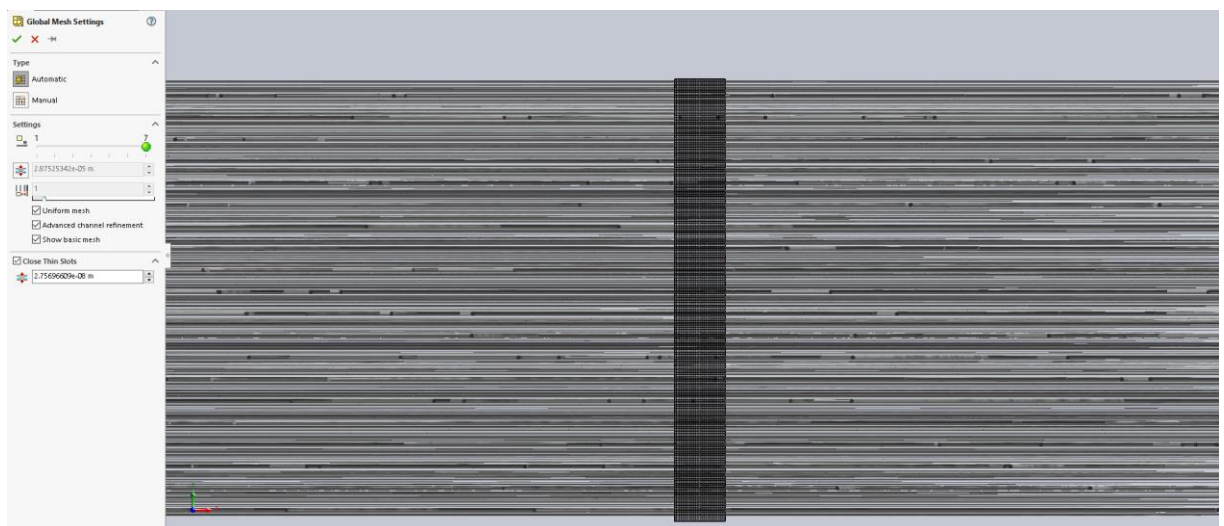
būti todėl, nes tankus nano gijų pluoštas sudaro slydimo efektą. Kurį galbūt pavyks pavaizduoti po skaičiavimų, dėl kurio srautas nestabdomai gali tekėti toliau, o dalelės atsitiktinai ar ne sulaikomos. Tuo tarpu smulčiausios dalelės mažesnės už $1\ \mu\text{m}$ turėtų būti beveik pilnai būti sulaikomos.



22 pav. Suformuota mikro-nano kompozitinė filtrinė struktūra, analogiška 1 paveikslėlyje, tik dvigubai storesnė – 0,276 mm. Vaizdas iš viršaus

3.2. Baigtinių elementų tinklo generavimas

Tinklelio sudarymas atlieka labai svarbų vaidmenį atliekant struktūros analizę, nes nuo jos priklauso modeliavimo rezultatų tikslumas ir patikimumas. Programinėje įrangoje naudodami tinklelio valdymą, galima nustatyti skirtingus baigtinių elementų dydžius skirtingiems komponentams, paviršiams ir briaunoms, todėl galima tiksliau atvaizduoti geometrines detales ir pagerinus bendrą tinklelio kokybę tikėtis tikslesnių rezultatų.

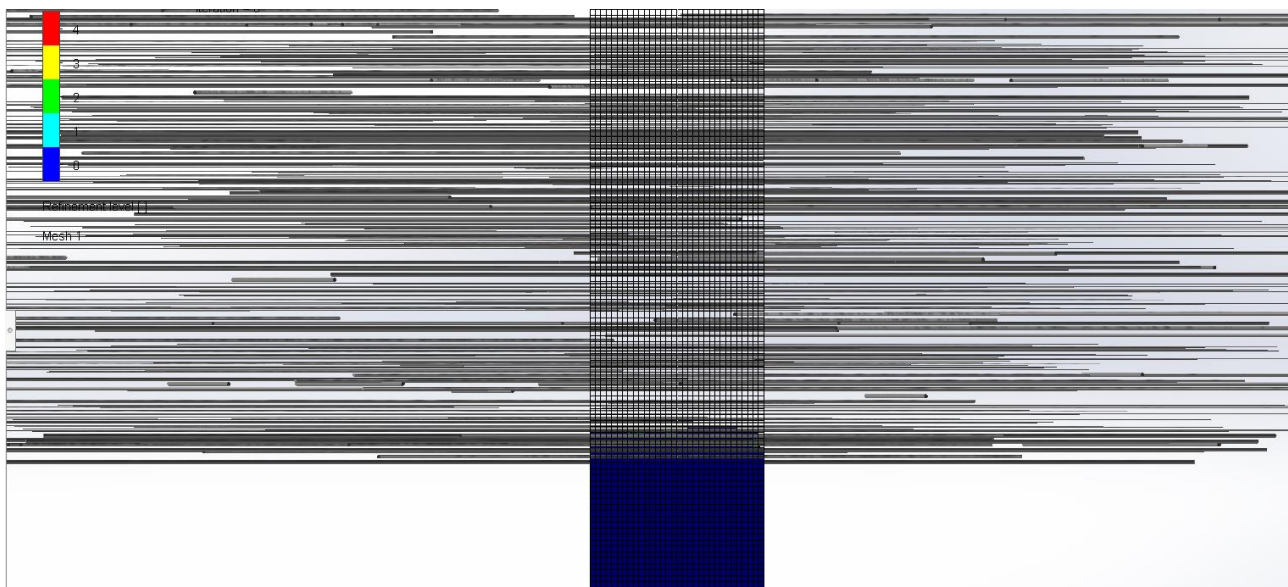


23 pav. Baigtinių elementų tinklelio generavimas automatinio būdu. Vaizdas iš priekio

Reikia paminėti, kad bet koks tinklelio generavimas reikalauja daug laiko resursų. Pavyzdžiui, jeigu tinklelis formuojamas automatinio būdu – kuriame yra nuo 1 iki 7 lygiai – programa išsprendžia greičiau, nei rankiniu būdu parinkus norimus parametrus, tačiau ne visada gaunami norimi rezultatai.

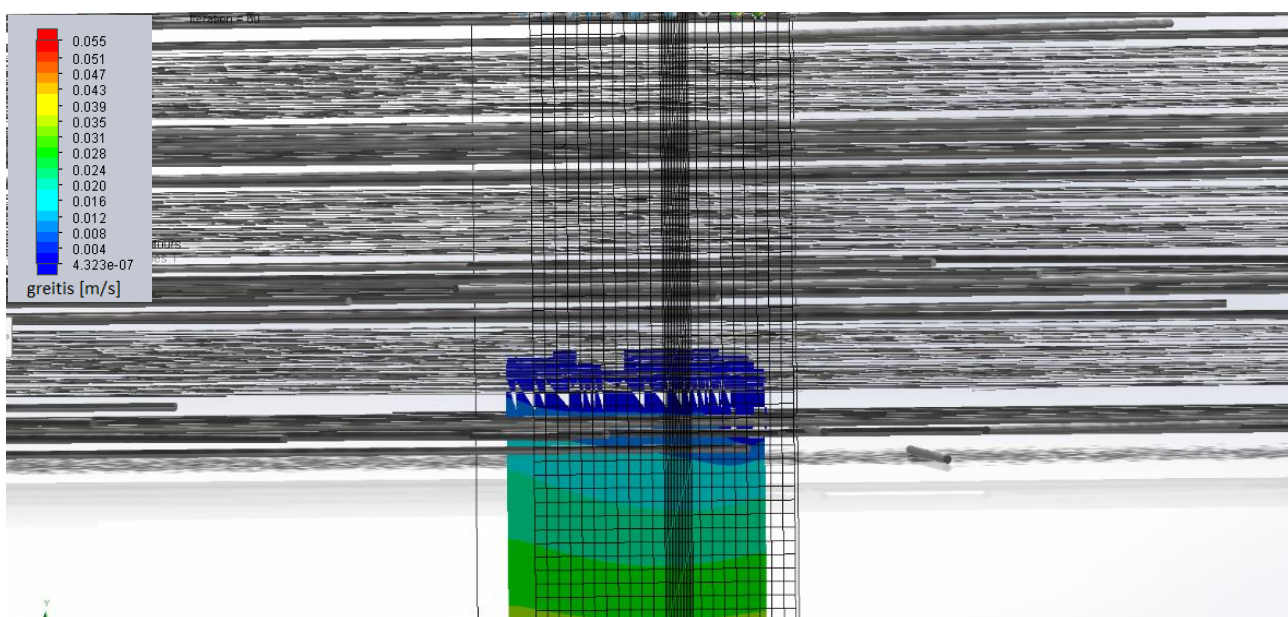
Priklausomai nuo tinklelio sudėtingumo ir dalių dydžio, ypatingai dėl mažų struktūrų šiame tyrime – tinklelis turi būti labai tankus ir smulkus. Laiko intervalas tinkelelio generavimui yra labai platus, šio paruošimas gali užtrukti nuo minutės iki keliolikos minučių ar kelių valandų lygiams didėjant, ypač rankiniu būdu nustatius aukštus parametrus, eksponentiškai didėja ir laiko intervalas.

Paveikslėlyje žemiau vaizduojamas automatiškai sukurto tinklo aukščiausiu lygiu – akivaizdu, kad tokio generavimo neužtenka, nors tinklelis atrodo pakankamai tankus.



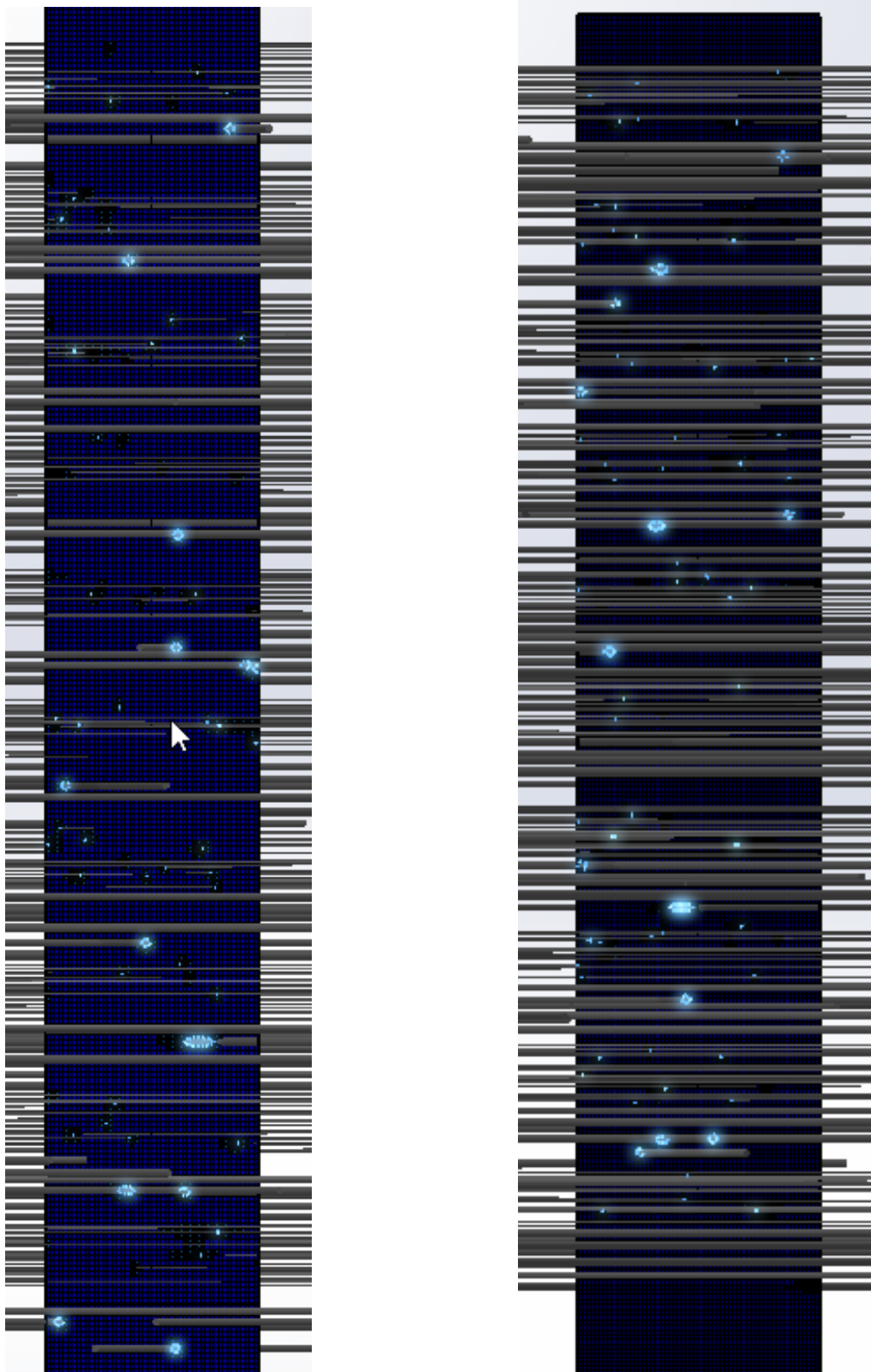
24 pav. Automatiškai sugeneruoto baigtinio elemento tinklelio rezultatai. Kairėje kampe nurodyti 4 tinklelio lygmenys. Vaizdas iš priekio

Paveikslėlyje žemiau matosi tokio tinklelio neigiamos pasekmės rezultatuose – greičio kitimo skerspjūvyje akivaizdžiai rezultatai baigiasi ties pirmais filtro pluoštais.



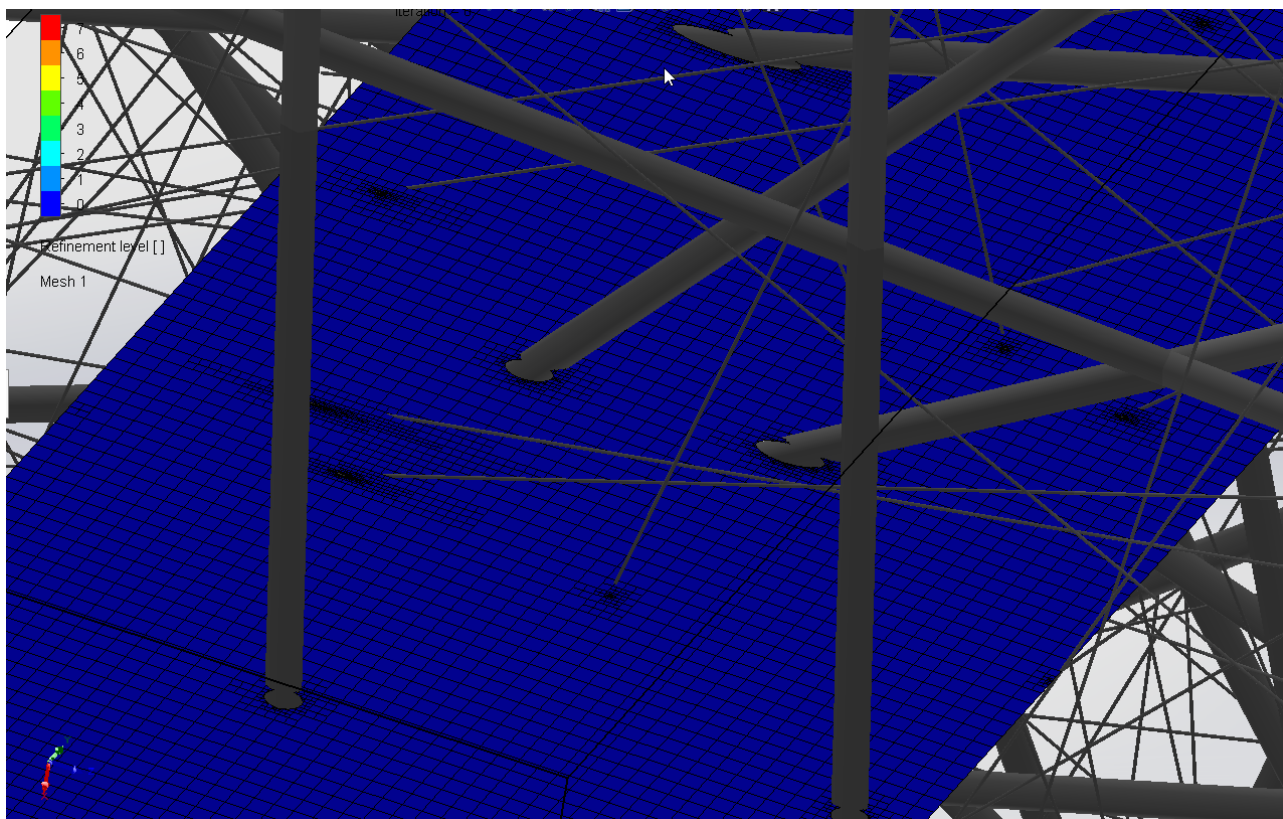
25 pav. Baigtinio elemento tinklelio pavaizduoto 23 paveikslėlyje – greičio kitimo rezultatai. Vaizdas iš priekio

Koreguojant tinklelio parametrus į dar tankesnę pusę, kad labiau atsižvelgtų į smulkias dalis, gaunamas tinklelis jau per visą filtrą, ir gijas apstato tvarkingais elementais. Tačiau matosi, kad tankumo lygis smulkiausiose vietose vis dar yra per žemas.



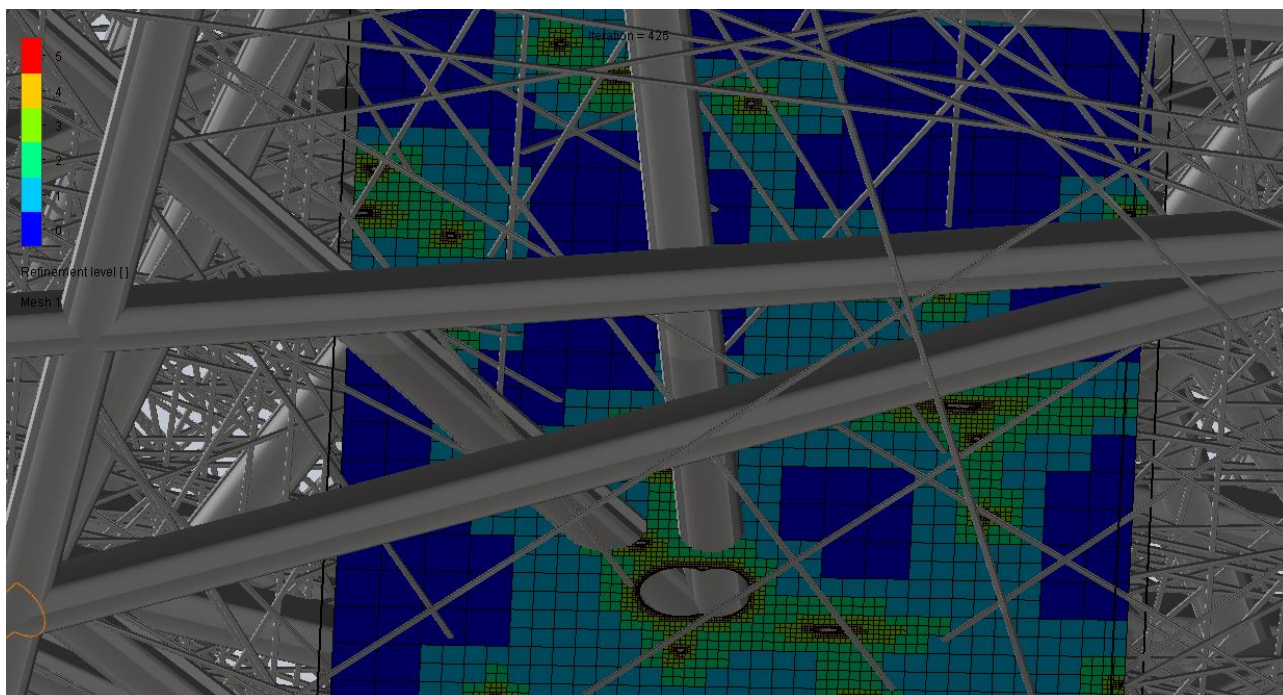
26 pav. Baigtinio elemento tinklelio rezultatai. Vaizdas iš priekio ir šono

Paveikslėlyje žemiau pavaizduotas baigtinių elementų tinklelis iš 25 paveikslėlio didesniu masteliu.



27 pav. Baigtinio elemento tinklelio pavaizduotame 25 paveikslėlyje vizualas iš arčiau

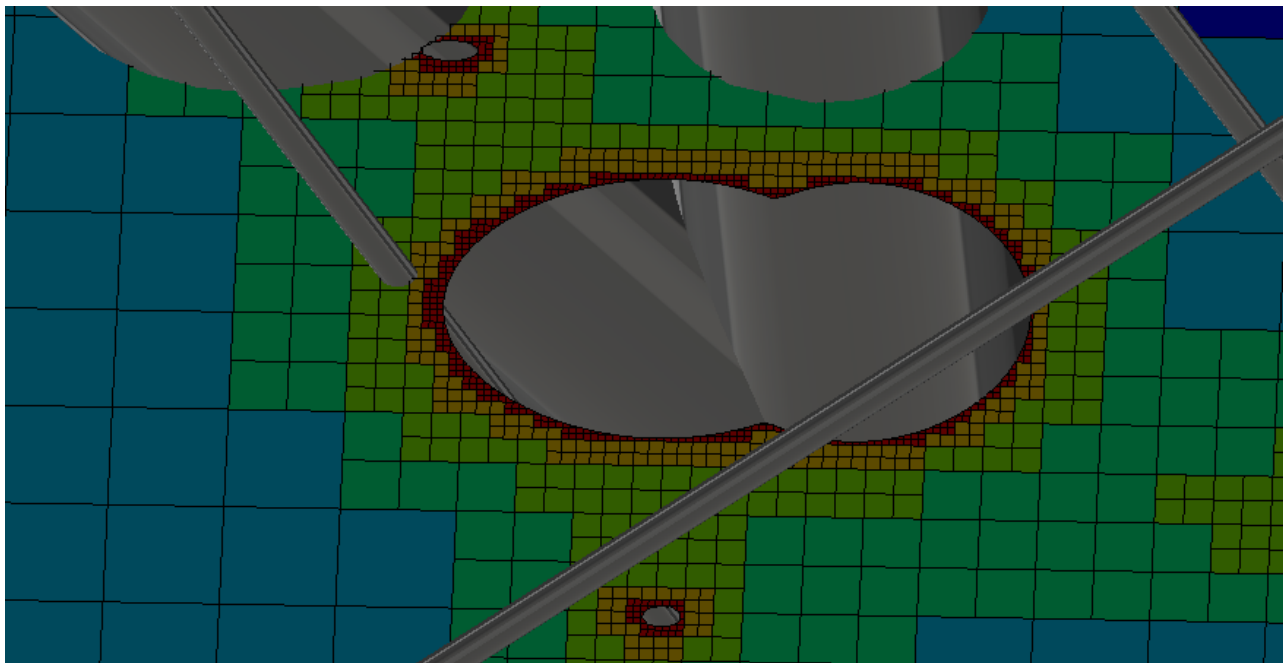
Paveikslėlyje žemiau pavaizduotas tinklelis, kuris buvo paruoštas rankiniu būdu pagal 4 priede esančius parametrus.



28 pav. Baigtinių elementų tinklelis, sukurtas rankiniu būdu

Kaip matosi paveikslėlyje, čia tinklelis ne tik labai intensyviai mato paviršius, bet ir įvertina aplinką aplink juos, nors toje vietoje ir dalių nėra – tai gali reikšti, kad tos vietos turi įtakos galutiniams rezultatams.

Paveikslėlyje žemiau parodytas vizualas iš arčiau, kaip tiksliai ir intensyviai tinklelis apima bet kokį paviršių.



29 pav. Baigtinio elemento tinklelio pavaizduoto 28 paveikslėlyje – vaizdas iš arčiau. Mikrogijų susikirtimo vieta ir dviejų nanogijų tinklelio kertami plotai

13 lentelė. Trijų skirtingų sukurtų morfologijų tinklelio generavimo laikas, skaičiavimo elementų ir jų liečiančių paviršių bei iteracijų kiekis

Morfologija (storis)	Mikro-nano (0,45mm)	Mikro-5 nano, (0,276mm)	Mikro-5 nano, (0,138mm)
Tinklelio generavimo laikas, min	32	93	23
Skaičiavimo elementų	3190780	9582252	2572224
Skaičiavimo elementų liečiančių paviršių	1101873	4088763	963988
Iteracijų	294	425	280

3.3. Fluido savybių ir fizikinių aplinkybių apibrėžimas

Naudojamoje programoje sprendžiamas laminarinis srautas. Analizės tipas šiems filtrams nustatytas išorinis – kai srautas teka aplink pateiktą paviršių. Jeigu analizė vykėtų vamzdyje, analizė turėtų būti vidinė. Kaip paleidžiamas srautas pasirenkamas idealus oras.

Gravitacijos sąlyga šiame modelyje taip pat vertinama – 9,81 m/s. Modelyje nustatyta kambario temperatūra 293,2 K. Modeliavimo metu priimtas laiko žingsnis yra 120s. Analizuojamo proceso trukmė 1 val. Iteracijų skaičius vienam laiko žingsniui yra 1.

Priklausomai nuo baigtinio elemento tinklelio tankumo ir struktūros sudėtingumo laiko žingsnis svyruoja tarp 2 minučių, kartais padidėdamas iki keliadešimt minučių. Lentelėje žemiau pateikiami turimi modeliuojamo oro duomenys.

14 lentelė. Modeliuojamo oro duomenys

Parametras	Reikšmė	Vienetai
Tankis, kai 293,2 K	1,204	kg/m ³
Molekulinė masė	101325	Pa
Dinaminis klampumas, kai 300 K	$1,85 \cdot 10^5$	Pa·s
Savitoji šiluminė talpa, kai 290 K	1006,50628	J/(kg·K)
Šilumos laidumo koeficientas, kai 273,15K	0,0243073	W/(m·K)

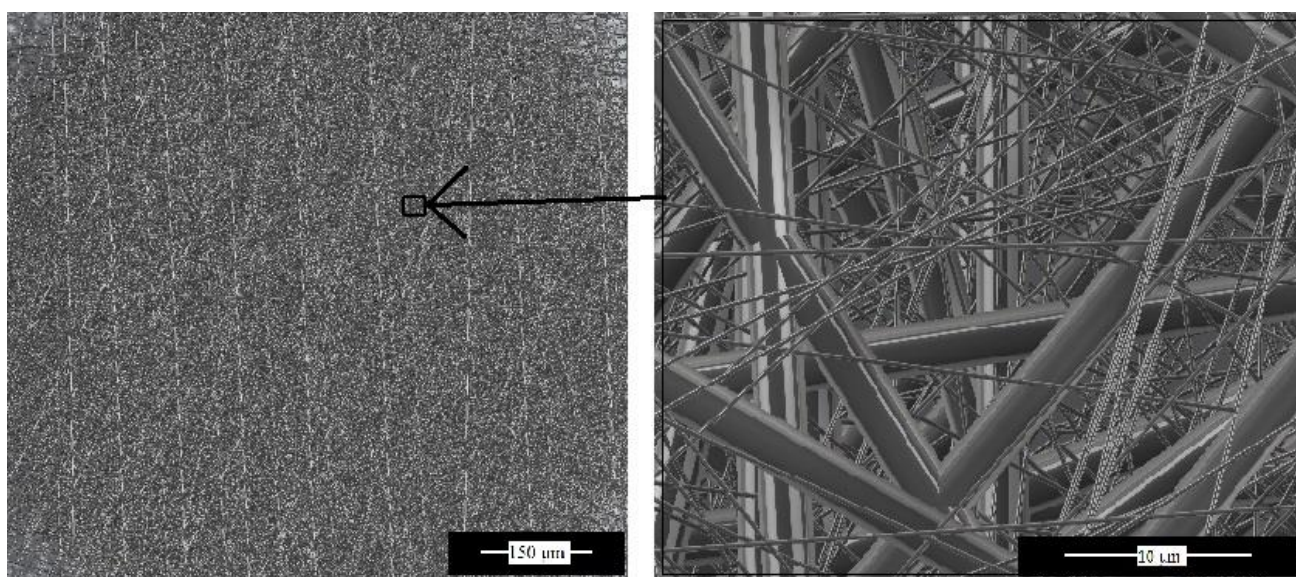
3.4. Srities apibrėžimai ir kraštinės sąlygos

Suprojektavus modelį, parenkamas įvedamo oro srauto paviršinis greitis – 5,3 cm/s, o išeinančio srauto gale nustatytas standartinis atmosferos slėgis 101325 Pa. Parenkami įvedamieji duomenys ir modeliavimo metodika yra atsižvelgiami į pagal literatūros apžvalgoje išanalizuotus mokslinius tyrimus, jų metodikas ir rezultatus [21].

Modelyje turėjo būti pritaikyta absorbcijos sąlyga visiems paviršiams. Pilno slydimo arba neslydimo efekto pritaikyti šiame modelyje nėra galimybės. Kiti pasirinkimai yra adsorbcija arba visiškas atšokimas, kurie šiame modelyje neturėtų reikšmės. Visi kiti duomenys surašyti 15 lentelėje.

Skaičiavimo sritis šiuose modeliuose parenkama kuo įmanoma mažesnė. Nors ir gijos yra tik 1mm ilgio, tačiau su turima kompiuterine įranga apskaičiuoti įtraukiant visą struktūrą buvo per sudėtinga, kartais neįmanoma dėl programos resursų perkrovimo (Priedas 7).

Šiuose modeliuose skaičiavimams atlikti, kai skaičiuojamųjų sričių išmatavimai yra $10 \cdot 10 \cdot 138/276/450 \mu\text{m}$. Vidutiniškai reikėjo nuo 12 iki 50 valandų. Žemiau paveikslėlyje pavaizduota skaičiuojamoji sritis filtro plote ir masteliu iš arčiau.

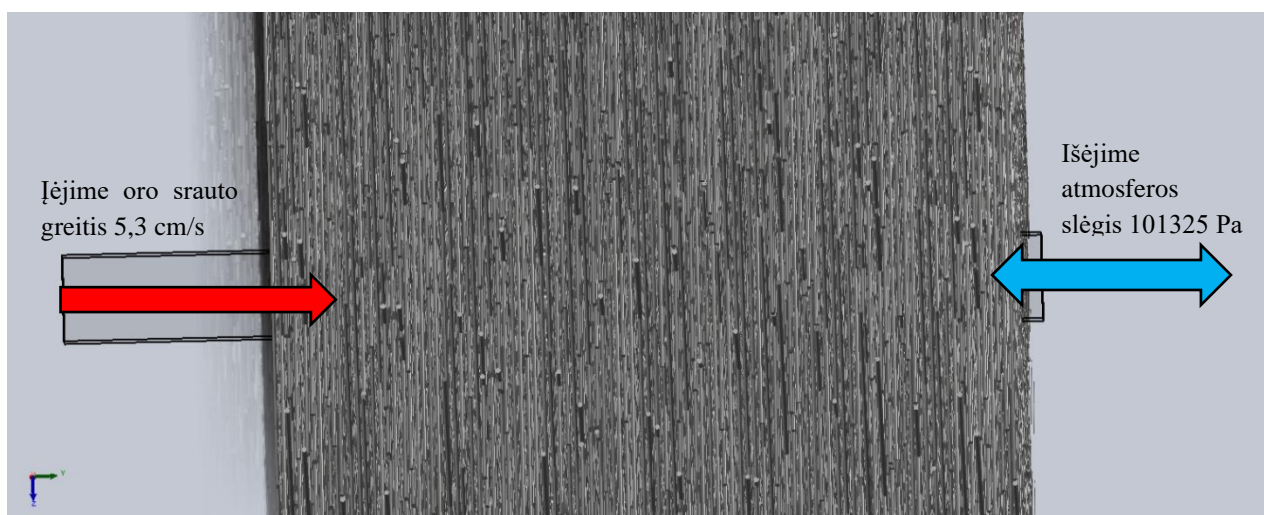


30 pav. Skaičiuojamosios srities dydžio pavaizdavimas filtro plote iš viršaus ir masteliu iš arčiau

15 lentelė. Formuojamo modelio įvedami pagrindiniai parametrai

Įvedami parametrai	Reikšmė	Vienetai
Analizės tipas	Išorinis	
Gravitacija	Taip, 9,81	m/s ²
Temperatūra	293,2	K
Įvedamos dujos	Oras	
Įvedamo srauto tipas	Laminarinis	
Įeinančio srauto greitis	5,3	cm/s
Srauto pabaigoje nustatytas slėgis	101325	Pa
Dalelių judėjimas atsimušus į gijų paviršių	Absorbicija	
Įvedamas srautas	Oras	

Paveikslėlyje žemiau pavaizduotas filtrinės struktūros vaizdas iš šono ir įvedamos modelio ribos.



31 pav. pavaizduotas skaičiuojamosios srities tūris per visą filtro storį. Vaizdas iš šono

3.5. Lygčių skaičiavimai ir kontrolė

Kaip jau minėta anksčiau, skaičiavimo laikas trunka įvairiai, priklausomai nuo modelio struktūros sudėtingumo, dalių kiekio ir dydžio. Tinklelio paruošimas ir skaičiavimai atliekami kaip skirtingi procesai, bet baigtinių elementų tinklelis turi būti paruoštas pirmas – kitaip skaičiavimų pradėti nebus galima pradėti.

Anksčiau paveikslėliuose pavaizduotų morfologijų skaičiavimai prie vieno ir to pačio baigtinių elementų tinklelio parametrų užtruko 1, 2 ir 5 valandas atitinkamai. Kartais skaičiavimų pabaigoje, rezultatų gavimas atsitiktinai nutrūksta dėl kokių nors neatitikimų modelyje arba per didelio krūvio kompiuteryje – dažniausiai, per intensyvaus baigtinių elementų tinklelio arba per tankios ir kompleksinės filtrinės struktūros. Dėl šios priežasties prieš kiekvieno skaičiavimo pradžią naudojama funkcija „patikrinti geometriją“.

Dėl skaičiavimo laiko sumažinimo, pačioje programoje buvo optimizuota ir kiek įmanoma sumažinta vizualizacijos kokybė, išjungtos nenaudojamos ir nereikalingos funkcijos, papildomai apkraunančios

kompiuterio našumą. Taip pat, prieš pradėdant skaičiavimus buvo pasirinkti tik keli parametrai, kurie rezultatuose atrodo svarbiausi ir nustatyti kaip tikslai.

Šiam modeliui buvo išskirti du tikslai, tai vidutinis dinaminis slėgis ir oro srauto greitis modelyje. Šie tikslai leidžia programai papildomai susikoncentruoti į šiuos parametrus ir kiek įmanoma išgauna naudingos informacijos galutiniuose rezultatuose pateikti. Jeigu kokie nors duomenys būtų žinomi iš eksperimentinių analizių, juos taip pat nesudėtingai būtų galima įtraukti kaip pradinius duomenis modelyje.

3.6. Rezultatų pateikimas ir vizualizavimas.

Parinkta pluoštinė medžiaga, filtro struktūra, taip pat parinktas tinkamas baigtinių elementų tinklelis, fluido savybės, fizikinės aplinkybės ir srities apibrėžimai su kraštinėmis sąlygomis ir optimizuota programa, bei antrą kartą patikrinta struktūra su funkcija „patikrinti geometriją“ - galiausiai leidžia sulaukti skaičiavimo rezultatų.

16 lentelė. Sukurtų skirtingų filtrinių struktūrų modeliavimo skaičiavimo laikas ir gauti rezultatai

Morfologija (storis)	Mikro – nano (0,45mm)	Mikro – 5 nano, (0,276mm)	Mikro – 5 nano, (0,138mm)
Skaičiavimo laikas, min	987	733	140
Slėgių nuostoliai, Pa	2,83	1,91	0,38
Minimalus greitis, cm/s	$4,32 \cdot 10^{-5}$	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$9,4 \cdot 10^{-3}$
Maksimalus greitis, cm/s	7,1	5,5	9,8

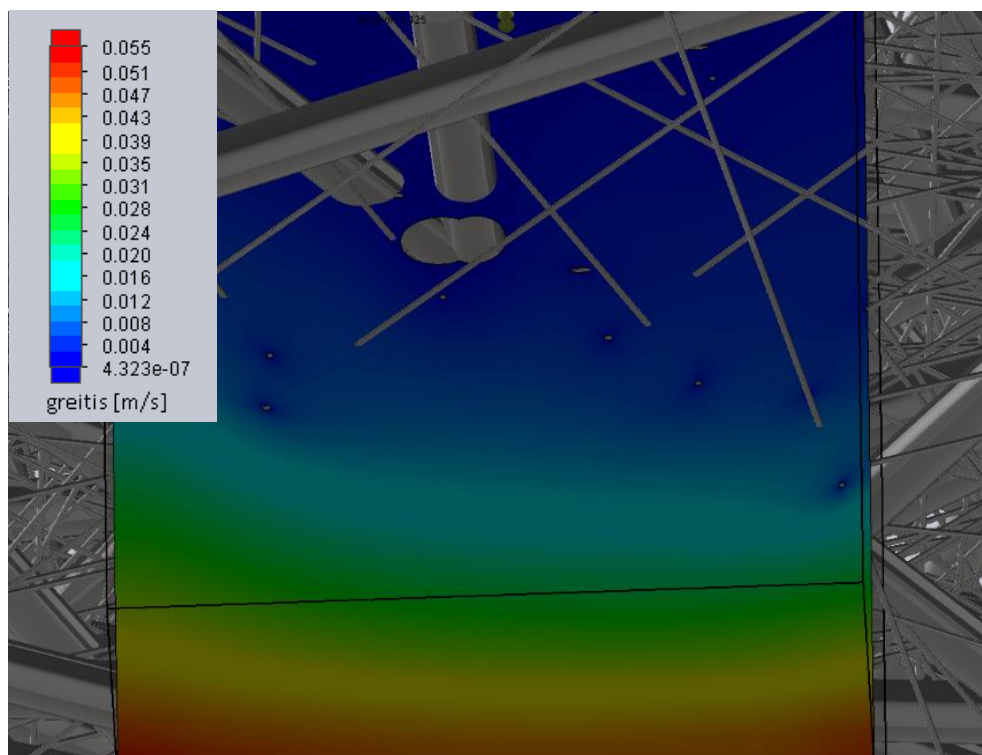
Iš gautų rezultatų matyti, kad slėgio nuostoliai nėra tokie, kokių buvo galima tikėtis. Greitis šiuose modeliuose atitinka oro filtravimo teoriją, kad oro srautui patekus į filtrą – greitis sulėtėja. Esminio skirtumo tarp gautų struktūrų rezultatų nėra. Dėl to, kaip jau buvo minėta metodinėje dalyje, modeliavimo rezultatus galima pateikti vizualu, kad būtų lengviau išžvelgti vykstančius procesus ir gautų rezultatų prasmę.

Kadangi šiame tyrime visų trijų morfologijų slėgio nuostoliai labai panašūs, toliau bus vertinama tik viena struktūra, kuri nereikalautų per daug kompiuterinės įrangos ir programos resursų, bei būtų labiausiai panaši į tikrą suformuotą kompozitinį mikro nano pluoštą – „mikro – 5 nano, 0,276 mm“ – tam, kad suprasti kodėl tokie rezultatai gavosi.

Kaip jau minėta ir metodikoje, struktūros suformuojamos 3D formatu, rezultatai bus vaizduojami vektoriniu, kontūriniu ir animaciniu metodu. Visus kontūrus galima pavaizduoti trijose plokštumose – iš viršaus, iš priekio ir iš šono. Vaizdai bus pateikiami iš to šono, iš kurio galima lengviau suprasti procesus ir rezultatų prasmę.

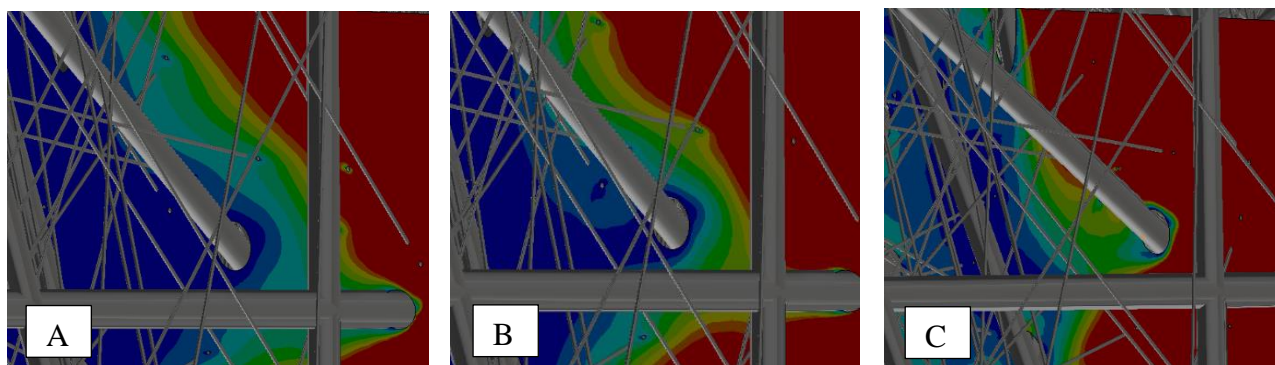
3.6.1. Greičio rezultatai kontūriniuose skaičiuojamuosiuose skerspjūviuose

Pirmiausia pateikiamas greičio kontūras, kad suprasti, kaip pasiskirsto greitis sukurtoje struktūroje. Iš pateikto kontūro galima pastebėti, kad oro srautas beveik visiškai praranda savo greitį jau pačioje pradžioje. Nežymiai, bet galima pastebėti ir minimalius greičio pakitimus apie nanogijas prie 5,3 cm/s oro srauto greičio, kurios bus apžvelgtos vėliau iš arčiau.



32 pav. Greičio skerspjūvinis kontūras oro srauto įėjimo į filtrą pradžioje

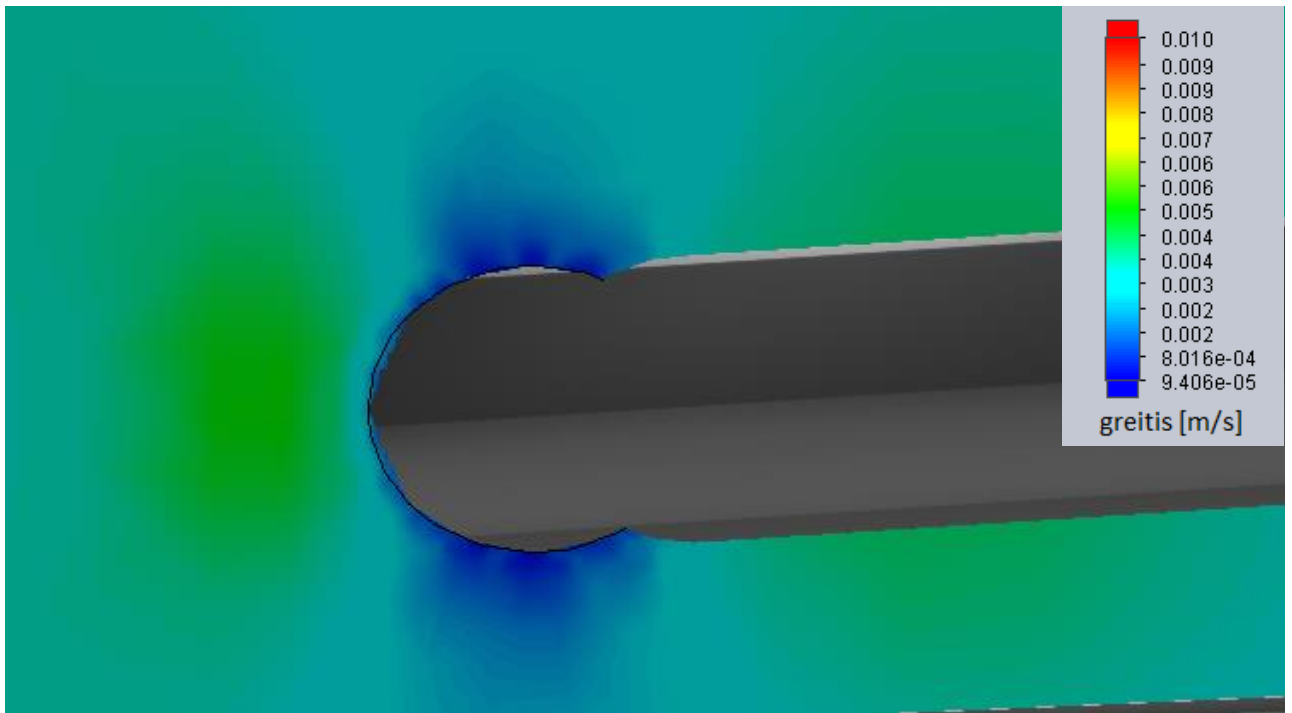
Tam, kad būtų galima lengviau įvertinti greičio pokyčius filtro pradžioje, greičio skalėje aukščiausia riba buvo sumažinta iki 1 cm/s, 0,5 cm/s ir 0,1 cm/s. Žemiau paveikslėliuose pateiktas sumažintos greičio skalės skerspjūvinių kontūrų palyginimas mikrogijoms įvertinti.



33 pav. greičio skerspjūvinių kontūrų palyginimas, kai srautas teka iš dešinės į kairę oro srauto įėjimo į filtrą pradžioje: A – greičio skalėje aukščiausia riba 1 cm/s, B – greičio skalėje aukščiausia riba 0,5cm/s, C – greičio skalėje aukščiausia riba 0,1 cm/s. Kontūruose raudona spalva yra didžiausias greitis pagal nustatytą skalę, mėlyna žemiausias.

Iš pateiktų kontūrų palyginimų galima pastebėti, kaip dėl didelio mikrogijų diametro susidaro didelis ir platus oro srauto greičio sulėtėjimas prieš mikrogiją. Taip pat A paveikslėlyje matosi, kaip srautas po pirmo mikrogijos pluošto srauto aptekėjimo 1 cm/s greičiu plačiai pasiskirsto per tekėjimo plotą. Tuo tarpu paveikslėlyje B ir C matoma, kaip už sekančios mikrogijos susidaro didelė srauto greičio duobė, kurioje prarandama didelė dalis srauto greičio dėl didelio oro srauto pasipriešinimo.

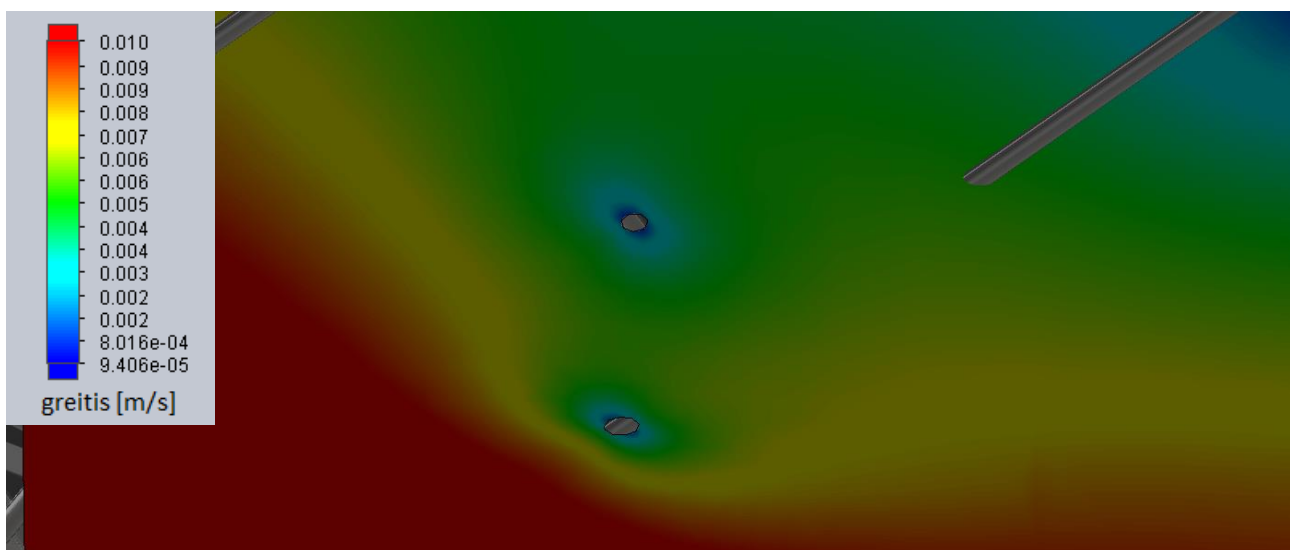
Sekančiame paveikslėlyje galima pamatyti greičio pokyčius aplink mikrogiją filtro viduriniame sluoksnyje, kai greičio skalėje aukščiausią ribą sumažinus iki 1 cm/s.



34 pav. Greičio pasiskirstymas skerspjūviniame kontūre prie mikrogijos, esančios filtro viduriniame sluoksnyje. Greičio skalėje aukščiausia riba 1 cm/s

Iš kontūrų galime matyti, kad greitis viduriniuose sluoksniuose yra labai mažas, apie 3-4 mm/s, bet net ir prie tokio greičio susidaro oro pasipriešinimas ir matosi, kaip prieš ir už gijos susidaro dideli greičio sumažėjimai, o šonuose dėl susidariusio pasipriešinimo minimalūs pagreitėjimai iki 5-6 mm/s.

Paveikslėlyje žemiau pateikiamas kontūras nanogijų, dar filtro pradžioje. Kad geriau matytųsi greičio pokyčiai greičio skalėje aukščiausia riba buvo sumažinta taip pat iki 1 cm/s. Kaip matyti paveikslėlyje, didelių plotų greičio sumažėjimo tokio, kaip prie mikrogijų nematyti. Tai gali tik įrodyti, kad čia veikia slydimo efektas, kai dėl mažo nanogijų diametro, nesusidaro dideli oro pasipriešinimai.



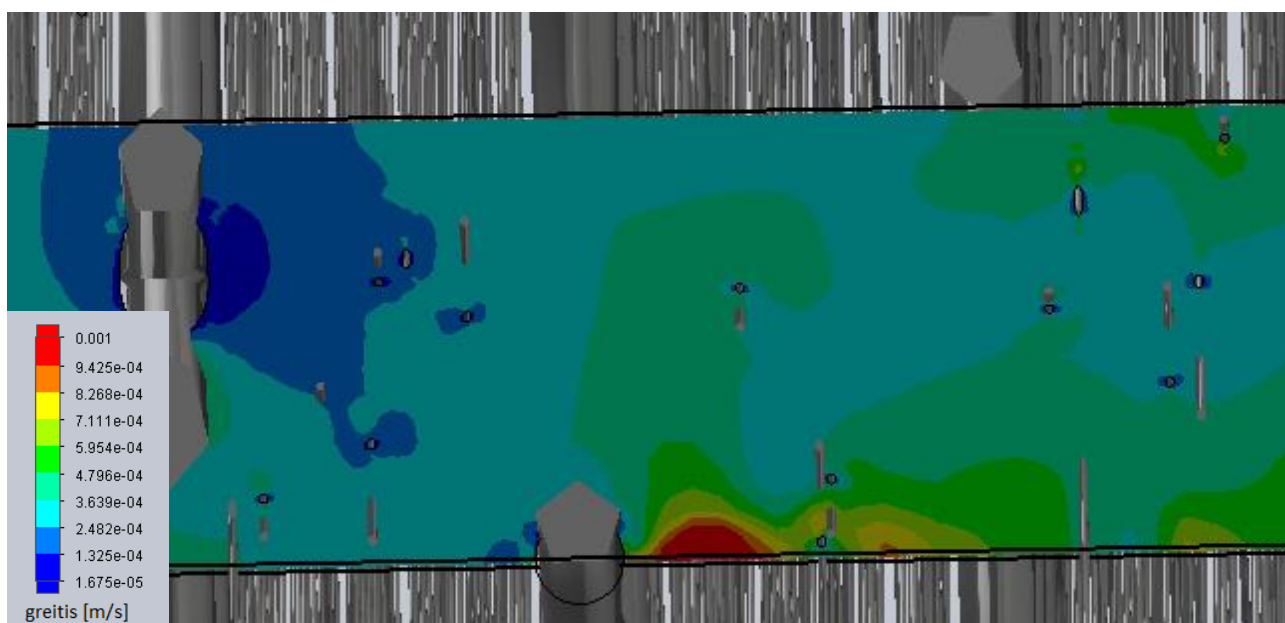
35 pav. Greičio pasiskirstymas skerspjūviniame kontūre prie nanogijų oro srauto įėjime į filtrą pradžioje, kai greičio skalėje aukščiausia riba 1 cm/s

Viduriniuose sluoksniuose nanogijų aptekėjimo greičio pakitimai nėra tokie akivaizdūs, kaip kad mikrogijų. Iš 35 paveikslėlio matyti, kad nėra didelių oro srauto pasipriešinimų ar didelių plotų kur greitis akivaizdžiai kistų. Taip pat galima įžvelgti, kaip aukščiau kertančią nanogijos plotą, kuris panašesnis į rombą, o ne į apskritimą, oro srauto greičio kontūro pasiskirstymas yra taip pat ne apskritimo ar ovalo, bet labiau kvadratinis pasiskirstymas.



36 pav. Greičio pasiskirstymas skerspjūviniame kontūre, aptenkant nano gijas esančias filtro viduriniame sluoksnyje, kai aukščiausia riba greičio skalėje 1 cm/s

Geriausiai įvertinti oro srauto greičio kitimą per visą struktūrą pavyko tik tada, kai greičio skalėje aukščiausia riba buvo sumažinta iki 0,1 cm/s. Šiame kontūre puikiai matosi, kaip susidaro greičio pagreitėjimai vietose, kur yra plyšys tarp mikrogijų arba šonuose mikrogijų, o sulėtėjimai srautui tekant į mikrogijas ir už jų. Tą patį galima pastebėti ir literatūros apžvalgoje minėtame Ten kur matomos nanogijos, matomi minimalūs srauto greičio sulėtėjimai.

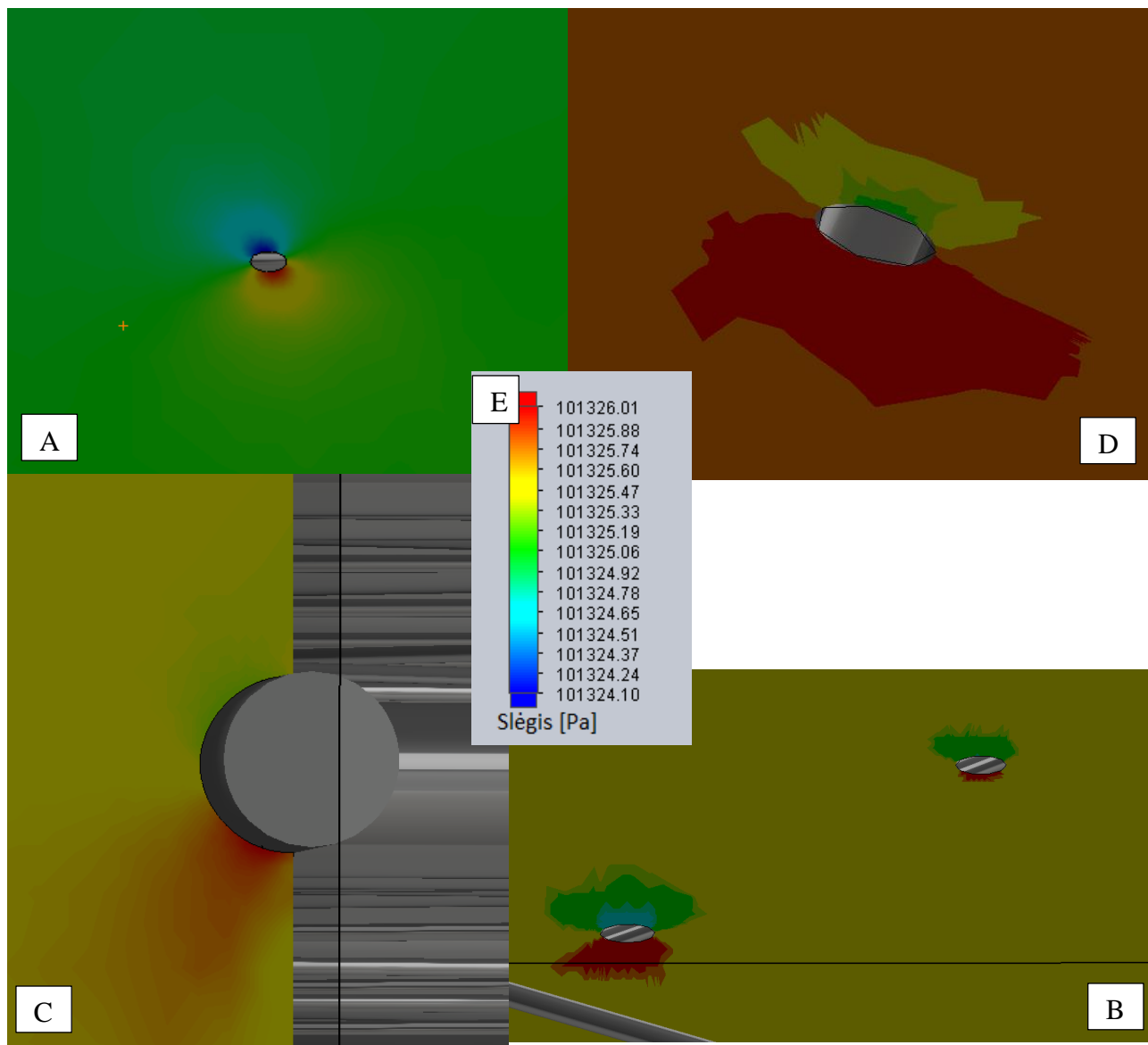


37 pav. Greičio skerspjūvinis kontūras per visą filtrą, kai greičio skalėje aukščiausia riba 0,1 cm/s. Vaizdas iš šono

3.6.2. Slėgio rezultatai skaičiuojamosiuose kontūriniuose skerspjūviuose

Apžvelgus greičio kontūrus buvo paruošti slėgio kitimo kontūrai, kad suprasti, kaip pasiskirsto slėgis sukurtoje struktūroje slėgio atžvilgiu. Iš gautų rezultatų žinoma, kad modelyje yra tik kelių paskalių slėgio nuostoliai. Dėl to slėgio skalės ribos buvo bandomos sumažinti dar labiau, kad išgauti kuo daugiau informacijos, kad ir iš mažo slėgio.

Tačiau joks skalės ribų keitimas nepadėjo, skalė liko tokia pati, kaip ir buvo gavus rezultatus (žr. 37 pav. E). Taigi paveikslėliuose žemiau iš arčiau apžvelgtas slėgio pasiskirstymas aplink mikrogijas ir nanogijas.



38 pav. A, B ir D paveikslėliuose pavaizduotas slėgio susidarymas prie nanogijų. Paveikslėlyje C pavaizduota mikrogija ir slėgio susidarymai aplink ją. Paveikslėlis E rodo slėgio skalę paskaliais.

Iš literatūros apžvalgos, žinoma, kad kai srautas yra laminarinis, mikropluoštai, palyginti su nanopluoštais, sukelia didesnę slėgį. Taip yra todėl, nes mikrogijos paprastai yra didesnio skersmens, palyginti su nanogijomis, todėl oro srautui patyrus didesnę pasipriešinimą – didėja ir slėgis.

Tuo tarpu, nanogijos yra daug mažesnio skersmens ir turi didesnę paviršiaus plotą ir tūrio santykį. Tai leidžia efektyviau filtruoti daleles, o oro srautas patirti mažesnę pasipriešinimą. Todėl laminarinio srauto sąlygomis nanogijos paprastai pasižymi mažesniais slėgio nuostoliais. Taip pat galima nesunkiai pastebėti, kokį didelį poveikį turi ir gijos diametras. Akivaizdžiai matosi, kad mikrogijos sudaro didesnę pasipriešinimą oro srautui prasiskverbti, kai tuo tarpu nanogijos tik mažą plotelį.

Be to iš pateiktų slėgio kitimo kontūrų galima pastebėti ir pačios struktūros poveikį oro srauto pasipriešinimui. Kadangi gijų forma pati forma yra apvali, prieš gijas ir už jų susidaro kaip šešėliai apvalūs slėgio pakitimai.

3.6.3. Srauto trajektorija

Iš literatūros apžvalgos žinoma, kad panašaus tipo filtrinėse struktūrose, kai oro srauto greitis nustatytas 5,3 cm/s – tekėjimas laminarinis. Todėl programoje prieš įvedant modelio parametrus, buvo parinktas laminarinis tekėjimas, jog būtų galima gauti kuo tikslesnius rezultatus. Laminariniai srautai susidaro esant mažiems Reynoldso skaičiams, t.y. <2000, kuriuos lemia srauto tankis, greitis ir ilgio (arba vamzdžio diametro) santykis su kinematinė klampa.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu}, \quad (3.6.3.1)$$

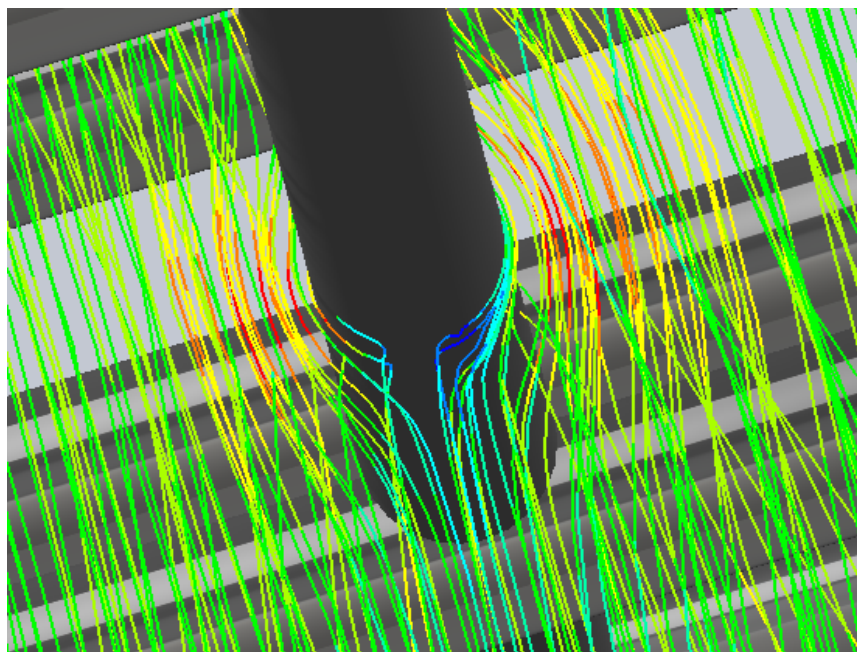
čia ρ – fluideo tankis, kg/m³;

V – srauto greitis, m/s;

L – srauto ilgis (arba vamzdžio diametro), m;

μ – skysčio dinaminis klampumas, Pa·s;

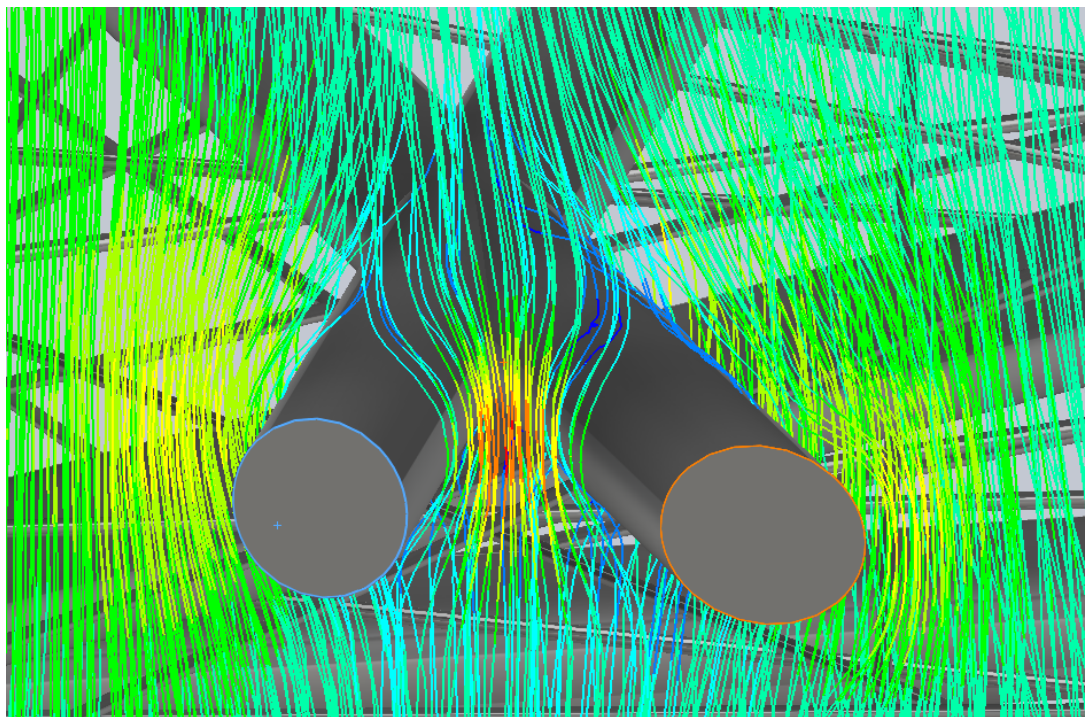
Taip pat iš literatūros apžvalgos žinoma, kad oro srautui, aptekant nanogijų pluoštus veikia visiško slydimo sąlyga. Tuo tarpu aptekant mikrogijų pluoštus, srautas turėtų aptekėti pagal įprastas aerodinamines savybes ir neturėti slydimo efekto. Žemiau paveikslėlyje pavaizduota mikrogija ir oro srauto aptekėjimas aplink ją.



39 pav. Oro srauto skverbimasis pro mikrogiją

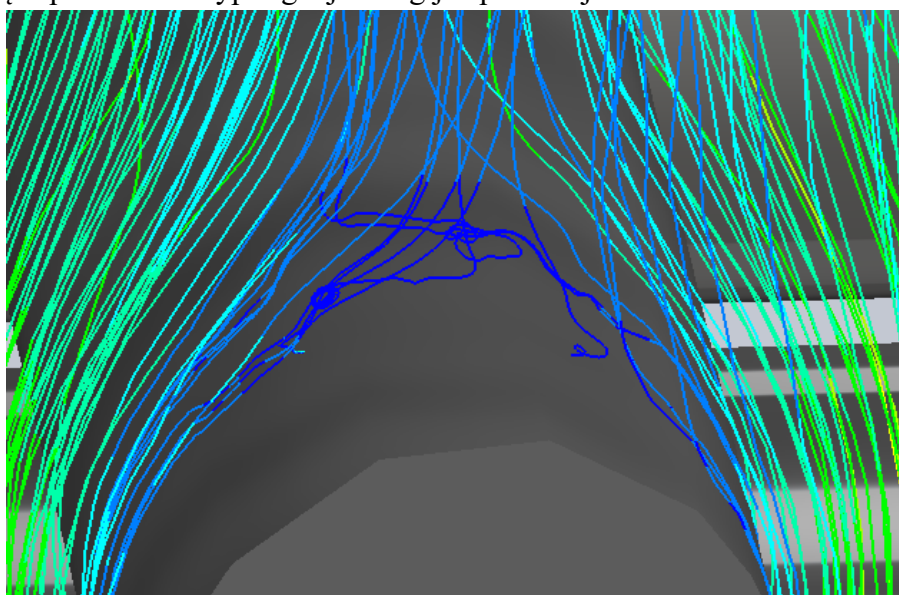
Kaip matosi iš paveikslėlio, galima pastebėti, kad srautas ne visada apteka giją, kartais jis atsimuša į pačią giją ir praranda didelę dalį savo greičio. Dėl to, būtų galima teigti, kad šiame modelyje veikia inercinis dalelių nusodinimas. Taip pat paveikslėlyje gerai matosi, kaip srautui aptekant giją jo greitis laikinai padidėja.

Paveikslėlyje žemiau matosi dviejų susikirtusių mikrogijų oro srauto aptekėjimas.



40 pav. Oro srauto skverbimasis pro susikirtusias mikrogijas

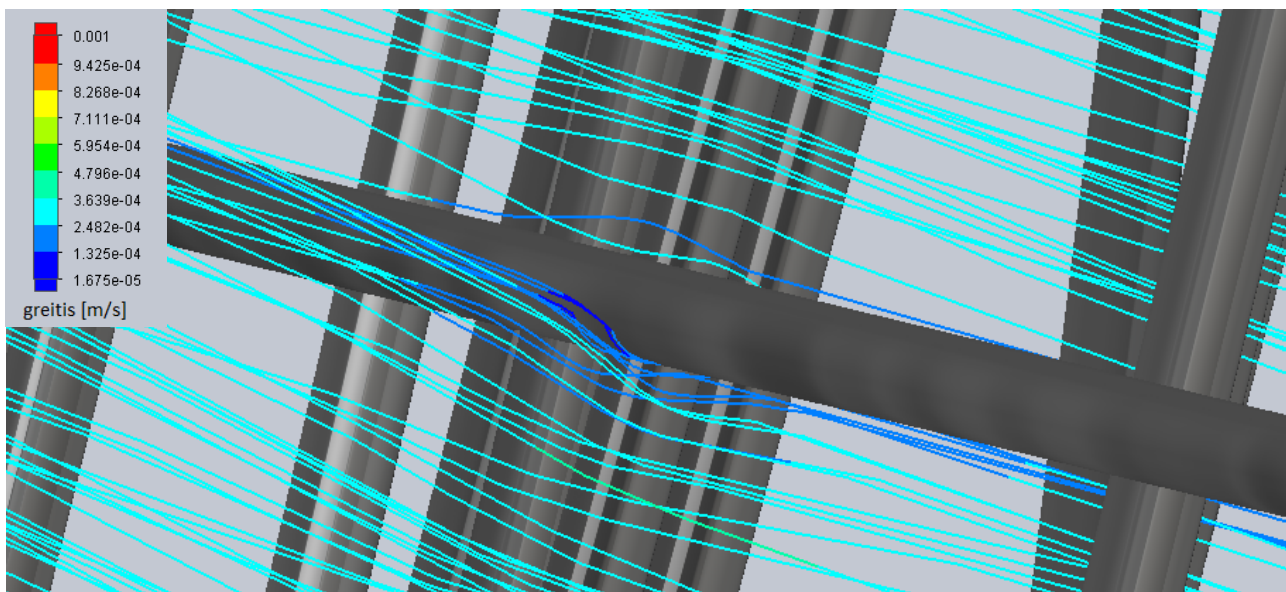
Paveikslėlyje žemiau, pavaizduota mikrogija ir už jos susidariusios oro srauto „duobėje“ judėjimas. Matosi, kaip srauto linijos ne tik apteka giją ir teka toliau, bet kai kurios visiškai praranda savo judėjimo kryptį ir pradeda nekryptingai judėti gijos paviršiuje.



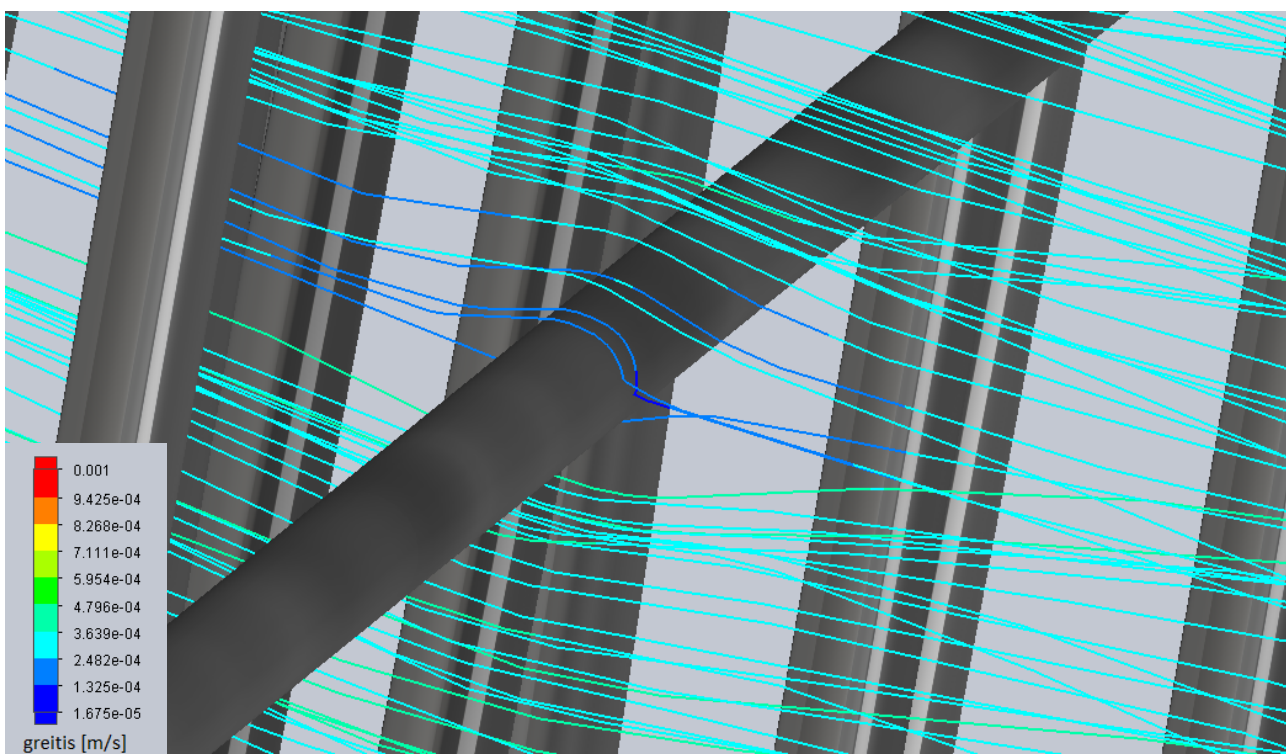
41 pav. Labai įdomus srauto tekėjimo linijų atvaizdavimas ant mikrogijos paviršiaus, kai oro srautas už pačios gijos sudaro greičio „duobę“

Būtų įdomu įvertinti dalelių sulaikymo būdus, kuriuos „SolidWorks“ funkcija „FlowSimulation“ turi – inercija, gravitacinis nusodinimas, įsiterpimas ir Brauno difuzija. Šis srauto judėjimas, primena Brauno difuziją, tačiau tą patvirtinti reiktų naudoti šios programos pilną versiją, nes edukacinėje versijoje šios galimybės nėra.

Žemiau paveikslėliuose pavaizduotas nanogijos aptekėjimas. Čia akivaizdus skirtumas su mikrogijomis. Labai nesunkiai galime pastebėti vien tik susidariusio lanko aplink giją mažumą. Tai tik įrodo teoriją, kad gijų diametras turi įtakos oro srauto skverbimuisi pro pluoštinį filtrą. Taip pat matyti, kad greitis aplink giją praktiškai nekinta.



42 pav. Srauto skverbimasis pro nanogiją



43 pav. Srauto skverbimasis pro nanogiją

Išvados

1. Apžvelgus literatūros šaltinius, mokslinius tyrimus ir juos išanalizavus, buvo įvertinta skirtingų morfologijų mikropluoštų ir nanopluoštų kompozitų įtaka oro srauto skverbimuisi per pluoštines medžiagas ir modeliavimo metodai. Atitinkamai parinkta filtravimui medžiaga polipropilenas, kuris buvo sėkmingai pritaikytas skaitmeniniame skysčių dinamikos analizės modeliavime baigtinio tūrio metodu.
2. Šiame tyrime buvo sukurtos trys trimatės netvarkingai išsidėsčiusių $3\mu\text{m}$ ir 300nm gijų kompozitinių pluoštų filtrai, kurių morfologijos siekia aproksimuoti realaus kompozitinio filtro struktūrą. Modeliuojamų konstrukčių parametrai – $0,45\text{ mm}$, $0,28\text{ mm}$ ir $0,14\text{ mm}$ storio; pakuojantysis tankis $7,48\%$, $3,416\%$ ir $3,416\%$; paviršiaus plotas $32,46\text{ mm}^2$, $12,65\text{ mm}^2$ ir $6,33\text{ mm}^2$; masė $2,054 \cdot 10^{-2}\text{ mg}$, $5,744 \cdot 10^{-3}\text{ mg}$ ir $2,872 \cdot 10^{-3}\text{ mg}$. Oro srauto prasiskverbimui per pluoštines medžiagas modeliuoti buvo parinktos tokios modelio ribos: $5,3\text{ cm/s}$ oro srautas įėjime, o išėjime standartinis atmosferos slėgis 101325 Pa . Visiems filtro pluoštams pritaikyta absorbcijos sąlyga. Taip pat parinktas tankus baigtinių elementų tinklelis.
3. Po skaičiavimų gauti rezultatai parodė tik $0,38\text{ Pa}$, $1,91\text{ Pa}$ ir $2,83\text{ Pa}$ slėgio nuostolius visose struktūrose ir didelį oro srauto greičio praradimą jau filtro pradžioje nuo $5,3\text{ cm/s}$ iki 1 cm/s , o pluoštinės medžiagos viduje greitis tesiekė $2\text{--}4\text{ mm/s}$. Daugiapakopio modeliavimo etapų metu nustatyta, kad adekvačiam medžiagos modeliavimui pagrindinė kliūtis yra skaičiavimo mašinos pajėgumų trūkumas, kuris neleidžia pasiekti tinkamo tankumo modeliavimo tinklo, siekiant atspindėti visus procesus, vykstančius nano–mikro kompozitinėje medžiagoje, ir šią medžiagą naudoti kaip inžinerinį oro filtravimo etapą. Dėl šios priežasties, buvo tiriamas oro srauto judėjimas mikro aplinkoje pluoštinės medžiagos viduje.
4. Mikro ir nanopluoštų gijos sudaro skirtingą poveikį oro srauto judėjimui. Modeliavimo metu nustatyta, jog mikrogijas srautas apteka labai plačiai, susidaro didesnis oro srauto pasipriešinimas bei pakinta greitis (oro srauto įėjime į filtrą pradžioje nuo $5,3\text{ cm/s}$ iki 1 cm/s , o pluoštinės medžiagos viduje greitis sumažėja nuo $4\text{--}5$ iki 2 mm/s). Tuo tarpu atskiros nanogijos pasipriešinimo beveik nesudaro, kas paaiškinama oro srauto praslydimu režimu, esant objektui, artėjančiam dydžiu prie atomų laisvojo kelio. Tai įrodo, kad gijų diametras turi didelę įtaką galutiniams rezultatams pasiekti.

Rekomendacijos

1. Tokio tipo modeliavimas, ypač kai norima atkartoti panašias struktūras kaip šiame darbe, reikalauja didelių kompiuterio našumo parametrų. Šiame darbe dėl nenumatyto modelio sudėtingumo buvo naudojami keturi skirtingų parametrų kompiuteriai. Nors darbo eigoje kompiuterių galingumai buvo didinami – jų neužteko, kad struktūros būtų dar labiau sutankinamos ar atliekami modeliavimai vamzdžio tipo analizėje. Todėl rekomenduotina kiek įmanoma daugiau įsivertinti kompiuterio parametrus iš anksto, atsižvelgiant į tai kiek darbe apytiksliai numatyta nubraižyti ir kokio dydžio dalių, kokius skaičiavimus ir kaip tiksliai reikės atlikti.
2. Labai naudinga optimizuoti pačios modeliavimo programos darbą. Galima sumažinti nereikalingų funkcijų veikimą, sumažinant struktūrų vaizdavimo ryškumą, formų tikslumą, pavyzdžiui šiame darbe gijos iš idealiai apvalių, dėl programos našumo optimizavimo buvo vaizduojamos daugiakampėmis figūromis. Briaunos ir susikirtimai nebuvo vizualiai tvarkingi, taip pat naudojamos blankios spalvos ir daug kitų nenaudojamų bendrinio tipo funkcijų buvo išjungtos.
3. Struktūros formavimas, klaidų sprendimas ir slėgio paieškos užtruko didžiausią laiko dalį. Dėl to ypatingai didelį dėmesį reikia skirti kiekvienam žingsniui nuo eskizo braižymo iki dalies sukūrimo. Net pats eskizo piešimas gali turėti didelės įtakos sklandžiam darbui kituose etapuose. Labai rekomenduotina iš karto nepradėti skaičiavimų prie tankių struktūrų. Daug paprasčiau būtų išanalizuoti visus parametrus prie vieno ar kelių pluoštų sluoksnių ar apskritai kelių gijų – tam, kad būtų galima greičiau įsivertinti baigtinių elementų tinklo tankumą, jų tikslumo poveikį rezultatams, įvertinti gautus rezultatus, stebėti srauto judėjimus jau pačioje pradžioje ir tik tuomet didinti tų sluoksnių skaičių.
4. Dėl programos edukacinės versijos, šiame modelyje nepavyko pavaizduoti dalelių filtravimo mechanizmų, kuriuos iš savęs pats „SolidWorks“ turi. Manau būtų labai tikslinga, išbandyti pilniausioje versijoje bet kokią mikro/nano kompozitinę struktūrą skirtą oro filtravimui ir taip papildomai išanalizuoti dalelių sulaikymą tokio tipo filtrinėse medžiagose, bei dar labiau sutankinus baigtinių elementų tinklą gauti dar tikslesnius rezultatus.

Literatūros sąrašas

1. EDANA ataskaita (2019). *Nonwoven production in Greater Europe*. [Žiūrėta 21/6/21]. Prieiga per internetą: <https://www.edana.org/nw-related-industry/nonwovens-markets>;
2. D. Thomas, S. Pacault, A. Charvet, N. Bardin-Monnier, J.-C. Appert-Collin (2019). *Composite fibrous filters for nano-aerosol filtration: Pressure drop and efficiency model*. Separation and Purification Technology. [Žiūrėta 20/6/21]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586618342643?via%3Dihub>;
3. Raghvendra K.M., Sravanthi L. (2017). *Fabrication techniques of micro/nano fibres based nonwoven composites: a review*. Modern Chemistry and Applications, [Žiūrėta 24/6/21]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/profile/Raghvendra-Mishra/publication/315889697_Fabrication_Techniques_of_MicroNano_Fibres_based_Nonwoven_Composites_A_Review/links/58ec656c0f7e9b6b274baece/Fabrication-Techniques-of-Micro-Nano-Fibres-based-Nonwoven-Composites-A-Review.pdf;
4. Mohammad Mafizur Rahman, Khosrul Alam, Eswaran Velayutham (2021). *Is industrial pollution detrimental to public health? Evidence from the world's most industrialised countries*. BMC Public Health, [Žiūrėta 25/6/21]. Prieiga per internetą: <https://bmcpublichealth.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12889-021-11217-6>;
5. Seojin Jung, Jooyoun Kim (2020). *Advanced design of fiber-based particulate filters: materials, morphology and construction of fibrous assembly*. Polymers, Volume 12, Issue 8, [Žiūrėta 24/6/21]. Source: <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/8/1714/htm>;
6. Jung S., Kim J. (2020). *Advanced Design of Fiber-Based Particulate Filters: Materials, Morphology, and Construction of Fibrous Assembly*;
7. Consultancy.eu. *Raw Material Prices and Supply Shortages Skyrocket*. [Žiūrėta 20/11/2021]. Prieiga per internetą: <https://www.consultancy.eu/news/7143/raw-material-prices-and-supply-shortages-skyrocket-in-7-charts>;
8. Lietuvos Radijo Televizija. *Indijos ir Kinijos sostinės paniro į toksišką smogą*. [Žiūrėta 3/10/2021]. Prieiga per internetą: <https://www.lrt.lt/naujienos/pasaulyje/6/1534996/indijos-ir-kinijos-sostines-paniro-i-toksiska-smoga-kalte-verciama-sventems-ir-kasybai>;
9. Lee C.H, Khalina A., Lee S.H. (2021). *Importance of Interfacial Adhesion Condition on Characterization of Plant-Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review*;
10. Iman Azarian Borojeni, Grzegorz Gajewski and Reza A. Riahi (2022). *Application of Electrospun Nonwoven Fibers in Air Filters*. [Žiūrėta 25/5/22]. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2079-6439/10/2/15/htm>;
11. Monirul Islam, H.H. Masjuki, M. A. Kalam, Nurin Wahidah Mohd Zulkifli (2017). Influence of polymethyl acrylate additive on the formation of particulate matter and NOX emission of a biodiesel-diesel-fueled engine. [Žiūrėta 24/5/2022]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/317873209_Influence_of_polymethyl_acrylate_additive_on_the_formation_of_particulate_matter_and_NOX_emission_of_a_biodiesel-diesel-fueled_engine;
12. Sam Kubba PH.D., LEED AP (2017). *Indoor Environmental Quality*. [Žiūrėta 15/5/2022]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128104330000071>;
13. Yuchen Yang, Yajie Zhao, Zhenzhen Quan, Hongnan Zhang, Xiaohong Qin, Rongwu Wang, Jianyong Yu (2020). *An efficient hybrid strategy for composite yarns of micro-/nano-fibers*.

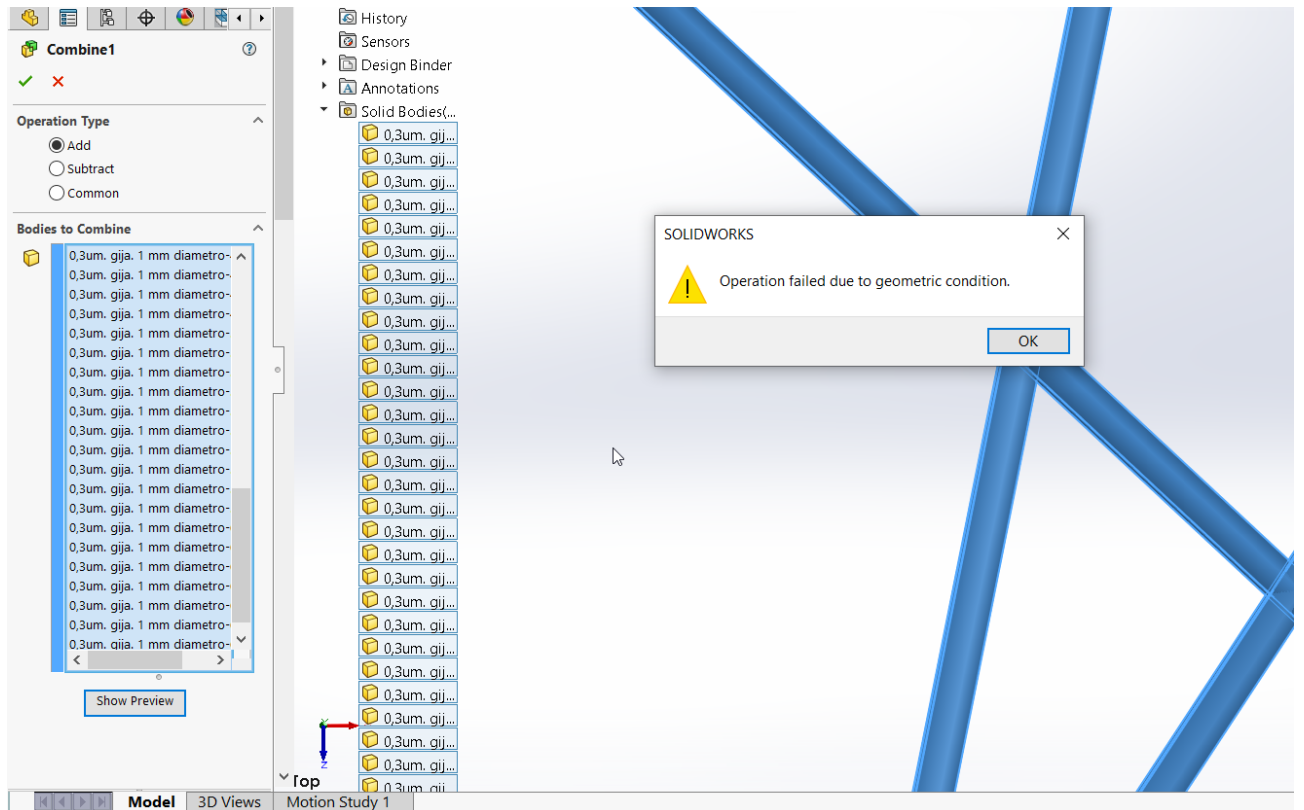
- Materials and Design, Volume 184, 108196, [Žiūrėta 24/6/21] Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519306343>;
14. Market Resreach Report (2020). [Žiūrėta 23/2/2022]. Prieiga per internetą: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/non-woven-fabrics-market-101727296.html>;
 15. Ian Parry, Victor Mylonas, Nate Vernon (2017). *Reforming Energy Policy in India*. [Žiūrėta 25/6/21]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/317337681_Reforming_Energy_Policy_in_India_Assessing_the_Options;
 16. Paolo Tronville, Italija; L.L.X. Augusto, A.C.C. Bortolassi, G.C. Lopes, J.A.S. Goncalves, Brazilija; R.D. Rivers JAV (2015). *CFD Simulation of Nanofiber-enhanced air filter media*. In FILTECH 2015 – G6 – Modelling and Simulation. [Žiūrėta 20/6/21]. Prieiga per internetą: <https://iris.polito.it/handle/11583/2607558>;
 17. Zhonglin Xu (2013). Characteristics of Air Filters. [Žiūrėta 23/02/2022] Prieiga per internetą: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-39374-7_4;
 18. Dahua Shou, Jintu Fan, Lin Ye, Heng Zhang, Xiaoming Qian, Zhong Zhang (2015). *Inverse Problem of Air Filtration of Nanoparticles: Optimal Quality Factors of Fibrous Filters*. [Žiūrėta 7/5/2022]. Prieiga per internetą: <https://www.hindawi.com/journals/jnm/2015/168392/>;
 19. Rong-Rong Cai, Shu-Zheng Li, Li-Zhi Zhang, Yang Lei (2020). *Fabrication and performance of a stable micro/nano composite electret filter for effective PM 2.5 capture*. Science of The Total Environment, [Žiūrėta 24/6/21]. Source: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720318106?via%3Dihub>;
 20. Ana Claudia Canalli Bortolassi, Vadila Giovana Guerra, Monica Lopes Aguiar, Laurence Soussan, David Cornu, Philippe Miele, Mikhael Bechelany (2019). *Composites Based on Nanoparticle and Pan Electrospun Nanofiber Membranes for Air Filtration and Bacterial Removal*. [Žiūrėta 24/6/21]. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2079-4991/9/12/1740>;
 21. S.A. Hosseini, H. Vahedi Tafreshi (2010). *3-D simulation of particle filtration in electrospun nanofibrous filters*. Powder Technology, Volume 201, [Žiūrėta 15/5/23]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591010001488>;
 22. P.-C. Gervais, S. Bourrous, F. Dany, L. Bouilloux, L. Ricciardi (2015). *Simulations of filter media performances from microtomography-based computational domain. Experimental and analytical comparison*. Computers and Fluids, [Žiūrėta 05/5/23]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045793015001346>;
 23. Darrell H. Reneker, Alexander L. Yarin (2008). *Electrospinning jets and polymer nanofibers*. Fiber 49(10):2387-2425, [Žiūrėta 24/6/21]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/244306196_Electrospinning_Jets_and_Polymer_Nanofibers;
 24. Lucija Boskovic, Igor E. Agranovski, Igor S. Atzman, Roger D. Braddock (2018). *Filter efficiency as a function of nanoparticle velocity and shape*. Journal of Aerosol Science, [Žiūrėta 24/6/22]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/29469439_Filter_Efficiency_as_a_Function_of_Nanoparticle_Velocity_and_Shape;
 25. Ye Bian, Shijie Wang, Li Zhang, Chun Chen (2020). *Influence of fiber diameter, filter thickness, and packing density on PM_{2.5} removal efficiency of electrospun nanofiber air filters for indoor applications*. Building and Environment, Volume 170, [Žiūrėta 24/6/21]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132319308418>;

26. Aurelia Cristina Nechifor, Simona Cotorcea, Constantin Bungau, Paul Constantin Albu, Dumitru Pascu, Ovidiu Oprea, Alexandra Raluca Grosu, Andreia Pirtac, Gheorghe Nechifor (2021). *Removing of the sulfur compounds by impregnated polypropylene fibers with silver nanoparticles-cellulose derivatives for air odor correction*, Membranes, [Žiūrėta 24/6/21]. Source: <https://www.mdpi.com/2077-0375/11/4/256/htm>;
27. Tadas Prasauskas (2014). *Air contamination by particulate matter from processes of building refurbishment and operation*. Daktaro disertacija. [Žiūrėta 25/6/21]. Prieiga per internetą: <https://epubl.ktu.edu/object/elaba:2192832/index.html>;
28. Gillespie, C. (2019). *Examples of Secondary Pollutants*, [Žiūrėta 25/6/21]. Prieiga per internetą: <https://sciencing.com/examples-secondary-pollutants-5314906.html>;
29. J. Environ (2012). *Environmental pollution: health effects and operational implications for pollutants removal*. Public Health, [Žiūrėta 25/6/21]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1155/2012/341637>;
30. Christian Muhlfeld, Barbara Rother-Rutishauser, Fabian Blank, Dimitri Vanhecke, Matthias Ochs and Peter Gehr (2008). *Interactions of nanoparticles with pulmonary structures and cellular responses*. AJP Lung Cellular and Molecular Physiology, [Žiūrėta 25/6/21]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/5587824_Interactions_of_nanoparticles_with_pulmonary_structures_and_cellular_responses;
31. Hinds WC. (1999), *Aerosol Technology* (2-asis leidimas);
32. Hyun-Jin Choi, Mikio Kumita, Sho Hayashi, Hisashi Yuasa, Mie Kamiyama, Takafumi Seto, Chuen-Jinn Tsai, Yoshio Otani (2017). *Filtration properties of nanofiber/microfiber mixed filter and prediction of its performance*. Aerosol and Air Quality Research, [Žiūrėta 2/7/21]. Prieiga per internetą: <https://aaqr.org/articles/aaqr-16-06-0a-0256.pdf>;
33. Fabian Deuber, Sara Mousavi, Lukas Federer, Marco Hofer, and Christian Adlhart (2018). *Exploration of ultralight nanofiber aerogels as particle filters: capacity and efficiency*. Mater. Interfaces, [Žiūrėta 2/7/21]. Prieiga per internetą: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsmi.8b00455>;
34. Wannes Sambaer, Martin Zatloukal and Dusan Kimmer (2011). *3D Air Filtration Modeling for Nanofiber Based Filters in the Ultrafine Particle Size Range*. [Žiūrėta 2/7/21]. Prieiga per internetą: <https://core.ac.uk/download/pdf/20272738.pdf>;
35. R.Manikantan, James Gunasekaran (2013). *Modeling and Analysing of Air Filter in Air Intake System in Automobile Engine*. [Žiūrėta 10/10/2021]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/258396485_Modeling_and_Analysing_of_Air_Filter_in_Air_Intake_System_in_Automobile_Engine;
36. Shichao Zhang, Hui Liu, Xia Yin, Zhaoling Li, Jianyong Yu, Bin Ding (2017). *Tailoring Mechanically Robust Poly(m-phenylene isophthalamide) Nanofibr/nets for Ultrathin High-Efficiency Air Filter*. [Žiūrėta 14/10/2021]. Prieiga per internetą: <https://www.nature.com/articles/srep40550>;
37. Dominique Thomas, Augustin Charvet, Nathalie Bardin-Monnier, Jean-Christophe Apper-Collin (2016). *Aerosol Filtration*. [Žiūrėta 14/10/2021]. Prieiga per internetą: https://books.google.lt/books?hl=lt&lr=&id=M849DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=aerosol+filtration&ots=CDrSjS1coY&sig=vGWtSG4Z2Gj486BckMAL-XEIJ9I&redir_esc=y#v=onepage&q=aerosol%20filtration&f=false;

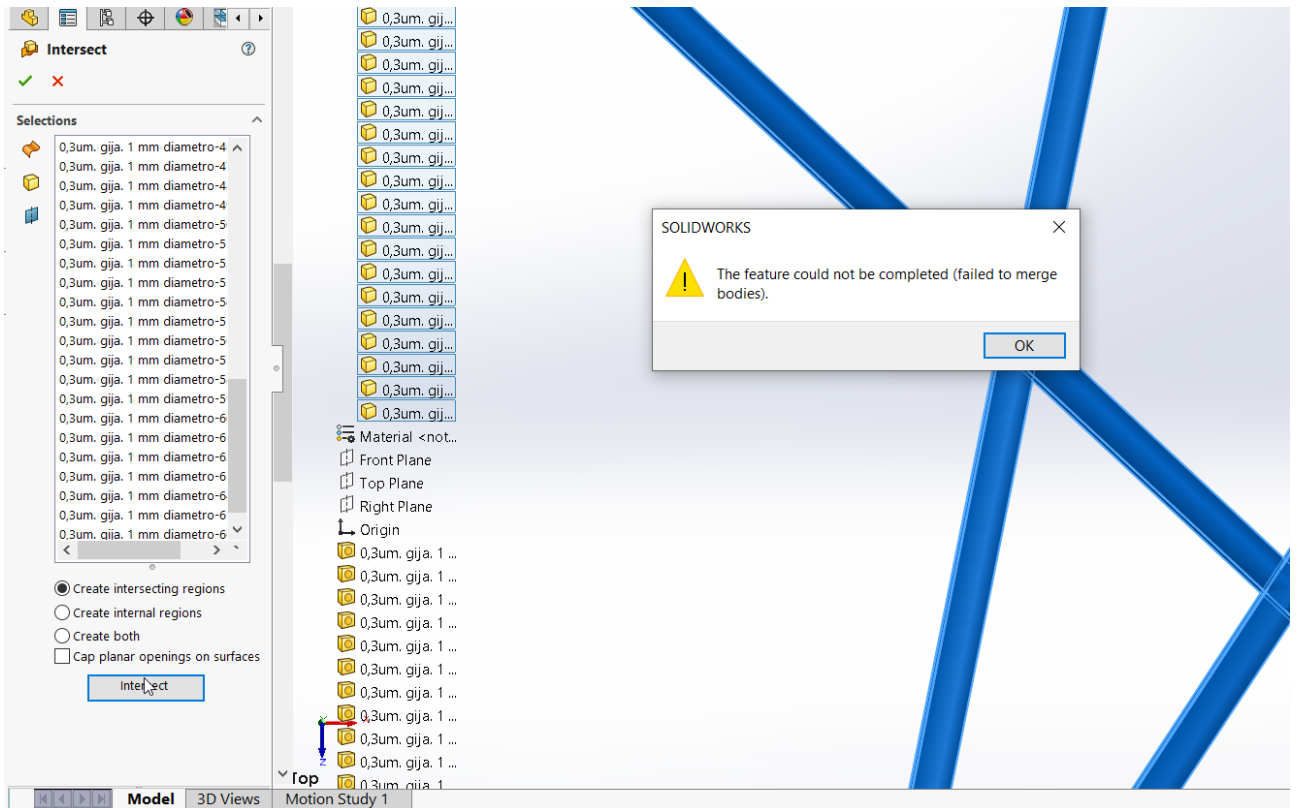
38. Rafal Przekop ir Leon Gradon (2008). *Deposition and Filtration of Nanoparticles in the Composites of Nano- and Microsized Fibers*. Aerosol Science and Technology. [Žiūrėta 17/5/2022]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/239394684_Deposition_and_Filtration_of_Nanoparticles_in_the_Composites_of_Nano_and_Microsized_Fibers;
39. Cacciari, I; Quatrini, P; Zirletta, G; Mincione, E; Vinciguerra, V; Lupattelli, P; Giovannozzi Sermanni, G (1993). *Isotactic polypropylene biodegradation by a microbial community: Physicochemical characterization of metabolites produced*. Applied and Environmental Microbiology. [Žiūrėta 28/10/2021]. Prieiga per internetą: <https://journals.asm.org/doi/10.1128/aem.59.11.3695-3700.1993>;
40. Rick Leblanc (2019). *Polypropylene Recycling - An Introduction*. The Balance Small Business. [Žiūrėta 5/11/2021]. Prieiga per internetą: <https://www.thebalancesmb.com/an-overview-of-polypropylene-recycling-2877863>;
41. Zhou Y., Liu Y., Zhang M., Feng Z., Yu D.-G., Wang K. (2022). *Electrospun Nanofiber Membranes for Air Filtration: A Review*;
42. Andrew Turner, Montserrat Filella (2021). *Hazardous metal additives in plastics and their environmental impacts*. [Žiūrėta 21/02/2022] Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412021002476>;
43. Chang Yue, Quan Zhang, Zhiqiang Zhai (2016). *Numerical simulation of the filtration process in fibrous filters using CFD-DEM method*. [Žiūrėta 3/5/2022];

Priedai

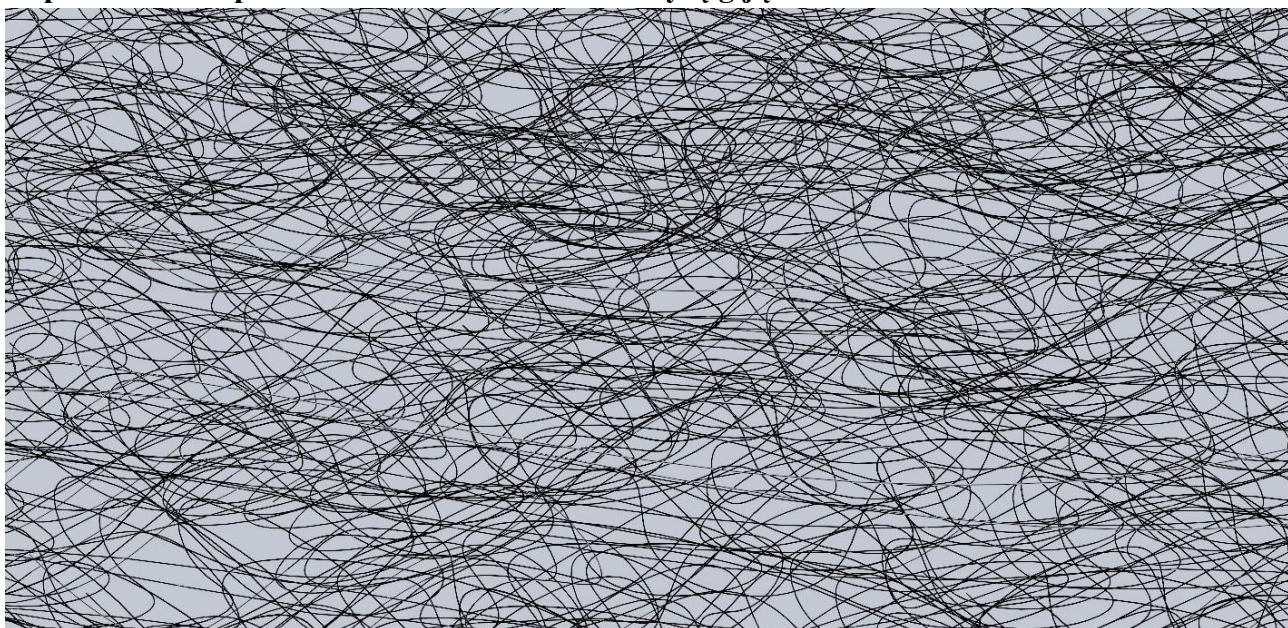
1 priedas. Neatitikimas bandant sujungti gijas ne toje pačioje plokštume, naudojant funkciją „Combine“



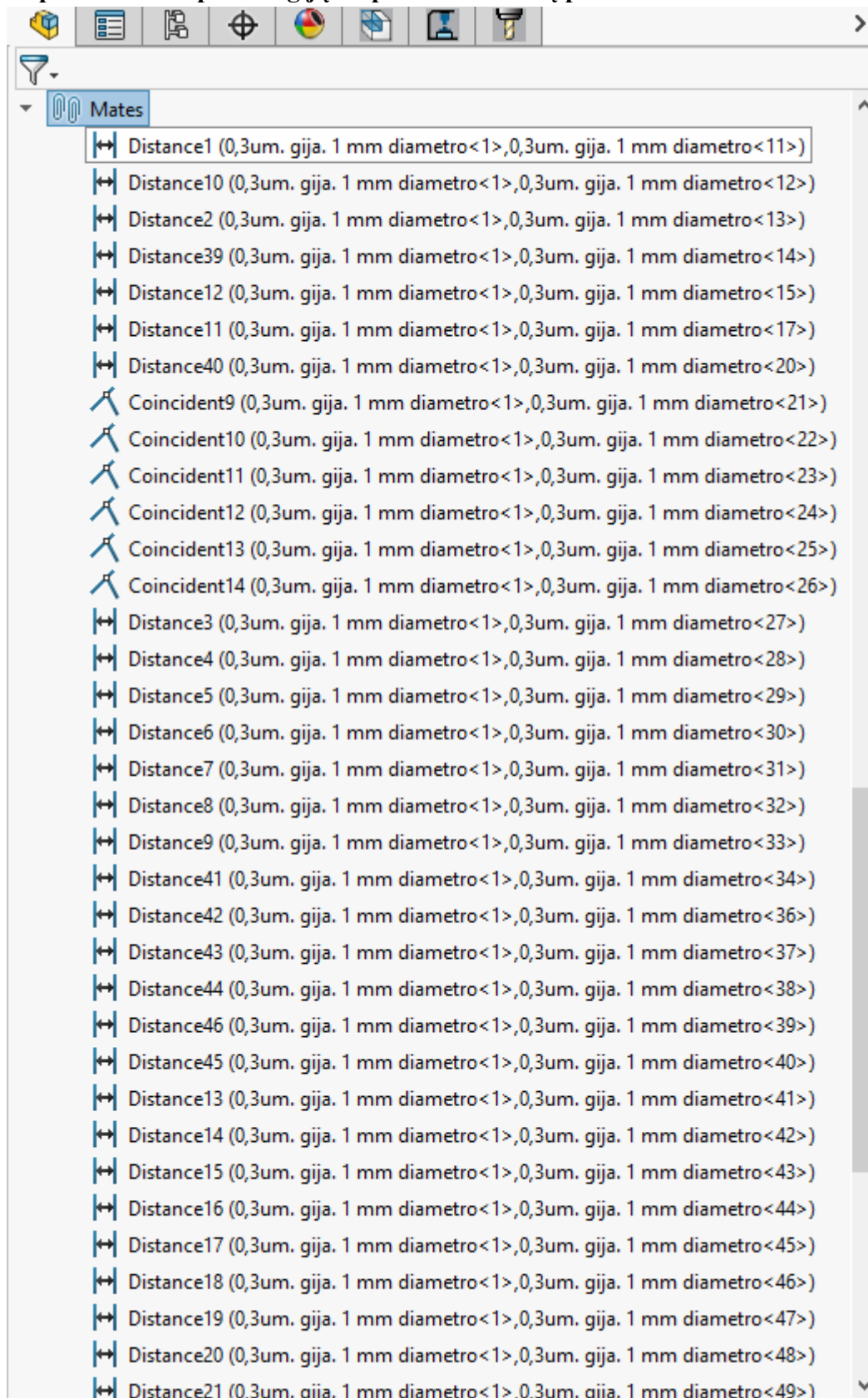
2 priedas. Neatitikimas bandant sujungti gijas ne toje pačioje plokštume, naudojant funkciją „Intersect“



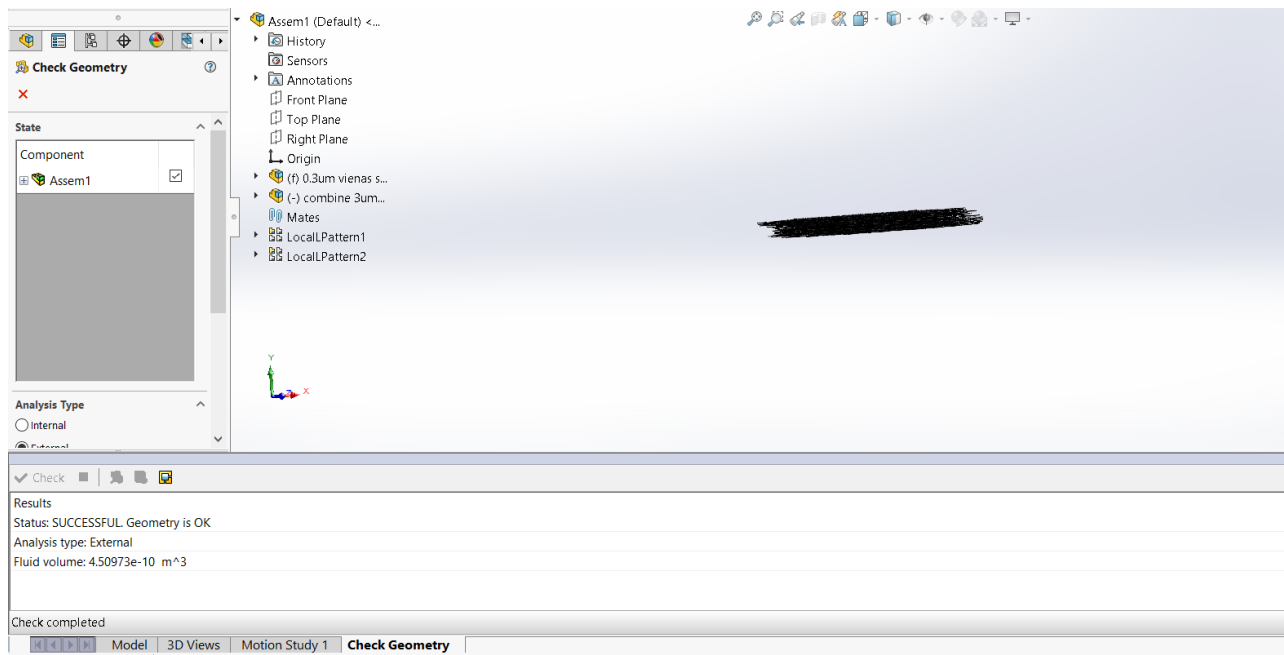
3 priedas. Nanopluoštas iš 300nm diametro raitytų gijų



4 priedas. Nanoplušto gijų tarpusavio atstumų parinkimas




5 priedas. Struktūros patikrinimas su funkcija „patikrinti geometrija“




6 priedas. Baigtinio elemento tinklelio nustatymai



Global Mesh Settings ?


✓ ✗ ↔


 0 9


 0 4 9


Channels ^


 # 10


 0 5 9


 0 m


 0 m


Advanced Refinement ^

 0 4 9


 0 4 9

 0.317560429 rad

 0 1 9

 6.82415216e-06 m

Close Thin Slots ^

 1e-08 m

7 priedas. Programos persikrovimai, strigimai, funkcijų neveikimas.

SOLIDWORKS



SOLIDWORKS is busy running the Save
As command

→ Wait for the command to finish
Recommended

→ Close SOLIDWORKS
You may lose unsaved work



SOLIDWORKS Error Report



An error has occurred, causing SOLIDWORKS to quit unexpectedly.

Fault Module:

SOLIDWORKS will attempt to recover your work automatically at startup.

Send your Error Report (~ 445 MB) to DS SOLIDWORKS Corporation.

[Preview Report Contents](#)

What were you doing when SOLIDWORKS crashed (optional)?

1. Started SOLIDWORKS
2. Open an existing Part
3. etc

Join the [SOLIDWORKS Customer Experience Improvement Program](#) to send Error Reports automatically and help improve quality

Choose an



An error has occurred while attempting to send the Customer Experience Improvement Program data.

Done

OK

[Get Support](#)

[Privacy Policy](#)

SOLIDWORKS

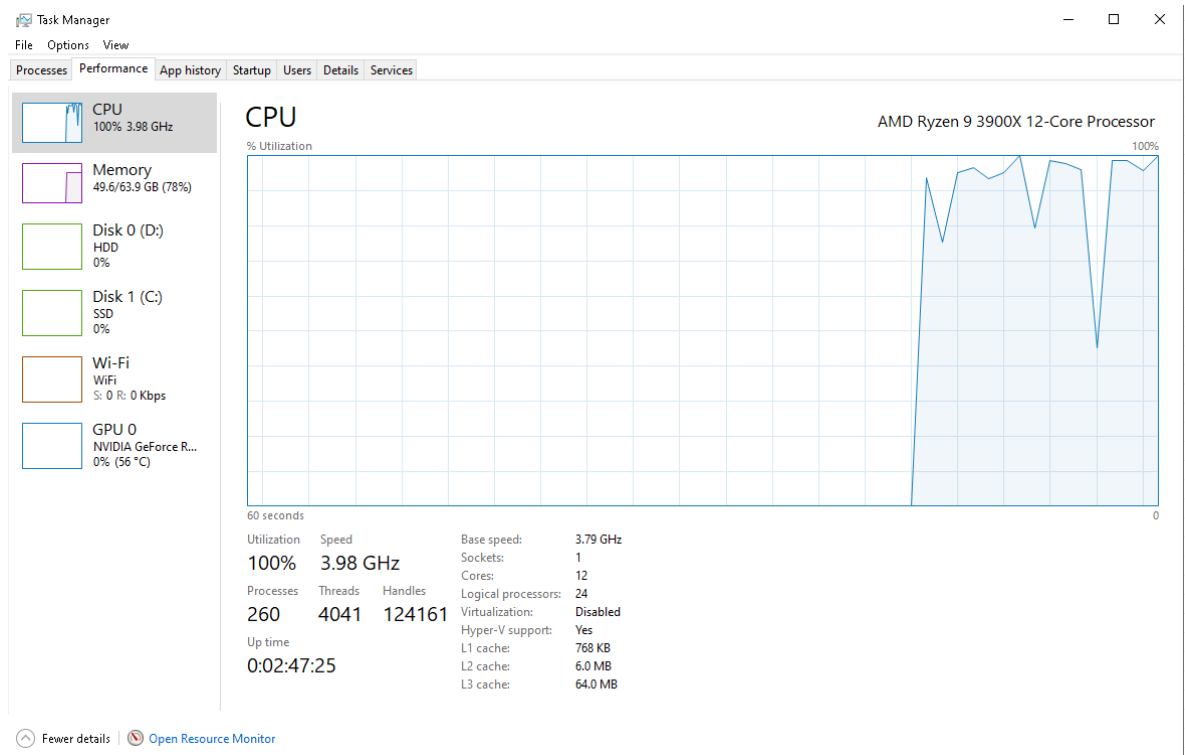
SOLIDWORKS 2022 has
encountered a problem and needs
to close.

Generating crash report. Please wait...

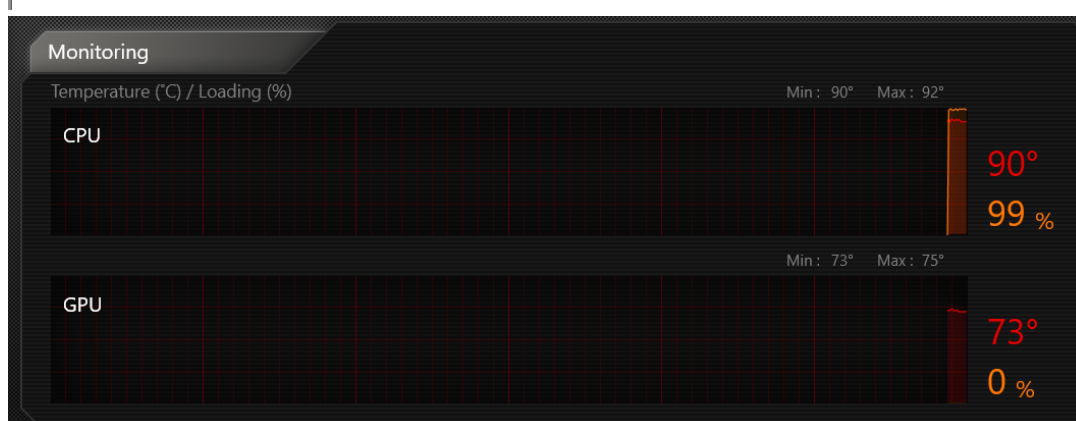


SOLVER ABNORMALLY TERMINATED! Please contact the support service.

8 priedas. Įrangos resursų naudojimas

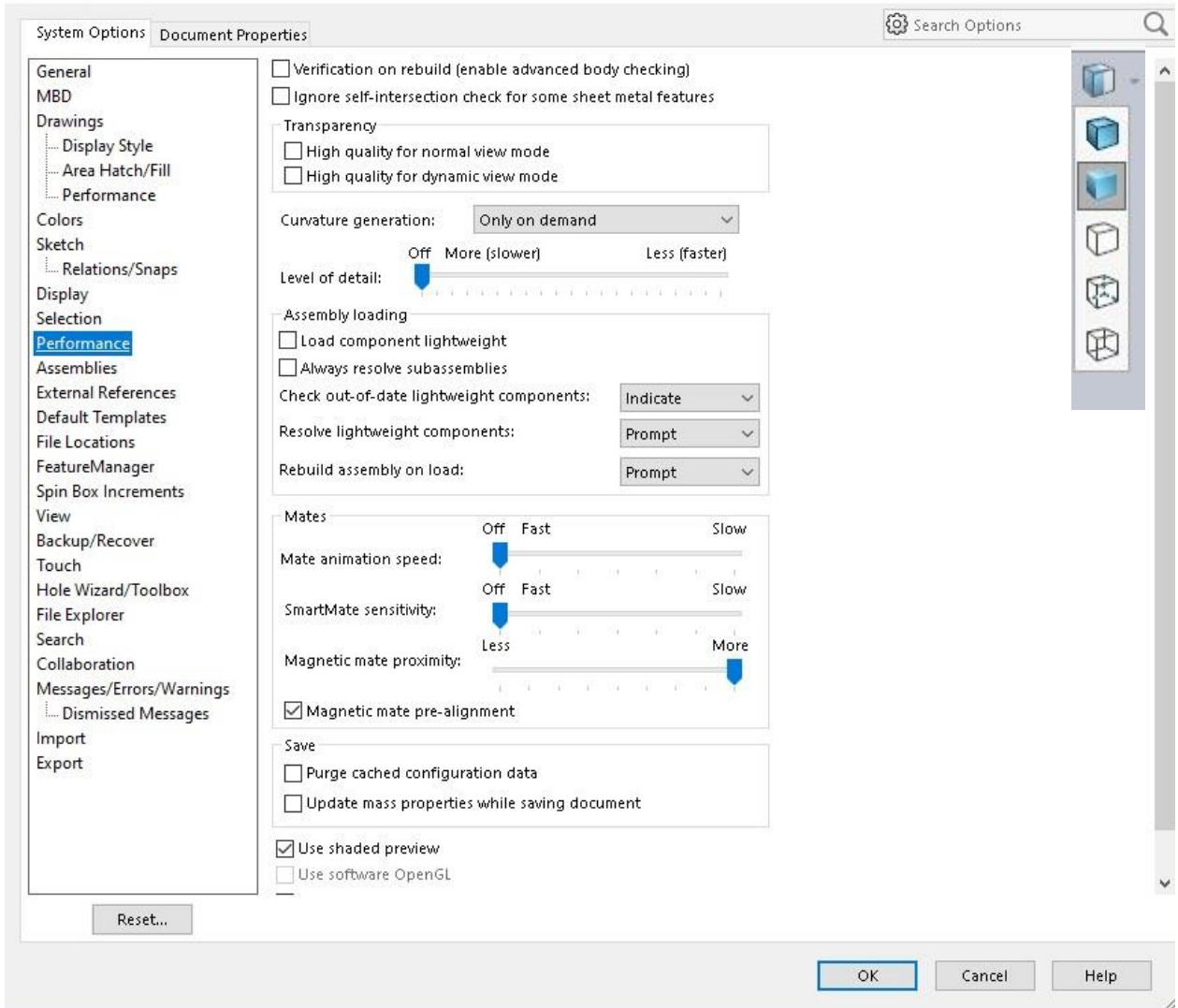


Name	Status	100% CPU	97% Memory	0% Disk	0% Network	4% GPU	GPU en
efdsolver		90.0%	28,213.0 ...	0.1 MB/s	0 Mbps	0%	
System		8.5%	0.1 MB	0.1 MB/s	0 Mbps	0%	
Antimalware Service Executable		0.9%	95.8 MB	0 MB/s	0 Mbps	3.4%	GPU
Task Manager		0.4%	20.7 MB	0 MB/s	0 Mbps	0%	
SolidWorks (4)		0.1%	63.6 MB	0.1 MB/s	0 Mbps	0%	
Console Window Host		0.1%	0.2 MB	0 MB/s	0 Mbps	0%	
Windows Explorer		0.1%	41.4 MB	0 MB/s	0 Mbps	0%	
Service Host: Local Service (Network Restricted)		0.1%	2.8 MB	0 MB/s	0 Mbps	0%	
WMI Provider Host		0.1%	2.9 MB	0 MB/s	0 Mbps	0%	
System interrupts		0.1%	0 MB	0 MB/s	0 Mbps	0%	
Windows Audio Device Graph Isolation		0%	16.2 MB	0 MB/s	0 Mbps	0%	
SOLIDWORKS Resource Monitor		0%	2.0 MB	0 MB/s	0 Mbps	0%	
NVIDIA Container		0%	2.9 MB	0.1 MB/s	0 Mbps	0%	
Desktop Window Manager		0%	9.0 MB	0 MB/s	0 Mbps	0.1%	GPU

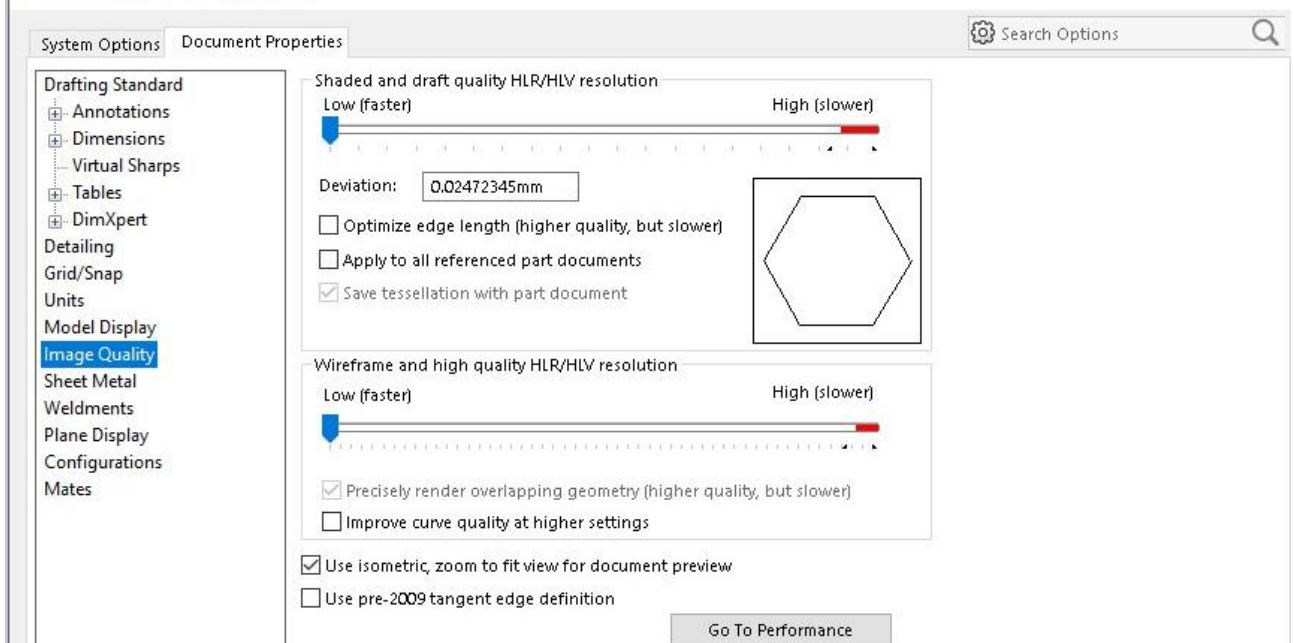


9 priedas. Programos resursų naudojimo mažinimas

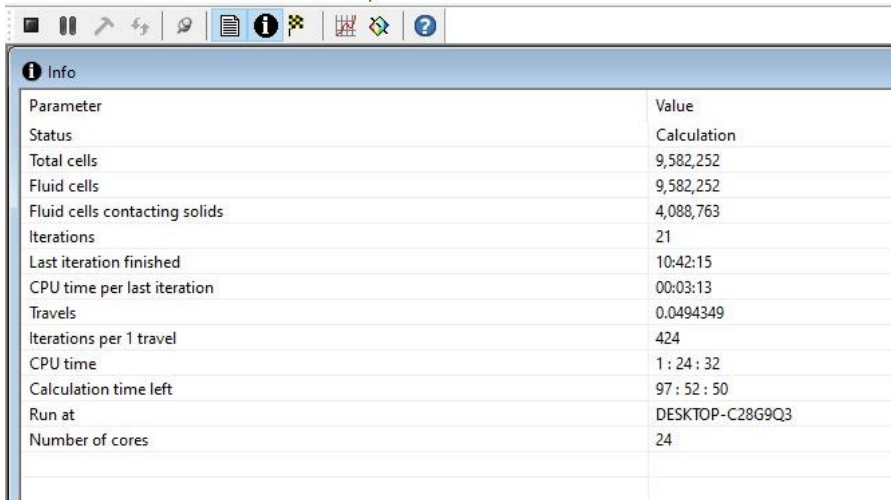
System Options - Performance



Document Properties - Image Quality



10 Priedas. Modeliavimo skaičiavimo laikas



The screenshot shows a software interface with a toolbar at the top containing icons for file operations, information, and help. Below the toolbar is a panel titled "Info" which contains a table of simulation parameters and their values.

Parameter	Value
Status	Calculation
Total cells	9,582,252
Fluid cells	9,582,252
Fluid cells contacting solids	4,088,763
Iterations	21
Last iteration finished	10:42:15
CPU time per last iteration	00:03:13
Travels	0.0494349
Iterations per 1 travel	424
CPU time	1 : 24 : 32
Calculation time left	97 : 52 : 50
Run at	DESKTOP-C28G9Q3
Number of cores	24