



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS

Justas Vaščėga

KONSTRUKCINIŲ SIENELIŲ PRITAIKYMAS AUTOMOBILIŲ
EISMO KELIAMOS TARŠOS MAŽINIMUI

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Prof. dr. Linas Kliučininkas

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS

**KONSTRUKCINIŲ SIENELIŲ PRITAIKYMAS AUTOMOBILIŲ
EISMO KELIAMOS TARŠOS MAŽINIMUI**

Baigiamasis magistro projektas
Aplinkosaugos inžinerija (kodas 621H17001)

Vadovas

Prof. dr. Linas Kliučininkas

2016-06-06

Recenzentas

Doc. dr. Violeta Kaunelienė

2016-06-06

Projektą atliko

Justas Vaščėga

2016-06-06

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Cheminės technologijos

(Fakultetas)

Justas Vaščėga

(Studento vardas, pavardė)

Aplinkosaugos inžinerija, 621H17001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Konstruktinių sienelių pritaikymas automobilių eismo keliamos taršos mažinimui

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. birželio 06 d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Justo Vaščėgos**, baigiamasis projektas tema „Konstruktinių sienelių pritaikymas automobilių eismo keliamos taršos mažinimui“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Vaščėga, Justas. Konstrukcinių sienelių pritaikymas automobilių eismo keliamos taršos mažinimui. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Linas Kliučininkas; Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Bendroji inžinerija / Technologijos mokslai

Reikšminiai žodžiai: *kietosios dalelės, oro tarša, ciklonas, konstrukcinės sienelės.*

Kaunas, 2016. 56 p.

SANTRAUKA

Oro užterštumas kietosiomis dalelėmis miestuose yra viena opiausių aplinkosaugos problemų. Padidėjęs kietųjų dalelių kiekis yra siejamas su padidėjusiu sergamumu širdies, kraujagyslių, kvėpavimo takų ir kitomis ligomis, taip pat kietosios dalelės daro neigiamą poveikį mechanizmas, bei pastatams. Dėl šios priežasties baigiamojo magistro projekto tikslas - išanalizuoti kelių transporto sukeltus oro srautus, dalelių sklaidos greičius ir suprojektuoti blokelyje integruotą cikloną, kurio pagalba kietosios dalelės būtų pasyviai šalinamos iš aplinkos oro.

Mokslinių straipsnių, darbo tema, analizė atskleidė pagrindinius kietųjų dalelių susidarymo ir patekimo į aplinkos orą šaltinius bei jų poveikį žmogaus sveikatai. Detaliai išnagrinėtas kietųjų dalelių susidarymas dėl intensyvaus automobilių eismo. Taip pat išnagrinėta viena iš statybiniuose blokeliuose integruotų ciklonų panaudojimo galimybių - akustinės sienelės.

Panaudojant specializuotą kompiuterinę programą SolidWorks buvo sudarytas sienelės modelis, kuriame išnagrinėtos oro srauto sklaidimo trajektorijos, elgesys bei greičiai ties sienele. Taip pat atlikti teoriniai skaičiavimai dalelių ribiniams greičiams bei ciklonų efektyvumui ir slėgių nuostoliams nustatyti. Pagal gautus duomenis buvo parinkti ir suprojektuoti nestandartinio ciklono modelio parametrai. Blokelyje integruotas ciklonas buvo atspausdintas panaudojant 3D spausdinimo technologiją ir numatytos jo panaudojimo galimybės.

Vaščėga, Justas. *Application of Structural Walls for the Automotive Traffic Pollution Reduction: Master's thesis in Environmental engineering.* / supervisor assoc. prof. Linas Kliučininkas. The Faculty of Chemical Technology, Kaunas University of Technology.

Research area and field: General Engineering / Technology Sciences

Key words: *solid particles, air pollution, cyclone, structural walls.*

Kaunas, 2016. 56 p.

SUMMARY

Air pollution by solid particulates in urban areas is one of the most pressing environmental problems. Increased number of particles is associated with increased incidence of cardiovascular, respiratory and other diseases as well as negative influence on mechanisms and buildings. As a result, this thesis is addressed to analyse traffic-related air flows, speed of particle dispersion as well as aimed at design of construction blocks with integrated cyclones. The designed blocks with integrated cyclons could be used for particulate matter collection and passive cleaning of ambient air.

The analysed scientific publications are focused on determination of main properties of particulate matter, formation and releases into the ambient air sources and possible impacts on human health. Also, detailed examination of dynamics of particles in the environment of road transport was performed. Furthermore, it was considered possible application of cyclon blocks in to the construction of acoustical walls.

In order to achieve the aims of the thesis, specialised computer software Solid Works was applied. The following parameters were analysed: air flow propagation path, behavior and speeds approaching the wall. Moreover theoretical calculations were carried out to identify particle speed limit, efficiency and pressure loss of cyclones. Based on the obtained characteristics custom configuration of the cyclone was selected. Cyclon block was materialised by using 3D printing technology. Finally, possible application areas of cyclon blocks were discussed.

TURINYS

IŽANGA.....	9
1. LITERATŪROS APŽVALGA	11
1.1. Transporto sukeliama oro tarša kietosiomis dalelėmis	11
1.1.1. Kietosios dalelės iš automobilių dalių	11
1.1.2. Išmetamųjų dujų kietosios dalelės	16
1.2. Kelių transporto sektoriuje susidarančių KD tyrimo būdai	18
1.2.1. Dalelių analizavimas mobiliais automobiliais	19
1.2.2. Dinamometriniai matavimai	20
1.2.3. Kelio simulatorius	21
1.2.4. Dalelių matavimas tuneliuose	22
1.3. Akustinės sienelės	23
1.3.1. Inovatyvūs akustinių sienelių modeliai	24
1.3.2. Palyginimas įprastų akustinių sienelių su absorbuojančiomis	26
1.4. Ciklonai	27
1.5. SolidWorks Flow Simulation	29
1.6. Literatūros apžvalgos apibendrinimas	31
2. METODOLOGINĖ DARBO DALIS	32
2.1. Modeliavimas panaudojant SolidWorks Flow Simulation programinę įrangą	32
2.1.1. Oro srautų modeliavimas ties sienele	32
2.1.2. Statybiniame blokelyje integruoto ciklono modeliavimas	33
2.2. Kietųjų dalelių greičio oro sraute skaičiavimas	34
2.3. Teoriniai ciklono efektyvumo skaičiavimai	35
3. REZULTATAI	37
3.1. Modeliavimas panaudojant SolidWorks Flow Simulation programinę įrangą	37
3.1.1. Oro srautų modeliavimas ties sienele	37
3.1.2. Statybiniame blokelyje integruoto ciklono modeliavimas	40
3.2. Sferinių kietųjų dalelių ribinio greičio skaičiavimas	43
3.3. Teoriniai ciklono efektyvumo skaičiavimai	44
4. STATYBINIUOSE BLOKELIUOSE INTEGRUOTŲ CIKLONŲ PANAUDOJIMAS	46
IŠVADOS	48
LITERATŪROS SĄRAŠAS	49
PRIEDAI	52

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Sunkiasvorio dyzelinio variklio kietųjų dalelių sudėtis [18].....	16
2 pav. Dyzelinių variklių išmetamųjų dalelių formavimasis [19].....	17
3 pav. Mobilios KD koncentracijų tyrimo įrangos schema [10].....	19
4 pav. Automobilių emisijų matavimai panaudojant dinamometrą.	20
5 pav. Transporto tyrimų instituto kelio simulatorius [8].....	22
6 pav. Triukšmo bangų sklidimas per akustines sienelės [26].....	23
7 pav. Pirmame iš kairės modelyje pavaizduota T formos akustinė sienelė, antrame – Y formos ir trečiame – palinkusios formos [30].	25
8 pav. Garsą absorbuojanti akustinė sienelė [30].....	25
9 pav. Triukšmo tunelių susidarymas atspindint garso bangas nuo sienelių [26].....	26
10 pav. Triukšmo bangų sklidimas gyvenviečių aplinkoje tarp pastatų [26].....	27
11 pav. Absorbuojančių medžiagų panaudojimas mažinant triukšmo lygį gyvenvietėse [26].	27
12 pav. Išmatavimai klasikinio ciklono.	28
13 pav. Darbo naudojant SolidWorks Flow Simulation eiga [34].....	30
14 pav. Sudaryto sienelės modelio vaizdas iš šono.....	37
15 pav. Srautų greičiai pavaizduoti optimaliame sienelės modelyje iš šono.	39
16 pav. Srautų greičiai pavaizduoti optimaliame sienelės modelyje iš priekio.	40
17 pav. Srautų trajektorijos pavaizduotos optimaliame sienelės modelyje.....	40
18 pav. Kairėje pavaizduotas dalelių judėjimas esant absorbuojančioms sienelėms, dešinėje – idealaus atspindžio.....	42
19 pav. Srautų greičio įtaka judėjimo trajektorijoms.	42
20 pav. Optimalus ciklonas. Kairėje pusėje pavaizduotos dalelių judėjimo trajektorijos, dešinėje srautai ir sūkurių susidarymas.	43
21 pav. Betoninių ir metalinių kelio atitvarų pavyzdžiai.	46
22 pav. Akustinių sienelių konstrukcijos pavyzdys.	47
23 pav. Konstrukcinės sienelės ir kelio atitvarų vizualizacija.	47

LENTELIŲ SĄRAŠAS

Lentelė 1. Klasikinių ciklonų proporcijos.....	28
Lentelė 2. SolidWorks Flow Simulation bendrieji nustatymai [35].	29
Lentelė 3. Srauto šaltinio atstumo nuo sienelės įtaka srauto judėjimui.	38
Lentelė 4. Sienelės aukščio įtaka oro srauto judėjimui.....	38
Lentelė 5. Srauto greičio įtaka oro srauto judėjimui.....	39
Lentelė 6. Suprojektuoto blokelyje integruoto ciklono parametrai.	43
Lentelė 7. Sferinių kietųjų dalelių ribiniai greičiai.	44
Lentelė 8. Ciklonų skaičiavimų rezultatai.	44

IŽANGA

Temos aktualumas. Oro užterštumas kietosiomis dalelėmis (toliau, KD) yra pagrindinė miestų aplinkos oro kokybės problema. Kietosios dalelės – tai ore esančių dalelių ir skysčio lašelių (aerolių) mišinys, kurio sudėtyje gali būti įvairių komponentų – rūgščių, sulfatų, nitratų, organinių junginių, metalų, dirvožemio dalelių, dulkių, suodžių ir kt. Į orą išmetamos kietosios dalelės labai skiriasi savo fizine ir chemine sudėtimi, dalelių dydžiu bei jų išmetimo šaltiniais [1].

Kietųjų dalelių koncentracijos padidėjimą lemia autotransporto sukelta tarša, statybų, gatvių tiesimo ir remonto darbai, kūrenimas kietuoju kuru, nepalankios teršalų išsisklaidymui meteorologinės sąlygos (rūkas, dulksna, silpnas vėjas). Atšalus orams suintensyvėja šiluminės energijos gamyba tiek energetikos įmonėse, tiek ir individualiuose namuose, dėl to padaugėja ir į orą išmetamų teršalų. Be to, šaltomis dienomis orai dažnai būna ramūs, be kritulių, oro srautai apatiniuose atmosferos sluoksniuose juda nepakankamai, kad išsklaidytų besikaupiančius teršalus.

Transporto sektoriuje, Europos Sąjungos šalyse – narėse, 2013 metais buvo generuojama 13 % ir 15 % bendrų kietųjų dalelių emisijų, atitinkamai KD 10 ir KD 2.5. Ne išmetamųjų dujų kietųjų dalelių emisijos sudaro apie 50 % išmetamųjų dujų KD 10 ir apie 22 % KD 2,5 emisijų. Todėl yra akivaizdu, kad nors ir visiškai bus apribotos išmetamųjų dujų emisijos, kelių transportas vistiek išliks vienu iš pagrindinių kietųjų dalelių patekimo į atmosferą šaltinių. Europos aplinkos agentūros 2015 metų ataskaitoje „Oro kokybė Europoje“ teigiama, kad iki 2020 metų apie 90 % visų kietųjų dalelių emisijų iš kelių eismo bus generuojama ne iš išmetamųjų dujų šaltinių [2].

Europos Sąjungoje net 72 % populiacijos gyvena miestų vietovėse ir šis kiekis numatomas dar didėti. Nepaisant didelių pastangų siekiant pagerinti miestų aplinkos oro kokybę, pagrindė mažinant kelių eismo emisijas, oro tarša išlieka didžiausia aplinkos sveikatos rizika Europoje. Žmogaus sveikata ir savijauta yra glaudžiai siejama su aplinkos būkle. Geros kokybės natūrali aplinka gali suteikti daug naudos fizinei, socialiniai ir mentaliniai asmens gerovei. Tačiau aplinkos būklės blogėjimas, sukeliamas oro ir vandens taršos, triukšmo, radiacijos ar chemikalų, gali sudaryti neigiamą poveikį sveikatai [3].

Oro tarša yra viena didžiausių aplinkos rizikų sveikatai Europoje. Kalbant apie susijusias išlaidas su oro tarša Europoje, Europos Komisija apskaičiavo, kad visos, su sveikata susijusios išorinės išlaidos 2010 metais buvo apie 330 – 940 milijardų EUR per metus. Taip pat buvo paskaičiuoti tiesioginiai ekonominiai nuostoliai: dėl prarastų darbo dienų siekė 15 milijardų EUR, sveikatos priežiūros išlaidos 4 milijardai EUR, pasėlių derliaus nuostoliai 3 milijardai EUR ir už 1 milijardą EUR padaryta žala pastatams [2].

Darbo tikslas - sumodeliuoti automobilių eismo sukiamų kietųjų dalelių sklaidos greičius ir trajektorijas bei suprojektuoti statybiniame blokelyje integruotą cikloną dalelėms sugaudyti.

Darbo uždaviniai:

1. Išnagrinėti mokslines publikacijas darbo tema;
2. Sumodeliuoti autotransporto eismo sukiamus oro srautus ties konstrukcine sienele;
3. Suprojektuoti ir pagaminti statybiniame blokelyje integruotą cikloną;
4. Apskaičiuoti sferinės formos aerolio dalelės ribinius greičius ties konstrukcine sienele;
5. Atlikti teorinius ciklonų efektyvumo skaičiavimus;
6. Pateikti statybinių blokelių su integruotais ciklonais panaudojimo galimybes.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Transporto sukeliama oro tarša kietosiomis dalelėmis

Kietosios dalelės susidarančios mobiliuose transporto šaltiniuose yra siejamos su nesuskaičiuojamu kiekiu sukiamų neigiamų sveikatos pasekmių nuo vėžio iki širdies ir plaučių ligų, nervų, genų bei imuninės sistemos pažeidimų. [4-7]. Širdies ligos ir insultas yra dažniausios priežastys ankstyvų mirčių siejamų su oro tarša ir sudaro net 80 % ankstyvų mirčių. Kaip ir KD koncentracija, taip ir jų kokybinės savybės yra labai svarbus faktorius darantis poveikį sveikatai. Šios savybės yra dalelių dydis, forma, cheminė sudėtis, fizinės savybės, absorbuotos bei adsorbuotos medžiagos [8]. Oro tarša kaip visuma, taip pat kietosios dalelės kaip atskiras komponentas oro taršos mišinyje, 2013 metais buvo klasifikuotos kaip kancerogeninės [2].

Kietųjų dalelių emisijas iš kelių transporto sudaro emisijos iš išmetamųjų vamzdžių ir emisijos iš automobilių susidėvėjusių dalių, tokių kaip stabdžiai, padangos, sankabos ir pakabos (tai yra ne vidaus degimo varikliuose susidarančios emisijos). Dalelės ne iš išmetamųjų dujų yra stambios (KD 2,5 – 10), o išmetamųjų dujų kietosios dalelės yra smulkios (KD < 2,5) [9-11].

Daug pastangų yra įdėta siekiant sumažinti išmetamųjų dujų emisijas, pvz.: įdiegti dalelių filtrai dyzeliniams varikliams. Kadangi šios pastangos neturi nesąlygoja kelių dulkių emisijoms, todėl ne išmetamųjų KD susidarymas tapo lygiai svarbus arba netgi daugeliu atvejų svarbesnis nei išmetamųjų dujų. Berlyne atliktame tyrime, teigiama, kad ~50 % KD 10 koncentracijų kelkraščiuose sudaro pakartotinai į orą išmetamos kelių paviršiaus dulkės [12]. Jungtinėje karalystėje esančiame Hatfield tunelyje atliktais tyrimais teigiama, kad ~47 % KD 10 koncentracijų sudaro išmetamųjų dujų kietosios dalelės, o pakartotinai į orą išmetamos padangų, stabdžių ir kelių dangos susidėvėjimo dalelės sudaro ~46 % susidarančių koncentracijų [13]. Nėgana to, Stokholme atliktuose tyrimuose teigiama, jog net iki 90 % KD 10 koncentracijų pavasarį sudaro mechaniškai generuojamos dalelės dėl kelių paviršiaus susidėvėjimo ir pakartotino dulkių išmetimo į orą [14].

1.1.1. Kietosios dalelės iš automobilių dalių

Kietosios dalelės susidaro eksploatuojant automobilius su susidėvėjusiomis, surūdijusiomis detalėmis, taip pat jau nusėdusios dalelės ant kelio esant intensyviai eismui gali būti pakartotinai išmetamos į orą. Pagrindinė priežastis kodėl reikia atkreipti dėmesį į šias dalelių emisijas yra joms būdingas toksiškumas ir tendencija veikti kaip nešėjai sunkiųjų metalų bei kancerogeninių junginių. Metalų koncentracijos KD, susidarančiose eksploatuojant automobilius, labai priklauso nuo eismo kiekio ir konfigūracijos, auto transporto parko charakteristikų (senesnis ar naujesnis, kiek lengvųjų

automobilių, kiek sunkiasvorių ir pan.), vairavimo pobūdžio, regiono klimato ir geologijos. Vairavimo pobūdis yra labai svarbus faktorius lemiantis dalelių susidarymą padangų su kelio paviršiumi kontakto metu. Nustatyta, kad agresyviai vairuojant, staigiai stabdant, posūkiuose važiuojant didesniu greičiu susidaro daugiau neįprastų padangų ir kelio susidėvėjimo dalelių lyginant su saugiu vairavimu esant pastoviam greičiui [10]. Dar vienas svarbus aspektas yra naudojamų padangų ir stabdžių sudedamosios medžiagos, kurios kinta priklausomai nuo gamintojo [11].

Regionuose, kuriuose yra naudojamos dygliuotos padangos ir sukibimą gerinančios medžiagos (šiaurinės šalys, tokios kaip Kanada, šiaurinė JAV dalis, Skandinavijos šalys ir pan.) dėl mechaninių priežasčių kelių eismo sraute susidaro didelės KD koncentracijos. Tai yra pagrindinė priežastis didelei kietųjų dalelių koncentracijai judrių gatvių ir kelių aplinkoje. Jau aštuntojo dešimtmečio pradžioje yra nustatyta, kad kelių dangos ir automobilių padangų sudilimo dalelės svariai prisideda prie labai didelių KD 2,5 koncentracijų aplinkos ore susidarymo [15].

Kietųjų dalelių koncentracijos, susijusios su transportu, padidėjimas yra pastebimas vėlyvą rudenį ir ankstyvą pavasarį. Nuo lapkričio mėnesio yra privaloma važinėti su žieminėmis padangomis su kuo ir siejamas šis KD koncentracijų padidėjimas, nes žieminės padangos, ypač dygliuotos labai didina KD susidarymą. Kietųjų dalelių emisijos yra žiemą mažesnės esant šlapiesiems keliams, tačiau prasidedant žiemos sezonui ir pavasarį jam besibaigiant keliai būna sausi, o žieminės padangos vis dar naudojamas, dėl ko ir susidaro šie KD koncentracijų šuoliai [16].

Kietųjų dalelių koncentracijos sudaromos kelių eismo yra išmatuojamos naudojant KD emisijų faktorių. Populiariausias būdas išmatuoti dalelių emisijos faktorių yra oro dispersijos prognozavimas panaudojant „pėdsakines“ dujas. Tai tokios dujos pagal kurių emisijas, žinant tiesioginę priklausomybę, yra nustatomos kitų komponentų emisijos. „Pėdsakinės“ dujos gali būti arba pridedamos, arba dujos išsiskiriančios iš automobilių, kaip anglies monoksidas. Dažniausiai yra naudojamos NO_x dujos, kurios yra išskiriamos iš automobilių su išmetamosiomis dujomis [9].

1.1.1.1. Padangų kietosios dalelės

Kietosios dalelės nuo padangų paviršiaus susidaro kontaktuojant padangoms su kelio paviršiaus nelygumais. Šios dalelės turi sudėtyje natūralių kaučiukų polimerų kaip stirenbutadieno guma bei poliizopreno guma ir cinko, esančio padangų sudėtyje cinko oksidų ar organinių cinko junginių pavidalu. Cinkas padangų gamyboje naudojamas palengvinti vulkanizacijos procesui (vulkanizacijos procesu yra pagerinamas padangų standumas, abrazyvumas bei elastingumas). ES keleivinių automobilių padangų tipinė sudėtis būna apie 1 % cinko oksido, gumos - 47 %, metalų - 16,5 % ir juodosios anglies (carbon black) - 21,5 %. Pagrindiniai padangų teršiantieji agentai yra n-alkanai, policikliniai aromatiniai karbonatai (toliau, PAH), n-alkaninės rūgštys, benzotiazoliai ir

sunkieji metalai. Padangos per jų eksploatavimo laiką galima prarasti iki 10 % savo masės. Vidutinė padangų paviršiaus dalelių emisijų vertė priklausomai nuo kelio, padangos ir automobilio būklės gali svyruoti nuo 0,006 iki 0,009 g/km [11].

Dauguma naudojamų padangų šiaurinėse šalyse skiriasi nuo naudojamų kitose Europos dalyse, pavyzdžiui centrinėje dalyje. Taip yra, nes šiaurinėse šalyse akcentuojama daugiau į sniegą ir ledą, kai tuo tarpu centrinėje Europoje padangų dizainas skirtas kovai su susidarančiu vandens sluoksniu ant kelio, dėl kurio mažėja padangų sukibimas su kelio danga.

Žieminės padangos skirstomos į dvi grupes: dygliuotos ir trinties padangos. Dygliuotos padangos turi metalinius spyglius, kurie pagerina sukibimą apledėjusiuose keliuose. Kita grupė žieminių padangų neturi metalinių spyglių, bet turi specialius padangų protektoriaus dizainus ir medžiagas. Pagal medžiagos tipą jos skirstomos į minkšto mišinio (sukurtos siekiant pakeisti dygliuotas padangas) ir kieto mišinio (standartinės, Europinės padangos). Kadangi dygliuotos padangos lemia kelių dangos padidėjusį susidėvimą, daugelyje šalių joms yra taikomi apribojimai, kai kuriose valstybėse dygliuotos padangos yra netgi uždraustos. Šiam padangų tipui taikomi apribojimai spyglių svoriui, išsikišimui, antgalių dizainui bei kiekiui vienoje padangoje [16].

Kaip anksčiau buvo minėta, yra nustatyta, kad prasidedant žieminių padangų sezonui ir jam baigiantis yra stebimas žymus KD koncentracijų padidėjimas susijęs su kelių eismu. Tačiau mokslininkai ne vieningai sutaria dėl to priežasčių. Vieni mokslininkai teigia, kad dygliuotų padangų naudojimas prisideda prie didelių KD koncentracijų keliuose ir gatvėse. Teigiama, kad naudojant dygliuotas padangas 60 - 100 kartų padidėja dalelių koncentracijos lyginant su trinties padangomis. Nors ne visai įtikinama, bet tai reiškia, kad naudojamų padangų tipas turi didžiausią įtaką KD 10 dalelių susidarymui bei šių dalelių tikėtinas susidarymo šaltinis yra pačių padangų susidėvimas [15]. Tuo tarpu yra tyrėjų, kurie neigia šiuos teiginius. Kita nuomonė apie dygliuotų padangų įtaką bendrai kietųjų dalelių koncentracijai keliuose yra tokia, kad mažiau nei 1 % susidarančių dalelių, naudojant dygliuotas padangas, yra išskiriama į orą kaip KD 2,5 - 10 dalelės [9].

Padangų protektoriaus susidėvimas yra sudėtingas fizikinių-cheminių procesų junginys, kuris susidaro panaudojant trinties energiją, kuri yra generuojama sąlyčio metu tarp protektoriaus ir kelio dangos. Susidėvimimo greitis ir padangos gyvavimo laikas labai priklauso nuo padangos tipo ir eksploatavimo sąlygų.

Faktoriai darantys įtaką padangų susidėvimą:

1. Padangos savybės:

- Dydis (skersmuo/ plotis/ gylis);
- Protektoriaus gylis;
- Konstrukcija;
- Padangos slėgis ir temperatūra;
- Kontaktuojančio paviršiaus plotas;
- Cheminė sudėtis;
- Eksploatuojamas kilometražas;
- Struktūra.

2. Automobilio savybės:

- Automobilio svoris ir jo paskirstymas;
- Varomųjų ratų padėtis;
- Variklio galia;
- Vairo stiprintuvas;
- Elektroninės stabdymo sistemos;
- Pakabos tipas ir būklė.

3. Kelio paviršiaus savybės:

- Medžiaga (asfaltas/ betonas);
- Tekstūros modelis;
- Tekstūros bangos (mikro/ makro/ mega);
- Porėtumas;
- Būklė (provėžos, išgaubimai);
- Kelio paviršiaus drėgnumas;
- Nuosėdų kiekis ant paviršiaus.

4. Automobilio vairavimo sąlygos:

- Greitis;
- Akceleracija (važiuojant ir įsibėgėjant iš vietos);
- Stabdymo dažnumas ir laikas.

Žinoma ne visos susidėvėjusios padangų medžiagos yra išskiriamos į orą kaip KD. Kai kurios didelės dalelės ir daug stambesnės medžiagos (padangų skiautelės) taip pat bus išleistos ir nusės ant kelio paviršiaus. Vis dėlto, yra daug neaiškumų padangų dilimo dalelių dydžių pasiskirstyme ir sunku teigti kokia dalis padangų susidėvimą dalelių patenka į orą kaip KD 10 [13].

1.1.1.2. Stabdžių kietosios dalelės

Stabdžiai dėl jų susidėvimą yra dar vienas KD tiesioginio išsiskyrimo į aplinką šaltinis. Apskaičiuota, kad stabdžių susidėvimą dalelės sudaro 16 – 55 % ne išmetamųjų dujų KD. Didžiausios stabdžių dulkių koncentracijos susidaro kelių nusukimuose, eismo spūstyse dėl dažno stabdymo. Stabdant susidarančių dalelių dydis yra platus, nuo PM 1 iki PM 10 [10].

Per priverstinį automobilio lėtėjimą, automobilio stabdžių kaladėlės yra veikiamos dėl trinties susidarancios didelės šilumos, ko pasekoje kaladėlės dyla. Dėl šio mechaniškai sukkelto susidėvėjimo susidaro stabdžių kaladėlių dalelės, kurios vėliau yra išskiriamos į aplinką.

Yra dvi pagrindinės dabar naudojamos stabdžių sistemų konfigūracijos: stabdžių diskų, kur plokščios stabdžių kaladėlės yra spaudžiamos prie besisukančio metalinio disko, ir būgninių stabdžių, kuriuose išlenktos pagalvėlės yra spaudžiamos prie besisukančio cilindro vidinio paviršiaus. Diskiniai stabdžiai yra plačiau naudojami, nes jų laipsniškas stabdymo efektyvumas yra žymiai geresnis nei būgninių [13].

Emisijos ir sudėtis susidarancių dalelių kinta priklausomai nuo kelių faktorių: stabdžių trinties medžiagų parametrai (sudėtyje esantis kiekis pusiau metalinių komponentų, mažai legiruoto plieno, anglies komponentų ir rotoriaus bei būgno dalys), stabdžių agregato tipas (kokie naudojami diskai, būgnai, agregato dydis, paviršiaus struktūra, griovelių gylis) ir automobilio eksploataavimo sąlygos (automobilio greitis, stabdymas, slėgis, sukimo momentas bei stabdžių temperatūra). Masių balanso matavimo tyrimais nustatyta, kad 30 - 50 % stabdymo metu susidarancių dalelių patenka į orą. Likusios dalelės nusėda ant stabdžių trinties paviršių arba kitų automobilių dalių [17].

Pagrindiniai stabdžių dalių sudėtyje esantys cheminiai komponentai yra metalų sulfidai, silicis, bario silikatai bei sulfatai ir kiti metalai, anglies pluoštas, lubrikantai. Mašinų stabdžių dulkių emisijos yra apie 44 g/metus vienai mašinai, jų sudėtyje yra didelės koncentracijos Fe, Ba, Zn, Sb, Zr ir Cu [11].

1.1.1.3. Kelių dulkių kietosios dalelės

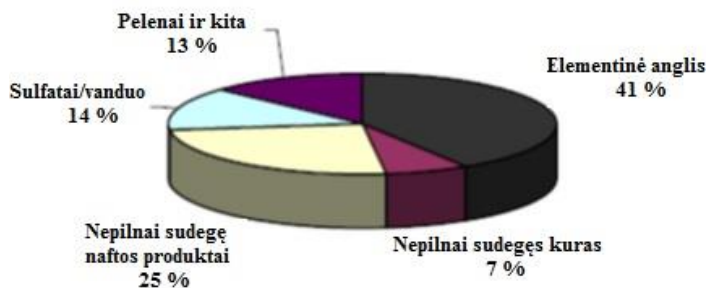
Kelių dulkės gali būti išmetamos ar pakartotinai išmetamos į atmosferą pagrinde dėl automobilių sukuriamos turbulencijos. Todėl kelių dulkės turi dinaminę ryšį su KD ore. Dulkių kiekis pakartotinai patenkantis į atmosferą priklauso nuo automobilių judėjimo greičio, kelių priežiūros ir sezoniškumo, kuris yra susijęs su meteorologiniais parametrais. Įvairiais tyrimais nustatyta, kad vėjas neturi didelės įtakos kelių dulkių patekimui į orą, taip pat gatvių valymas nėra labai efektyvus būdas sumažinant dulkių kiekį, tačiau kelio drėgnumas yra svarbus faktorius. Šaligatvio danga taip pat svarbus faktorius sąlygojantis kelių dulkių koncentraciją. Granitinės dangos išskiria daugiau KD lyginant su kvarcito danga [11].

Kelių dulkės yra plataus spektro medžiagų aglomeracija. Faktiškai bet koks antropogeninis ir biogeninis emisijų šaltinis miesto aplinkoje gali daryti įtaką dulkių kompleksų susidarymui. Miestų kelių dulkių susidarymo šaltiniai yra floros ir faunos šalutinių produktų nuosėdos kelių pakraščiuose, kelių paviršiaus susidėvėjimas, automobilių padangų bei atmosferos nuosėdos. Kelių dulkių toksiškumas priklauso nuo jų pH, sudėtyje esančių hidrofobinių organinių junginių, cinko, nopolinių

organinių junginių, sunkiųjų metalų, naftos hidrokarbonatų, benzeno, tolueno, ksileno ir policiklinių aromatinių hidrokarbonatų. Keliuose nusėdusios dulkės yra ne vien pavojingos žmonėms joms pakartotinai patekus į orą, bet jomis taip pat yra teršiamos nuotekos. Lietaus nuplautos dulkės patenka į miestų kanalizaciją taip teršiant nuotekas ir bendrą vandens aplinką [13].

1.1.2. Išmetamųjų dujų kietosios dalelės

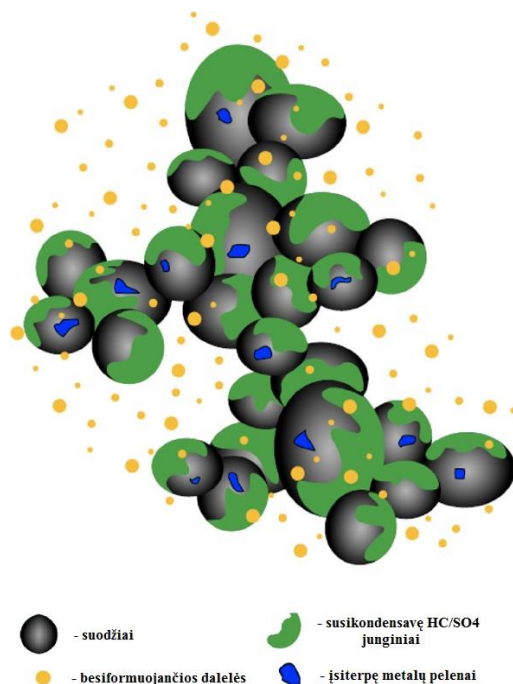
Motorinės transporto priemonės yra pagrindinis aerolinių anglies junginių, ypač smulkių dalelių (KD <2,5 μm) šaltinis. Pavyzdžiui dyzelinio sunkiasvorio variklio išmetamų kietųjų dalelių net 41 % sudaro elementinė anglis, nepilno degimo produktai ir kiti junginiai panašią dalį (žr. 1 pav.). Dalelės susidaro degimo proceso metu, garui vėstant ir kondensuojantis išmetimo linijoje. KD emisijos iš auto transporto priklauso nuo variklio tipo, amžiaus ir priežiūros. Dyzelinių variklių KD emisijos yra 4 kartus didesnės nei benzininių [11]. Pagrindė tai lemia netoks švarus kuras ir katalitinio išmetamųjų dujų valymo nebuvimas. Benzininių variklių išmetimuose yra daugiau organinės anglies, tuo tarpu dyzelinių – elementinės. PAH junginių emisijos lyginant variklius, yra didesnės benzininių variklių. Nors ir transporto išmetamųjų teršalų emisijos mažėja dėl technologijų vystymosi, tačiau transporto sektoriaus tarša vis dar yra labai opi problema.



1 pav. Sunkiasvorio dyzelinio variklio kietųjų dalelių sudėtis [18].

Bendrai, išmetamosios dalelės susideda iš grafitinės anglies t.y. suodžių. Išmetamųjų dujų KD sudarytos iš kintančio kiekio junginių, susidarančių kuro nepilno degimo metu, kurie susikondensuoja ant suodžių dalelių paviršiaus. 2 paveiksle yra pavaizduotos atskiestos ir ataušintos dyzelinių variklių kietosios dalelės. Šiame paveiksle pavaizduotos dviejų tipų dalelės (a) fraciniai aglomeratai pirminių dalelių 15 - 30 nm diametro. Šios dalelės sudarytos iš anglies ir metalų pelenų pėdsakų bei padengtos sunkesniais organiniais junginiais ir sulfatais; (b) besiformuojančios dalelės iš hidrokarbonatų ir sulfatų. Smulčiausios dalelės, kelių dešimtųjų nanometro diametro, susideda arba didžiąja dalimi sudarytos iš lakiųjų anglies junginių. Daugiau kaip 90 % bendros koncentracijos dyzelinių variklių išmetamųjų dujų yra iš nano dalelių <50 nm [14]. Autotransporto išmetamose dujose yra keletas

policiklinių aromatinių hidrokarbonatų, kaip benzo(e)pyrene, indeno(1,2,3-cd) pyrene, coronene ir benzo(ghi)perylene. PAH junginiai dažniausiai, mažiausios frakcijos ($<0,4 \mu\text{m}$) ir didelės molekulinės masės, aptinkami kietosios fazės. Santykis tarp metilfenantrinų / fenantrinų yra naudojamas įvertinti eismo įtaką PAH junginių koncentracijai supančiame ore. Reikia turėti omenyje, kad PAH junginiai gali reaguoti su atmosferoje esančiais chemikalais. Dėl to, kad šių junginių išmetimai labai skiriasi priklausomai nuo automobilio, yra labai sunku apibendrintai kalbėti apie PAH emisijas [11].



2 pav. Dyzelinių variklių išmetamųjų dalelių formavimasis [19].

Išmetamosiose dujose esančių dujinių ir kietųjų teršalų kiekiai yra žymiai sumažinami jas valant katalizatoriais ir dyzelio degimo metu sudarančių dalelių filtrais. Automobilių emisijos yra bandymais nustatomos trimis būdais: kelyje, tunelyje arba dinamometriniais matavimais. Paskutinis metodas reikalauja skiedimo sistemos, kuria mėginama atkartoti supančios aplinkos teršalų koncentracijas. Šios sistemos privalumas yra galimybė kontroliuoti tiriamo automobilio tipą, jo krovinį. Šiuo metodu nustatyta, kad didelė frakcija pusiau lakių dyzelinių KD yra mažesnė nei 50 nm, o nelakioji frakcija paprastai 50 - 200 nm [20].

Standartinis metodas tirti vidaus degimo variklių išmetamųjų dalelių sudėtį yra autonominė cheminė analizė. Tokia analizė atliekama šiais pagrindiniais etapais:

1. Pasiruošimas substratų surinkimui;
2. Išmetamųjų dujų iš automobilių mėginių paėmimas;
3. Kietųjų dalelių ekstrakcija iš substratų;

4. Cheminė analizė išgautų medžiagų.

Antrojo žingsnio aspektai yra specifiniai priklausomai nuo automobilio variklio. Tuo tarpu kiti trys žingsniai yra pagal analizinės chemijos standartus [19].

1.2. Kelių transporto sektoriuje susidarančių KD tyrimo būdai

Daug kelių dulkių emisijų matavimo modelių turi empirinius parametrus ir emisijų faktorius, kurie yra specifiniai tam tikroms vietovėms ar keliams, tam tikromis sąlygomis. Šiems modeliams trūksta įvairių faktorių priklausomybės, kaip automobilio greitis, naudojamų padangų tipas, pakartotinas dalelių išmetimas į orą, kelio bei automobilio tipas. Iš esmės, tokie modeliai teisingai neapibūdina dinaminio jautrumo, t.y. priklausomybės emisijų pokyčio dėl išorinių parametru. Todėl šie modeliai negali būti naudojami jautrumo analizėms susijusiomis su KD koncentracijų mažinimo strategijomis, kaip greičio mažinimas ir dygliuotų padangų naudojimas, ar oro kokybės valdymu. Norint viso to pasiekti reikia bendresnės modelio sistemos, kuri galėtų fiksuoti išorinių parametru tiesiogiai susijusią priklausomybę su KD emisijomis [5].

Automobilių emisijų matavimams yra du pagrindiniai metodai: dinamometro tyrimai ir realaus pasaulio kelių eismo tyrimai. Abu metodai turi savo privalumų ir trūkumų. Emisijų faktorius tam tikro variklio gali būti nustatomas naudojant dinamometrą, tačiau dinamometras negali atvaizduoti emisijų viso automobilių parko su skirtingais automobilių kilometražais, variklio pajėgumais bei skirtingu amžiumi. Be to automobilių kietųjų dalelių emisijos realiomis sąlygomis yra skirtingų procesų mišinys, t.y. kuro degimo produktai, stabdžių kaladėlių, guolių, padangų, kelių konstrukcijų susidėvėjimo produktai bei pakartotinis kelių dulkių išmetimas į orą.

Standartiniai dinamometro matavimai nematuoja ne išmetamųjų dujų emisijų ir negali patikimai atvaizduoti realiomis sąlygomis susidarančių emisijų. Tačiau individualių mašinų matavimai dinamometru vis dar yra standartiniai daugelyje šalių. Dėl įvairių pašalinių veiksnių susidaro matavimų dinamometru neužtikrintumas ir tampa sudėtinga gautus duomenis sujungti siekiant sudaryti emisijų modelį. Negana to, tyrimai dinamometru yra brangūs palyginus su kelkraščio ar tunelio tyrimais.

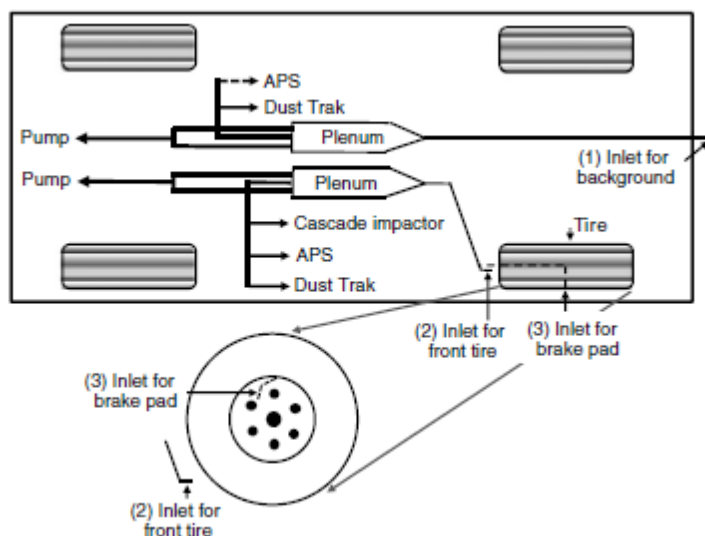
Kelių eismo emisijų duomenys yra surenkami atliekant realaus pasaulio kelių eismo tyrimus: kelkraščių bei tunelių bandymais. Šie tyrimai nustato didelio kiekio automobilių vidutinės emisijas ir atvaizduoja eismo srauto KD emisijas realiomis eismo sąlygomis, tačiau vis tiek nėra lengva gautus duomenis apibendrinti kitoms eismo sąlygoms [21].

1.2.1. Dalelių analizavimas mobiliais automobiliais

Realiomis sąlygomis automobilio, o ne išmetamųjų dujų KD kiekių nustatymui yra naudojamos mobilios laboratorijos – automobiliai, kuriuose sumontuota reikalinga įranga. Šis metodas yra pranašesnis už kelių simulatorius kai norima išmatuoti vieno automobilio sudaromas absoliučias ne išmetamųjų dujų KD koncentracijas. Tačiau vieno automobilio matavimų negalima tiesiogiai pritaikyti visam automobilių eismui, nes automobilių parką sudaro labai įvairūs automobiliai.

Ne išmetamųjų dujų kietųjų dalelių tyrimo su automobiliu pavyzdinė schema pateikiama 3 paveiksle. Mėginių paėmimo vamzdeliai sumontuojami automobilio priekyje, prie priekinio buferio, arti padangos / kelio sąlyčio vietos ir arti stabdžių. Automobilio priekyje esantis dalelių matavimui vamzdelis skirtas nustatyti foninę koncentraciją. Prie padangos ir kelio sąlyčio vietos esantis mėginių vamzdelis skirtas matuoti KD išskiriamas į orą nuo padangos, tai gali būti padangos, kelio paviršiaus susidėvėjimo dalelės, kelio dulkės ar atmosferinės nuosėdos. Prie stabdžių esančiu vamzdeliu matuojamos dalelės susidaranti stabdymo metu ir galbūt patenkančios kitos medžiagos pakilusios į orą nuo padangos – kelio sąlyčio vietos stabdymo proceso metu. Bandyminiai oro mėginiai yra siurbiami siurbliukais, mėginių ėmimo greitis palaikomas toks, kad būtų laminarinis judėjimas. Dalelių koncentracijų matavimai atliekami atskirais matavimo prietaisais.

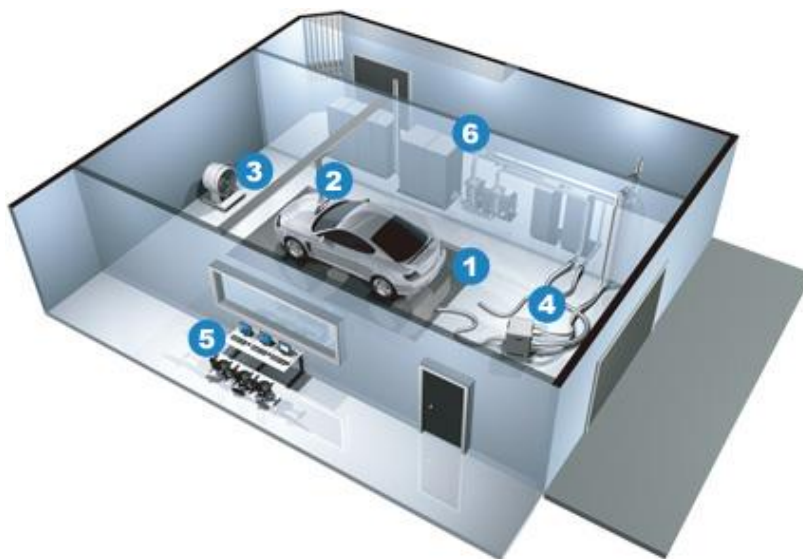
Kietųjų dalelių susidarymą didinantys faktoriai yra didesnis automobilio greitis, naudojamos dygliuotos padangos, spyglių masė bei jų kiekis padangoje. Taip pat nustatyti vairavimo faktoriai, kurie labai veikia KD susidarymą, yra agresyvus vairavimas, staigus stabdymas bei važiavimas posūkiuose[10, 16, 22].



3 pav. Mobilios KD koncentracijų tyrimo įrangos schema [10].

1.2.2. Dinamometriniai matavimai

Didelė variklių išmetamųjų dujų temperatūra 150 - 300 °C ir potencialas vandens kondensacijai dujoms vėstant yra pagrindinės priežastys dėl kurių reglamentuojantys protokolai nurodo KD emisijas matuoti panaudojant skiedimo tunelius [19]. Fizinės ir cheminės išmetamųjų dujų aerozolių dalelių savybės nuolat keičiasi po jų susiformavimo, iš pradžių išmetimo sistemoje ir vėliau patekusios į atmosferą. Gana greitas savybių keitimasis atsiranda kai išmetamosios dujos išsiskiria iš išmetamojo vamzdžio ir staiga yra atskiedžiamos bei atvėsinamos aplinkos ore (tai yra dar viena priežastis išmetamąsias dujas matuoti panaudojant skiedimo įrangą). Šis procesas yra geriausiai atkartojamas atliekant dinamometrinius matavimus laboratorinėmis sąlygomis maišant išmetamąsias dujas su švriu oru skiedimo tunelyje. Atliekant šiuos bandymus labai svarbu prižiūrėti skiedimo procesą, nes besikeičiant proceso sąlygoms gali labai kisti aerozolio dalelių savybės, kas tiesiogiai paveikia matavimus [23]. Važiuklės dinamometro įrenginys naudojamas lengvųjų transporto priemonių išmetamųjų teršalų analizei iliustruotas 4 pav.



4 pav. Automobilių emisijų matavimai panaudojant dinamometrą.

1. Važiuklės dinamometras;
2. Vairuotojo stebėjimo monitorius;
3. Oro srauto ventiliatorius;
4. Mėginių paėmimo ir perdavimo įranga;
5. Bandymo kontrolės patalpa;
6. Emisijų analizavimo įranga.

Įkaitinta žarnele išmetamosios dujos iš išmetamojo vamzdžio tiekiamos į skiedimo tunelį, kuris yra pavaizduotas išilgai šoninės sienelės bandymo kameroje. Skiedimui yra tiekiamas filtruotas, kontroliuojamos temperatūros ir drėgnumo oras. Išmetamosios dujos įleidžiamos į tunelį prieš diafragmą skatinant turbulentinį maišymąsi. Atliekant pastovų mėginių ėmimą, skiedimo santykis vidutiniškai yra palaikomas 20:1 (palyginant, aplinkoje skiedimo santykis būna 1000:1). Mėginių ėmimo vietos būna daugiau kaip 10 tunelio diametro atstumu, taip užtikrinant visišką dujų ir skiedimo oro susimaišymą. KD masės matavimas tradiciškai yra atliekamas paprasčiausiai tiekiant pastovų skiestų dujų srautą pro filtrus ir fiksuojant masių padidėjimą [19].

1.2.2.1. Stabdžių dinamometras

Stabdžių susidėvėjimo dalelių emisijų tyrimai stabdžių dinamometrais yra pagrįste koncentruoti į KD emisijas į aplinkos orą ir stabdžių sistemos susidėvėjimą pagal masę. Didelė dalis susidėvėjimo dalelių yra didelės ir atsiskyrusios nusėda ant kelio paviršiaus. Aplinkosauginiu aspektu šios dalelės yra toliau nagrinėjamos kaip patenkančios į nutekamuosius vandenis (stabdžių susidėvėjimo dalelėse yra daug vario) ir pakartotinai išmetamos į atmosferą. Taigi stabdžių dinamometro tyrimais galima matuoti 3 rūšių KD emisijas: nusėdančias ant kelio paviršiaus (nusėdančios kameros dugne tyrimo metu), nusėdančios ant stabdžių sistemos dalių bei patenkančios į orą [17].

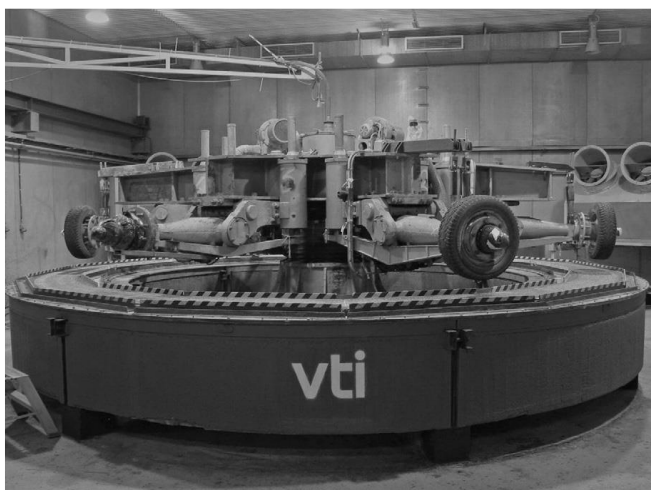
KD emisijų matavimo panaudojant stabdžių dinamometrą principas: ratas įtvirtinamas ant dinamometro, kurio pagalba imituojamos stabdymo sąlygos, o matavimo kamera yra sumontuojama aplink stabdžius. Įrengtoje tyrimo sistemoje yra naudojamas oro pūtėjas, kuriuo yra pučiamas pastovus oro srautas pro stabdžius į pastovaus matavimo tunelį.

1.2.3. Kelio simulatorius

Kelio simulatorius yra plačiai paplitęs ir efektyvus metodas matuoti dalelių koncentracijas ir dydžių pasiskirstymą esant padangos – kelio kontaktui. Kelio simulatorius yra naudojamas siekiant generuoti susidėvėjimo daleles padangų ir kelio dangos kontakto metu. Šis metodas gali būti taikomas norint palyginti skirtingų padangų (t.y. palyginti dygliuotas padangas su trinties padangomis ar palyginti skirtingų gamintojų padangas) arba kelio paviršiaus įtaką dalelių susidarymui. Kadangi bandymams atlikti sudaryta sistema yra uždara, dalelių mėginių paėmimas yra labai mažai teršiamas supančios aplinkos ir nedaro įtakos išmetamųjų dujų emisijoms. Atliekant kruopštų valymą visos simulatoriaus sistemos prieš kiekvieną bandymą, galima maksimaliai sumažinti pakartotino dulkių išmetimo į orą galimybę.

Simulatorius sudarytas iš ratų, kurie sukasi aplink trasą. Kiekvienas ratas yra varomas elektriniu motoru reguliuojant greitį. Simulatoriaus trasa gali būti padengiama bet kokia danga bei žinoma įvairios padangos gali būti sumontuojamos ant ašių. Patalpoje įmontuojama mėginių paėmimo įranga ir reguliuojant sukimosi greitį tiriamas dalelių susidarymas dėl padangų ir kelio dangos susidėvėjimo. Simulatoriaus pavyzdys yra žemiau pateikiamas 5 paveiksle.

Reikia nepamiršti, kad laboratorijos sąlygos simulatoriuje negali būti tiesiogiai lyginamos su realiomis sąlygomis kalbant apie absoliučias koncentracijas. Tokioje sistemoje galima atlikti palyginamuosius padangų, kelio dangų, greičio įtakos dalelių susidarymui bandymus bei atlikti pačių susidarančių dalelių mėginių analizę. Iš gautų tyrimų rezultatų galima išgauti svarbios informacijos apie dulkių formavimąsi bei šį procesą sąlygojančius faktorius [8, 16].



5 pav. Transporto tyrimų instituto kelio simulatorius [8].

1.2.4. Dalelių matavimas tuneliuose

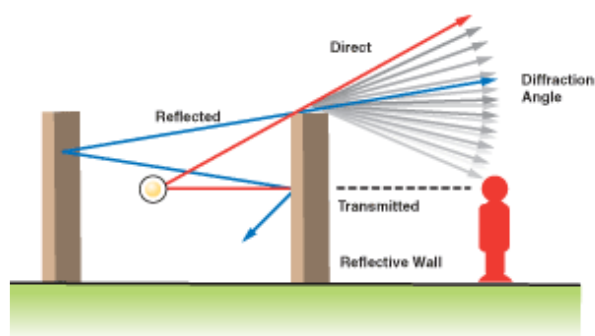
Tiriant kietųjų dalelių koncentracijas tuneliuose yra naudojamos kelios bandinių paėmimo vietos. Dažniausiai pasirenkamos vietos yra tunelio vidurys, tunelio pradžia ir išorėje, šalia tunelio. Kelios matavimų vietos naudojamos siekiant tiksliau įvertinti koncentracijų susidarymą. Vėjo judėjimas tuneliuose yra komplikotas. Jis yra sąlygojamas tunelio formos, eismo sąlygų, ventiliacijos sistemos ir aplinkos sąlygų. Atliekant bandymus taip pat yra matuojamas vėjo greitis, temperatūra ir drėgmė. Principe visų auto transporto generuojamų kietųjų dalelių analizavimo metodų mėginių paėmimo bei analizo įranga yra labai panaši. Ne išimtis yra ir KD matavimas tuneliuose [21, 24].

1.3. Akustinės sienelės

Nenumaldomai augančios pramonės kontekste, nuolatos didėjančios miesto zonos bei transporto sektoriaus vystymasis lėmė dviejų, vienu iš rimčiausių problemų mūsų visuomenėje atsiradimą. Tai yra oro užterštumas ir triukšmo tarša. Oro užterštumo susidarančio transporto sektoriuje problemą stengiamasi lokalizuoti įvairiais apribojimais ir naujais technologiniais sprendimais. Tuo tarpu kovos su triukšmo tarša pagrindinė priemonė yra akustinės sienelės, kuriomis yra ribojamas triukšmo sklidimo iki gavėjo kelias.

Aplinkos triukšmas yra laikomas rimta problema socialiniu, aplinkosauginiu ir visuomenės sveikatos aspektais. Šiuo metu yra trys inžineriniai sprendimai siekiant sumažinti transporto sukeltą triukšmą: sumažinti susidarančių garso bangų galią, apsaugoti garso gavėją nuo garso bangų ir trukdyti skliti garso bangoms modifikuojant garso bangų sklidimo kelią. Siekiant įgyvendinti trečią metodą, plačiai yra naudojamos akustinės sienelės. Jos įrengiamos tarp triukšmo susidarymo šaltinio (transporto srauto) ir gavėjo (gyvenvietės), taip užkertant kelią tiesioginiam garso bangų sklidimui. Akustinės sienelės yra rentabilus būdas apriboti triukšmo taršą. Jos plačiai naudojamos visuomenėje, priklausomai nuo sudėties, kaip garsą absorbuojantys arba atspindintys elementai [25].

Akustinės sienelės yra efektyviausios vidutinio ir aukšto dažnio garso bangoms slopinti. Triukšmo sumažinimas akustinėmis sienelėmis yra ribotas, tačiau jį galima optimizuoti įrengiant patobulinimus ir taip pasiekti pakankamą nepageidaujamo garso sumažinimą. Akustinių sienelių aukščio ir ilgio santykis yra apibrėžtas taip, kad esant minimaliems matmenims sienelė turi bent blokuoti garso bangų tiesioginį sklidimo kelią tarp šaltinio ir gavėjo. Garso bangos kurios atsimušusios į sienelę keliauja pro šonus ar per viršų bei bangos atsispindinčios nuo priešais esančių sienelių ar pastatų ženkliai daro įtaką triukšmo kiekiui. Žemiau pateiktame paveiksle pavaizduota kaip garso bangos pasiekia triukšmo gavėją [26].



6 pav. Triukšmo bangų sklidimas per akustines sieneles [26].

Akustinės sienelės naudojamos miestuose ir priemiesčiuose dažniausiai yra nuo 2 iki 3 m aukščio. Tokiu aukščiu galima pasiekti triukšmo sumažinimą apie 10 dBA. Norint pasiekti didesnę triukšmo sumažinimą, tarkim 15 dBA yra labai sudėtinga, o 20 dBA praktiškai neįmanoma. Pasiekti didesnę triukšmo sumažinimą reikia ženkliai didinti sienelių aukštį (norint pasiekti 15 dBA sumažinimą sienelių aukštis turėtų būti 8 m). Tačiau didinant sienelių aukštį eksponentiškai didėja jų kaina [27].

Akustinių sienelių efektyvumą galima pagerinti, nedidinant jų aukščio, tam buvo sukurtos sienelių modifikacijos. Modifikacijos remiasi dvejomis pagrindinėmis idėjomis. Pirma idėja yra sienelių formos pakeitimas. Pagrindiniai pakeitimai yra sienelių suformavimas T, Y, pakrypusio viršaus formos. Antra idėja remiasi nuslopiniu garso slėgio padengiant sienelės garsą absorbuojančia medžiaga. Absorbuojanti medžiaga pagerina sienelės efektyvumą, nes medžiagos sumažintas garso slėgis lemia mažesnę garso bangų išsklaidymą (difrakciją) už sienelės ir atspindėjimą nuo sienelės [28].

1.3.1. Inovatyvūs akustinių sienelių modeliai

Akustinės sienelės efektyviai mažina triukšmo lygį, tačiau dažnai sukelia nepageidaujamus antrinius rezultatus, kaip apribotas matomumas nuo kelių, užblokuojamas gražus, vaizdingas kraštovaizdis bei susidaro dideli šešėliai, kurie krenta gyvenamuose rajonuose užstojant saulės šviesą. Didinimas sienelių aukščio siekiant pagerinti triukšmo sumažinimą šiuos antrinius poveikius tik paūmina. Be to naudos – kainos santykis smarkiai kyla nuo 4 m sienelės aukščio.

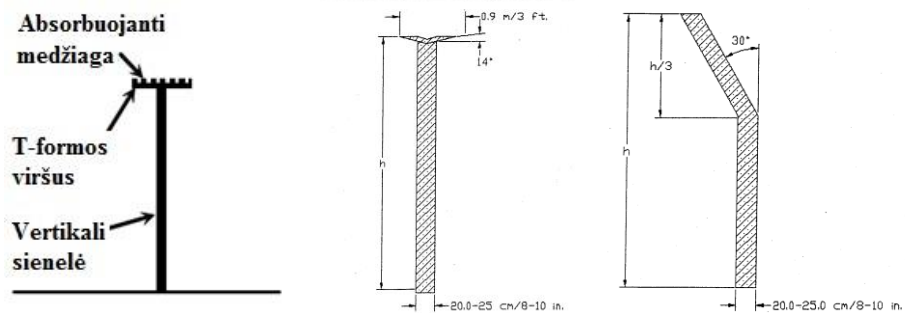
Populiariausios ir efektyviausios naudojamos modifikacijos yra T, Y bei palinkusios formos sienelių viršus ir triukšmą absorbuojantys paviršiai. Šie akustinių sienelių patobulinimai sumažina triukšmo lygį, tuo pačiu galima sumažinti sienelės aukštį pasiekiant ekonominės naudos. Mažesnės sienelės taip pat yra estetiškai patrauklesnės ir priimtinesnės visuomenei, nes jos užstoja mažiau saulės, kraštovaizdžio ir mažiau paveikia natūralius oro ventiliacijos srautus.

Akustinių sienelių pakeitimų veikimo principas yra garso bangų absorbavimas arba pakeitimas difrakcijos kampo kai bangos eina pro sienelių viršų. Gaunamas rezultatas šiomis technologijomis yra sumažinamas triukšmo lygis išvengiant antrinių, nepageidaujamų pasekmių atsirandančių esant aukštomis sienelėms.

Akustinių sienelių statymo tikslas yra pasiekti kuo didesnę triukšmo sumažinimą minimalia kaina. Sienelių aukščio sumažinimas lemia kainos mažėjimą, tačiau statant akustines sienelės reikia atsižvelgti į tokius aspektus kaip sienelės dizainas, statymo (medžiagų ir konstrukcijos kaina) ir eksploataavimo reikalavimus. Statant sienelės taip pat reikia atsižvelgti į aplinkos sąlygas, kad sienelė būtų patvari, lengvai taisoma ir nereikalaujanti daug priežiūros. Dėl to, kad akustinės sienelės yra

dažnai statomos atvirose vietose jos turi atlaikyti dideles vėjo apkrovas. Atsižvelgiant į vėjo sukeliama apkrovą reikia parinkti tinkamo tvirtumo polius. Taip pat sienelėms yra reikalingi metaliniai sutvirtinimai, kad sugertų apkrovas, įtempimus sienelėms svyruojant į šonus. Todėl įrenginėjant akustines sienes yra taip pat būtina atsižvelgti į geografinę padėtį. Pavyzdžiui pajūryje vyrauja stipresni vėjai nei žemyne, gali kilti stiprios audros, viesulai, todėl yra privaloma įvertinti galimas vėjo apkrovas.

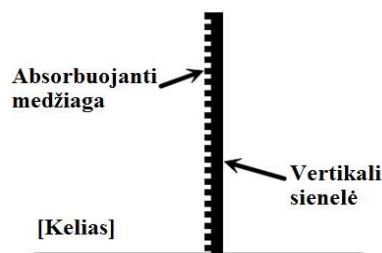
Šios technologijos taip pat gali būti panaudotos pagerinti esančių akustinių sienelių triukšmo sumažinimo savybes. Įdiegiant patobulinimus nereikia statyti naujų aukštesnių sienelių, todėl šis sprendimas yra finansiškai patrauklesnis [29, 30].



7 pav. Pirmame iš kairės modelyje pavaizduota T formos akustinė sienelė, antrame – Y formos ir trečiame – palinkusios formos [30].

1.3.1.1. Garsą absorbuojančios sienelės

Akustinės sienelės su absorbuojančiomis garsą medžiagomis yra vertikalios konstrukcijos kur medžiaga yra transporto srauto pusėje (žr. 8 pav.). Šios sienelės mažina triukšmą absorbuodamos garso bangas ir pašalinant atsispindinčias nuo sienelių paviršiaus bangas. Šios akustinės sienelės lyginant su tradicinėmis leidžia sumažinti triukšmą 4 dBA ir tuo pačiu galima sumažinti sienelių aukštį 0,6 – 1,5 m [29].



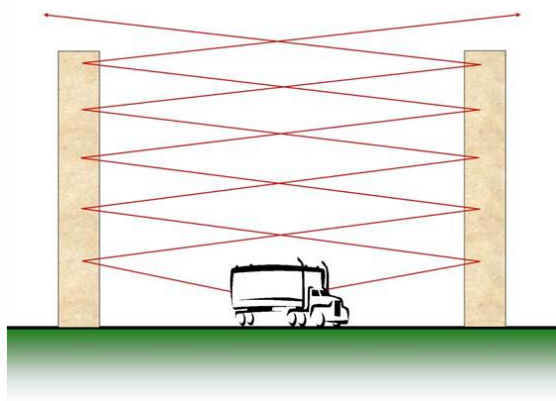
8 pav. Garsą absorbuojanti akustinė sienelė [30].

Pagrindinės akustinės absorbuojančios medžiagos naudojamos sienelėse yra pluoštinės medžiagos kaip stiklo pluoštas ir mineralinė vilna. Šios medžiagos yra naudojamos, nes jos išlaiko savo formą, patvarios, sulijusios išdžiūsta. Sienelė turi būti suprojektuota taip, kad lyjant patenkantis vanduo į sienelės vidų būtų nesulaikomas ir galėtų ištekėti [26].

1.3.2. Palyginimas įprastų akustinių sienelių su absorbuojančiomis

Nuolatos vyksta energingos diskusijos apie skirtumus absorbuojančių ir atspindinčių garsą sienelių ir kurios yra tinkamiausios įvairiose vietovėse [26].

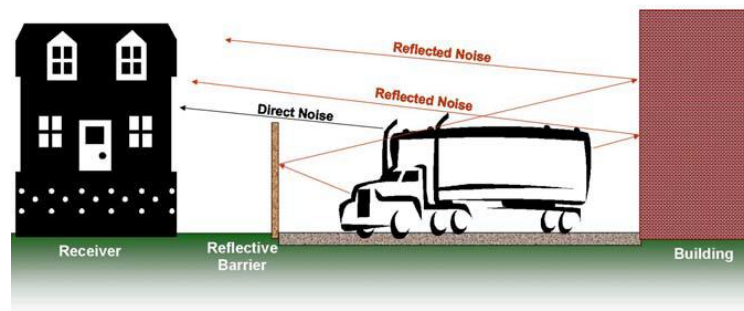
Barjerai be jokio absorbuojančio dizaino kaip blokai, mūrai, mediniai ar metaliniai yra triukšmą atspindintys. Tai reiškia, kad automobilių keliuose sukeliama eismo triukšmo bangos atšoka nuo vienos kelio pusės į kitą. Kadangi akustinės sienelės yra abiejose kelio pusėse, tai nuolatos atsispindintis garsas tarp sienelių sukelia aidą ir susidaro triukšmo tunelis (žr. 9 pav.). Šis susidarantis triukšmo tunelis padidina triukšmo lygį pasiekiantį aplinkines gyvenvietes. Tokioje pačioje situacijoje naudojant triukšmą absorbuojančias sienelės yra pašalinamas garso atsispindėjimas ir išvengiama triukšmo tunelio susidarymo. Tyrėjai nagrinėję garso tunelio susidarymą ir naudojimą garsą absorbuojančių sienelių tokiose situacijose nustatė, kad triukšmo skirtumas tarp tradicinių sienelių susidarant garso tuneliui ir absorbuojančių sienelių gali būti iki 5 dBA [26, 31, 32].



9 pav. Triukšmo tunelių susidarymas atspindint garso bangų nuo sienelių [26].

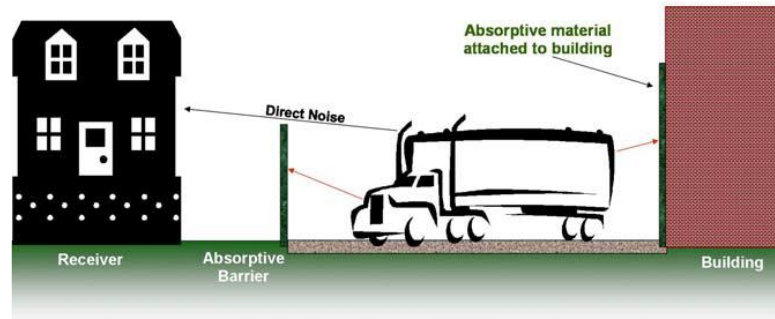
Transporto sukeliama garso atsispindėjimas nuo paviršių yra aktualus ir gyvenvietėse. Akustinės sienelės yra statomos ir miestų zonose kur eismas nėra toks intensyvus. Pavyzdžiui akustinė sienelė yra pastatoma gyvenvietėje tarp namų ir prekybos centro. Privažiavimai už prekybos centro yra naudojami prekėms pristatyti sunkvežimiais. Sunkiasvorių transporto priemonių sklindantis garsas yra kurkas stipresnis nei lengvojo transporto. Garsas sklindantis iš variklio ir veikiančios pavaros sunkvežimiui judant aikštelėje atsispindi nuo sunkvežimio šonų, priekabos,

pastatų ir akustinės sienelės (žr. 10 pav.). Taip susidaro pasikartojantys garso atspindžiai, todėl didėja triukšmo lygis ir garso šaltinio efektyvus aukštis.



10 pav. Triukšmo bangų sklidimas gyvenviečių aplinkoje tarp pastatų [26].

Garso atspindėjimas yra kritinis faktorius kai transporto priemonė ir akustinė sienelė yra panašaus aukščio. Triukšmo lygis pasiekiantis gavėję gali lengvai padidėti 3 ar 5 dB. Dėl to, kad triukšmo šaltinis yra labai aukštai įrengiant tradicinę akustinę sienelę vietoj planuotų 10 dB triukšmo sumažinimo yra pasiekiami vos 5 – 7 dB. Tokiose situacijose panaudojimas absorbuojančių medžiagų leidžia pasiekti norimo rezultato (žr. 11 pav.).



11 pav. Absorbuojančių medžiagų panaudojimas mažinant triukšmo lygį gyvenvietėse [26].

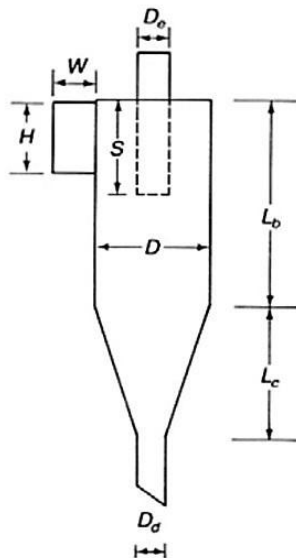
1.4. Ciklonai

Ciklonai – tai pramonėje naudojami įrenginiai kietosioms dalelėms iš oro srauto sugaudymui. Šių įrenginių veikimo principas grindžiamas išcentrinių jėgų veikimu. Kietosios dalelės iki 10 mikrometrų (pavojingiausios žmogaus organizmui, nes gali patekti į kūną pro kvėpavimo takus) yra pakankamai lengvos, kad patekusios į atmosferą būtų pernešamos su oro srautu. Tačiau dalelės patekusios į cikloną veikiamos išcentrinės jėgos yra atskiriamos nuo oro srauto. Taip atsitinka, nes sumažėjus dalelių kinetinei jėgai jos nebeišsilaiko oro sraute jam besisukant ir sudarant sūkurius. Todėl dalelės priglunda prie sienelių paviršiaus ir nusėda į ciklono dugną.

Platūs tyrimai buvo atlikti siekiant nustatyti kaip ciklono matmenys sąlygoja jų veikimą. Dviejuose klasikiniuose tyrimuose, kuriuos atliko Shepherd ir Lapple (1936, 1940) nustatyti optimalūs matmenys ciklonams. Visi išmatavimai susiję su ciklono korpuso diametru, kas leidžia rezultatus plačiai panaudoti. 1 lentelėje yra apibendrinamos trijų tipų klasikinių ciklonų matmenų proporcijos bei 12 pav. jos yra pavaizduojamos [33].

Lentelė 1. Klasikinių ciklonų proporcijos.

	Ciklono tipas					
	Aukšto efektyvumo		Standartiniai		Aukšto pralaidumo	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Korpuso diametras, D/D	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Įleidimo angos aukštis, H/D	0,5	0,44	0,5	0,5	0,75	0,8
Įleidimo angos plotis, W/D	0,2	0,21	0,25	0,25	0,375	0,35
Oro išėjimo angos diametras, D_e/D	0,5	0,4	0,5	0,5	0,75	0,75
Ilgis oro išleidimo angos, S/D	0,5	0,5	0,625	0,6	0,875	0,85
Korpuso ilgis, L_b/D	1,5	1,4	2,0	1,75	1,5	1,7
Kūgio ilgis, L_c/D	2,5	2,5	2,0	2,0	2,5	2,0
Dulkių išleidimo angos diametras, D_d/D	0,375	0,4	0,25	0,4	0,375	0,4



12 pav. Išmatavimai klasikinio ciklono.

1.5. SolidWorks Flow Simulation

SolidWorks Flow Simulation (srauto modeliavimas) pasižymi aukšto lygio funkcionalumu ir tikslumu bei paprastumu naudotis. Ši programinė įranga yra puiki inžinieriams, kurie nėra skysčių ar dujų srautų ekspertai, tačiau jiems yra reikalinga analizuoti srautus. Flow Simulation suteikia produktų inžinieriams prieigą prie didžiulio analizės pajėgumo kas įgalina juos paspartinti produktų naujoves.

Naudojant šį modeliavimą galima analizuoti skysčių srautus aplink pasirinktą produktą siekiant nustatyti srauto greitį, slėgį ir šiluminį įžvalgumą. Naudojant šiluminius rezultatus terminio streso modeliavimuose galima nustatyti išsiplėtimo riziką bei išmatuoti tiriamo produkto reakciją į atsitiktinę vibraciją struktūrinės dinamikos analizėje. Atlikus analizę galima palyginti modeliavimo variantus siekiant priimti geresnius sprendimus kuriant produktus su puikomis eksploatacijos savybėmis. Skatinami inžinerinių tikslų produktų inžinieriai naudodami skysčių dinamikos skaičiavimus SolidWorks Flow Simulation platformoje, gali priimti techninius sprendimus inžinieriams tikslams pasiekti, lygiagrečiai pristatant naujus produktų dizainus ir geresnius efektyvumus. Su papildomais HVAC (heating, ventilating, and air conditioning, lt. šildymo, ventiliacijos ir oro kondicionavimas) ir elektroninio vėsavimo modeliais, srautų modeliavimas gali pasiūlyti detalias analizes.

Tipiniai uždaviniai nagrinėjami srautų modeliavimu:

- Slėgio kritimas vožtuve, norint nustatyti jo efektyvumą;
- Oro srautas namų ar biurų aplinkoje, siekiant apskaičiuoti šiluminius komforto veiksnius;
- Temperatūros pasiskirstymas elektroniniam komponentui apskaičiuoti elektroniniuose terminiuose modeliuose;
- Aerodinamikos modeliavimas, apskaičiuoti keliamąsias ir pasipriešinimo jėgas [34].

Bendrieji nustatymai srautų modeliavimui pateikiami žemiau esančioje 2 lentelėje.

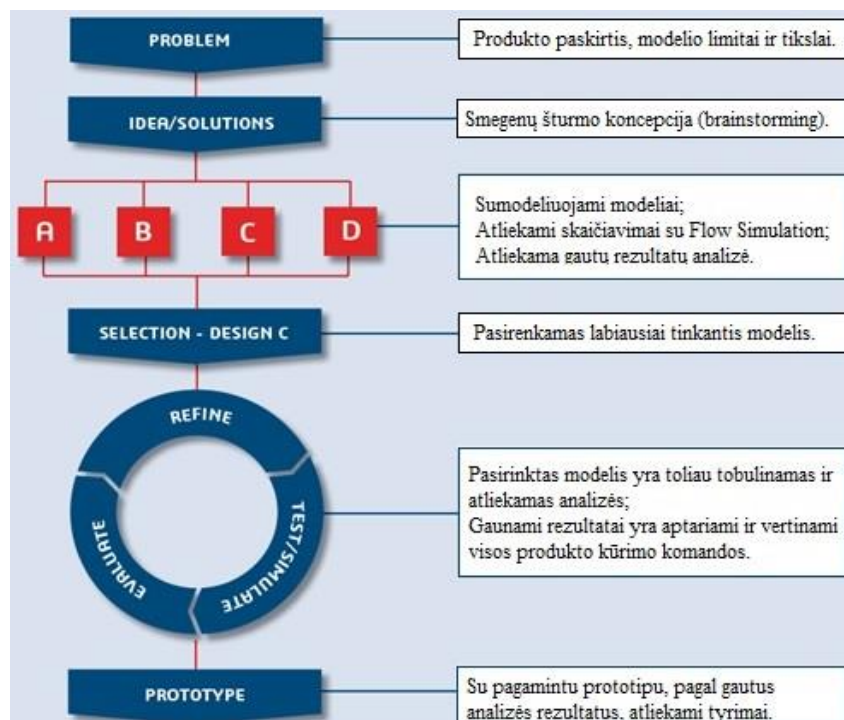
Lentelė 2. SolidWorks Flow Simulation bendrieji nustatymai [35].

Analizės tipas	Vidinė	Išorinė				
Fizinės savybės	Kietųjų medž. šilumos laidumas	Radiacija	Laiko priklausomybė	Sunkio jėga	Sukimasis	
Tiriamos terpės	Dujos	Skysčiai	Ne-Niutono skysčiai	Spūdieji skysčiai	Tikros dujos	Garai
Srauto tipai	Laminarinis	Laminarinis, turbulentinis	Turbulentinis			

2 lentelės tęsinys kitame puslapyje

Kietosios medž.	Lydiniai	Stiklai ir mineralai	Metalai	Neizotropinės medžiagos	Polimerai	Puslaidininkai
Sienų terminės sąlygos	Adiabatinės sienos	Šilumos srautas	Šilumos pernašos rodiklis	Temperatūra		
Termodinaminiai parametrai	Slėgis	Temperatūra	Tankis			
Greičio parametrai	Greitis X ašimi	Greitis Y ašimi	Greitis Z ašimi			
Turbulencijos parametrai	Turbulencijos intensyvumas	Turbulencijos ilgis	Turbulencijos energija	Turbulencijos išsklaidymas		

Produkto optimizavimui naudojamo srautų modeliavimo darbo eiga yra pavaizduota 13 pav. Iš pradžių nustatoma problema – produkto paskirtis, modelio limitai ir tikslai, tada yra sugalvojamos modelių koncepcijos. Kitas etapas yra sugalvotų modelių analizės: suprojektuojami modeliai, atliekami jų skaičiavimai naudojant Flow Simulation bei apibendrinami gauti rezultatai. Gavus simuliacijų išvadas galima pasirinkti optimaliausią dizainą ir pasirinktą modelį toliau tobulinti. Pasiekus norimus rezultatus SolidWorks programine įranga, paskutinis žingsnis yra pagal gautus duomenis atlikti kitus modeliavimus arba pagaminus prototipą atlikti praktinius tyrimus.



13 pav. Darbo naudojant SolidWorks Flow Simulation eiga [34].

1.6. Literatūros apžvalgos apibendrinimas

Oro užterštumas kietosiomis dalelėmis yra pagrindinė miestų aplinkos oro kokybės problema, nes Europos Sąjungoje net 72 % populiacijos gyvena miestų vietovėse. Pasaulio sveikatos organizacijos duomenimis dėl padidėjusių KD koncentracijų stebimas padidėjęs sergamumas kvėpavimo bei širdies ir kraujagyslių ligomis. Taip pat yra atlikti skaičiavimai, kad visos su sveikata susijusios išorinės išlaidos, kurios yra siejamos su oro tarša, 2010 metais siekė 330 – 940 milijardų EUR per metus bei Europos aplinkos agentūros duomenimis oro tarša yra siejama su 400 000 ankstyvų mirčių Europoje kiekvienais metais.

Kelių transporto sektorius yra vienas pagrindinių dalelių emisijų į aplinkos orą šaltinių. Kietųjų dalelių emisijas iš kelių transporto sudaro emisijos iš išmetamųjų vamzdžių ir emisijos iš automobilių susidėvėjusių dalių, tokių kaip stabdžiai, padangos, sankabos ir pakabos (tai yra ne vidaus degimo varikliuose susidarančios emisijos). Dalelės ne iš išmetamųjų dujų yra stambios (KD 2,5 – 10), o išmetamųjų dujų kietosios dalelės yra smulkios (KD < 2,5).

Automobilių emisijų matavimams yra du pagrindiniai metodai: dinamometro tyrimai ir realaus pasaulio kelių eismo tyrimai. Abu metodai turi savo privalumų ir trūkumų. Dinamometriniai matavimai naudingiausi yra tam tikro automobilio ar automobilio susidėvėjimo dalių emisijoms nustatyti, o tuo tarpu realaus pasaulio tyrimai naudojami apskaičiuoti bendro automobilių srauto dalelių emisijoms.

Taip pat atliekant literatūros šaltinių apžvalgą buvo aptarta viena iš konstrukcinių sienelių, su integruotais statybiniais blokeliais, panaudojimo galimybių - akustinės sienelės. Akustinės sienelės pagal medžiagas iš kurių jos yra pagamintos, gali būti skirstomos į dvi grupes: triukšmo bangas absorbuojančios arba atspindinčios. Taip pat akustinės sienelės gali būti skirstomos pagal jų konstrukciją, iš kurių populiariausia yra sudaroma iš akustinių bloku juos įtvirtinant konstrukcijomis.

2. METODOLOGINĖ DARBO DALIS

2.1. Modeliavimas panaudojant SolidWorks Flow Simulation programinę įrangą

SolidWorks Flow Simulation yra įrankis glaudžiai susietas su SolidWorks 3D CAD (computer aided design, lt. automatizuotas projektavimas kompiuteriu) galintis modeliuoti skysčių ir dujų srautus realaus pasaulio sąlygomis, atlikti scenarijų analizę ir efektyviai analizuoti skysčių srautų judėjimą bei šilumos pernašą [34].

2.1.1. Oro srautų modeliavimas ties sienele

Modeliavimo SolidWorks programine įranga tikslas – sumodeliuoti optimalų sienelės modelį pagal kurį būtų galima atlikti tolimesnius tyrimus.

Tikslui pasiekti srautų modeliavimui yra iškeliami tokie uždaviniai:

- Nustatyti optimalius parametrus sienelės analizei:
 - ❖ srauto šaltinio atstumas nuo sienelės;
 - ❖ sienelės aukštis;
 - ❖ oro srauto greitis.
- Gauti sienelės modelio išvesties duomenis:
 - ❖ jėgą susidarančią srauto judėjimo metu;
 - ❖ vidutinį srauto greitį;
 - ❖ srauto judėjimo link sienelės trajektorijas.

Modeliavimas atliekamas tokiais žingsniais:

1. Nustatome tyrimo tikslą bei uždavinius;
2. SolidWorks programoje nubraižomi sienelių modeliai;
3. Sukuriami Flow Simulation projektai oro srautams tirti;
4. Nustatomos projekto skaičiavimo ribos (boundaries);
5. Įvedami skaičiavimų tikslai;
6. Paleidžiamas projekto skaičiavimas;
7. Naudojant Cut Plots bei Flow Trajectories funkcijas vizualiai pateikiami modeliavimų rezultatai;
8. Klonojami modeliai bei projektai;
9. Palyginami gauti rezultatai ir daromos išvados.

2.1.2. Statybiniame blokelyje integruoto ciklono modeliavimas

Modeliavimo SolidWorks programine įranga tikslas – sumodeliuoti optimalų ciklono modelį, kurį būtų galima pagaminti panaudojant 3D spausdinimo technologiją ir atlikti aerolio dalelių sugaudymo tyrimus.

Tikslui pasiekti srautų modeliavimui yra iškeliami tokie uždaviniai:

- Nustatyti optimalius ciklono parametrus:
 - ❖ oro išleidimo angos ilgis;
 - ❖ oro išleidimo angos diametras;
 - ❖ oro išleidimo angos užsilenkimo spindulys;
 - ❖ viršutinio ciklono korpuso įleidžiamas ilgis į apatinį;
 - ❖ srauto ribotuvo diametras;
 - ❖ srauto ribotuvo aukštis.
- Nustatyti dalelių dydžio ir analizės sąlygų įtaką ciklono efektyvumui;
- Nustatyti srauto greičio įtaką ciklono efektyvumui.

Modeliavimas atliekamas tokiais žingsniais:

1. Nustatome tyrimo tikslą bei uždavinius;
2. SolidWorks programoje nubraižomi ciklonų modeliai;
3. Sukuriami Flow Simulation projektai oro srautams tirti;
4. Nustatomos projekto skaičiavimo ribos (boundaries);
5. Nustatomi srauto įleidimo ir išleidimo angų parametrai;
6. Įvedami skaičiavimų tikslai;
7. Paleidžiamas projekto skaičiavimas;
8. Panaudojant Particle Studies ir Flow Trajectories funkcijas analizuojamas KD srauto elgesys ciklonuose;
9. Klonuojami modeliai bei projektai;
10. Palyginami gauti rezultatai ir daromos išvados.

2.2. Kietųjų dalelių greičio oro sraute skaičiavimas

Sferinę dalelę veikiančią jėgą galima užrašyti:

$$F = -\frac{2 \cdot \pi \cdot d^3}{3} \text{grad}p + 3 \cdot \pi \cdot d \cdot \eta \cdot \left(v - \frac{dx}{dt} \right) + \frac{2 \cdot \pi \cdot d^3 \cdot \rho \cdot g}{3}; \quad (1)$$

čia: d – sferinės kietosios dalelės skersmuo, μm ;

v – oro srauto greitis, m/s ;

η – dinaminis oro klampumo koeficientas;

ρ – kietosios dalelės tankis, kg/m^3 .

arba

$$F = F_1 + F_2 + F_3; \quad (2)$$

čia: F_1 – transporto srauto sukelta akustinė banga, N ;

F_2 – jėga, lemianti Stokso judėjimą (oro gūsis, vėjas ir pan.), N ;

F_3 – gravitacinė jėga, N .

Sferinę dalelę veikianti Stokso jėga:

$$F_D = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot V_\infty \cdot d; \quad (3)$$

čia: V_∞ – oro srauto greitis, m/s ;

μ – oro dinaminė klampa, $\text{Pa}\cdot\text{s}$.

Dalelių, kurių $d \leq 1\mu\text{m}$, ribinis greitis oro sraute:

$$V_t = \frac{F}{3 \cdot \pi \cdot d \cdot \mu}; \quad (4)$$

Dalelių, kurių $d \geq 1\mu\text{m}$, ribinis greitis oro sraute [36]:

$$V_t = \frac{2 \cdot \mu}{\rho \cdot d} \left(\sqrt{9 + \frac{\rho \cdot F}{\pi \cdot \mu^2}} - 3 \right); \quad (5)$$

2.3. Teoriniai ciklono efektyvumo skaičiavimai

Efektyvių apsisukimų ciklone skaičius:

$$N_e = \frac{1}{H} \left[L_b + \frac{L_c}{2} \right]; \quad (6)$$

čia: H – įleidimo angos aukštis, m;

L_b – korpuso ilgis, m;

L_c – kūgio ilgis, m.

Diametras dalelių, kurios yra nusodinamos 50 % efektyvumu:

$$d_{pc} = \left[\frac{9 \cdot \mu \cdot W}{2 \cdot \pi \cdot N_e \cdot V_i \cdot (\rho_p - \rho_g)} \right]^{1/2}; \quad (7)$$

čia: μ – dujų dinaminė klampa, kg/m³;

W – įleidimo angos plotis, m;

V_i – dujų įleidimo greitis, m/s;

ρ_p – kietosios dalelės tankis, kg/m³;

ρ_g – dujų tankis, kg/m³.

Dujų įleidimo greitis:

$$V_i = \frac{Q}{H \cdot W}; \quad (8)$$

čia: Q – dujų srauto debitas, m³/min.

Dalelių nusodinimo efektyvumas j dydžio dalelėms:

$$\eta_j = \frac{1}{1 + (d_{pc} / \bar{d}_{pj})^2}; \quad (9)$$

čia: Q – dujų srauto debitas, m³/min.

Shepherd ir Lapple slėgio nuostolių formulė:

$$H_v = K \frac{H \cdot E}{D_e^2}; \quad (10)$$

čia: K – konstanta priklausanti nuo ciklono konfigūracijos ir veikimo sąlygų, 12-18.

Statinio slėgio nuostoliai:

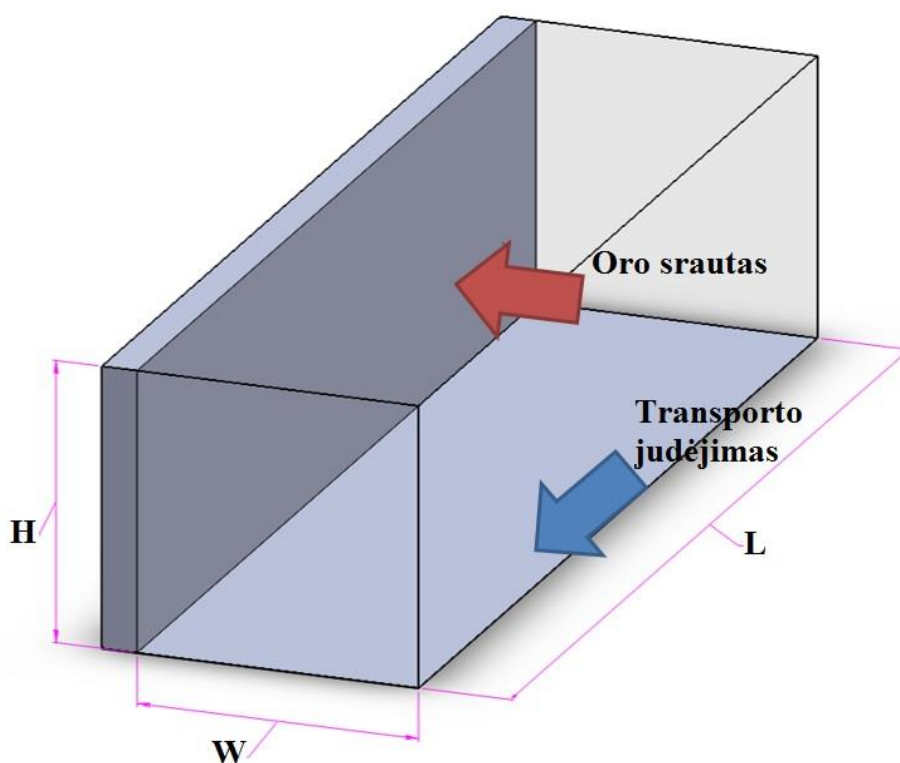
$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_g \cdot V_i^2 \cdot H_v; \quad (11)$$

3. REZULTATAI

3.1. Modeliavimas panaudojant SolidWorks Flow Simulation programinę įrangą

3.1.1. Oro srautų modeliavimas ties sienele

Žemiau esančiame paveiksle yra pavaizduotas modeliuojamos sienelės maketas. Raudona rodyklė rodo oro srauto judėjimo kryptį statmeną sienelei, o mėlyna rodo transporto judėjimo kryptį lygiagrečią sienelei. L raide žymimas sienelės modelio ilgis, W - plotis, H - aukštis.



14 pav. Sudaryto sienelės modelio vaizdas iš šono.

3.1.1.1. Atstumo iki sienelės įtaka oro srauto formavimuisi

Įvertinti srauto šaltinio atstumo nuo akustinės sienelės įtaką srauto judėjimui buvo sumodeliuotos 4 situacijos. Pasirinkus pastovų sienelės aukštį - 4 m, ilgį - 15 m ir pastovų oro srauto greitį – 6 m/s, buvo keičiamas oro srauto šaltinio atstumas (3, 4, 5 bei 6 metrai). Modeliavimo rezultatai pateikiami Priede Nr. 1.

Iš gautų rezultatų galima išvėlgti tokias tendencijas, kad didėjant atstumui nuo sienelės mažėja vidutinis srauto greitis ir maksimalus srauto greitis (žr. 3 lentelę). Taip pat iš grafikų matyti (žr.

Priedas Nr. 1), kad nuo 5 m atstumo oro srauto judėjimas sienelės apačioje iš laminarinio pereina į turbulentinį (susidaro oro sūkurių, kurie tik didėja didinant srauto šaltinio atstumą).

Lentelė 3. Srauto šaltinio atstumo nuo sienelės įtaka srauto judėjimui.

<i>Atstumas nuo sienelės, m</i>	<i>Minimalus srauto greitis, m/s</i>	<i>Vidutinis srauto greitis, m/s</i>	<i>Maksimalus srauto greitis, m/s</i>
3	0	6,055	11,72
4	0	5,426	9,276
5	0	5,181	8,098
6	0	8,098	7,798

3.1.1.2. Sienelės aukščio įtaka oro srauto formavimuisi

Siekiant įvertinti sienelės aukščio įtaką oro srauto judėjimui buvo nagrinėjami 3 scenarijai įvedant tokias konstantas: 5 metrų atstumas nuo sienelės, 15 m sienelės ilgis ir 6 m/s oro srauto greitis. Tiriama sienelės aukščiai buvo 3, 4 ir 5 metrai.

Gauti rezultatai akivaizdžiai parodo jog sienelės aukštis sąlygoja oro srauto judėjimą: nors ir didinant sienelės aukštį didėja vidutiniai ir maksimalūs greičiai (žr. 4 lentelę), tačiau mažėja srauto greitis prie pat sienelės bei susidaro mažiau oro sūkurių (žr. Priedas Nr. 2).

Miestuose ar priemiesčiuose statomų sienelių aukštis dažniausiai būna iki 4 metrų, nes didinant sienelių aukštį eksponentiškai didėja jų kaina [27]. Be to naudos – kainos santykis smarkiai kyla nuo 4 m sienelės aukščio [30].

Lentelė 4. Sienelės aukščio įtaka oro srauto judėjimui.

<i>Sienelės aukštis, m</i>	<i>Minimalus srauto greitis, m/s</i>	<i>Vidutinis srauto greitis, m/s</i>	<i>Maksimalus srauto greitis, m/s</i>
3	0	4,985	8,089
4	0	5,180	8,102
5	0	5,385	8,94

3.1.1.3. Tėkmės greičio įtaka oro srauto formavimuisi

Siekiant įvertinti oro srauto greičio daromą poveikį srauto judėjimui buvo modeliuojamos situacijos keičiant srauto greitį x ašimi nuo lengvo 3 m/s (kūno paviršius jaučia vėją, juda medžių lapai, jūroje matosi nelūžtančios bangelės) iki beveik audros 15 m/s (visi medžiai juda, reikia pastangų eiti prieš vėją, jūros putas pradeda sliuogti nuo bangų keterų). Atliekant šią analizę

pasirinktos konstantos: sienelės aukštis – 4 m, atstumas nuo sienelės – 4 m. Iš gautų rezultatų matome, kad srauto greitis nežymiai keičia oro judėjimo trajektoriją (žr. Priedas Nr. 3).

6 m/s oro greitis pagal Boforto skalę vadinamas vidutiniu. Esant tokiam vėjo greičiui sukeliama dulkės, siūbuoja plonos medžių šakos, jūroje mažos lūžtančios putotos bangos [37].

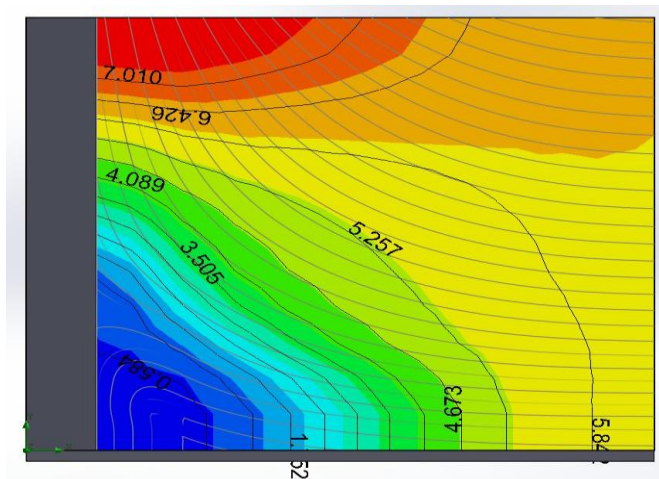
Lentelė 5. Srauto greičio įtaka oro srauto judėjimui.

<i>Oro srauto greitis, m/s</i>	<i>Minimalus srauto greitis, m/s</i>	<i>Vidutinis srauto greitis, m/s</i>	<i>Maksimalus srauto greitis, m/s</i>
3	0	2,714	4,634
6	0	5,426	9,276
9	0	8,133	13,912
11	0	9,940	17,022
15	0	13,572	23,187

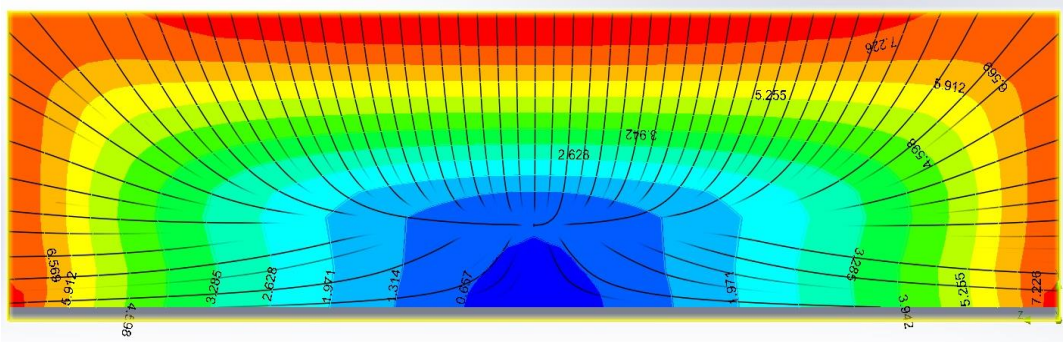
3.1.1.4. Optimalūs sienelės modelio parametrai

Atlikus sienelės aukščio, srauto šaltinio atstumo bei oro srauto greičio analizės ir apibendrinus gautus rezultatus buvo sumodeliuotas optimalus variantas: sienelės aukštis – 4 m, oro srauto šaltinio atstumas nuo sienelės – 4 m ir oro srauto greitis x ašimi – 6 m/s (sienelės ilgis konstanta).

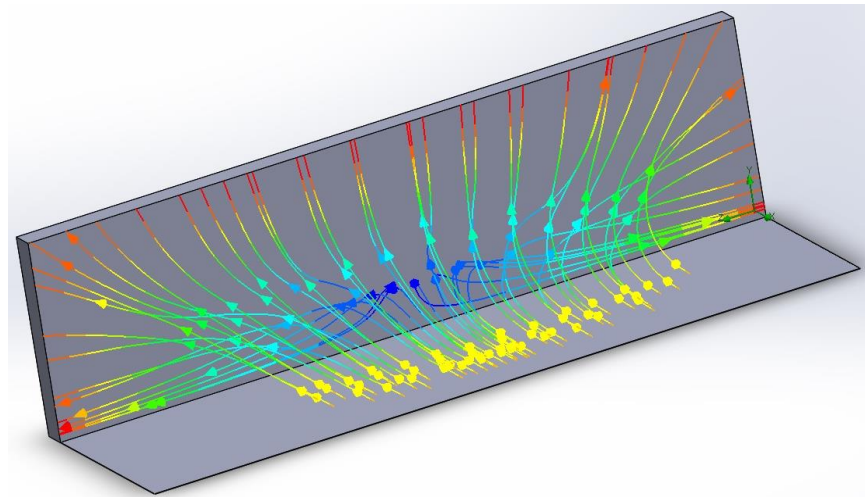
Atlikus skaičiavimus gaunami tokie rezultatai: minimalus srauto greitis - 0 m/s, vidutinis – 5,426 m/s, maksimalus - 9,276 m/s. Panaudojus Cut Plots ir Flow Trajectories funkcijas pavaizduojamas srautų judėjimas link sienelės. Iš grafikų galima daryti išvadą, kad oro srautas artėdamas prie kliūtis (sienelės) stengiasi jos išvengti ir apeiti. Dėl šios priežasties susidaro tokia tendencija, kad srauto greitis yra pats mažiausias sienelės viduryje, apatinėje dalyje ir didėja sklindant į šonus bei viršų.



15 pav. Srautų greičiai pavaizduoti optimaliaime sienelės modelyje iš šono.



16 pav. Srautų greičiai pavaizduoti optimaliame sienelės modelyje iš priekio.



17 pav. Srautų trajektorijos pavaizduotos optimaliame sienelės modelyje.

3.1.2. Statybiniame blokelyje integruoto ciklono modeliavimas

Modeliuojant cikloną oro srauto įleidimo anga bei abiejų cilindrų reikšmės buvo pastovios, o keičiami visi kiti matmenys. Atliekant oro srautų analizę su SolidWorks Flow Simulation programine įranga pagrindiniai kriterijai buvo sukurių formavimasis ciklone, dalelių sugaudymas, slėgių pokyčiai ir vidutinis greitis. KD analizės atliktos tokiomis sąlygomis:

- Ribos:
 - Maksimalus dalelių sklaidimo kelias – 2 m;
 - Maksimalus matavimo laikas – 3600 s;
 - Maksimalus atliekamų skaičiavimų kiekis – 50000.
- Sienelių sąlygos:
 - Absorbuojančios.
- Oro srauto įleidimo greitis:
 - 1; 5; 10; 15 m/s.
- Fizikinės sąlygos:

- Veikia gravitacinė jėga;
- Akrecija.

Modeliavimo pavyzdžiai pateikiami Priede Nr. 4. Optimaliems modelio parametrams nustatyti buvo atliktos šios parametų variacijos:

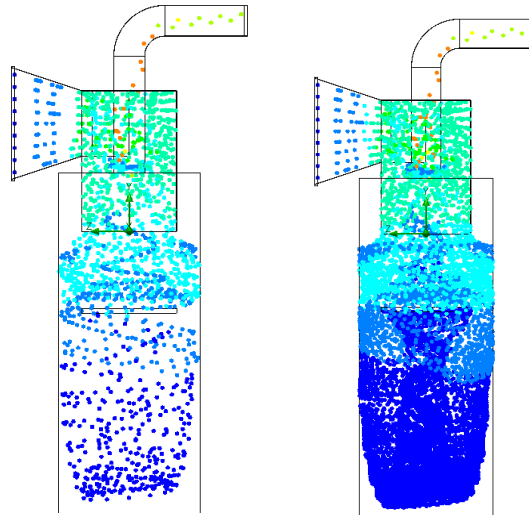
- oro išleidimo angos ilgis:
 - 30; 35; 45 mm.
- oro išleidimo angos diametras:
 - 8; 13; 18 mm.
- oro išleidimo angos užsilenkimo spindulys:
 - 10; 15; 20 mm.
- viršutinio ciklono korpuso ilgis:
 - 60; 80; 100 mm.
- srauto ribotuvo diametras:
 - 20; 30; 35; 40 mm.
- srauto ribotuvo aukštis:
 - 20 – 60 mm.

3.1.2.1. Dalelių dydžio ir analizės sąlygų įtaka ciklono efektyvumui

Dalelių dydžio įtakos ciklono efektyvumui tikslui pasiekti buvo modeliuojami 1, 2,5, 10 ir 50 μm dydžio dalelių srautai. Tuo tarpu analizės sąlygoms įvertinti buvo keičiamos sienelių sąlygos (absorbuojančios ir idealaus atspindžio) bei įvertinama gravitacijos ir dalelių akreacijos įtaka.

1 μm dalelių elgesys skiriasi nuo didesnių. Jos yra mažiau veikiamos gravitacijos, nes didėjant dalelių skersmeniui, didėja ir dalelių kaupimasis apatinėje ciklono dalyje. Dalelių akreaciją yra sudėtinga įvertinti, nes pokyčiai dalelių srautuose ir trajektorijose yra nežymūs. Didžiausią įtaką dalelių srautams daro sienelių sąlygos pasirinkimas (žr. 18 pav.). Esant absorbuojančioms sienelėms didelė dalis dalelių yra absorbuojamos sienelių, tuo tarpu idealaus atspindžio nuo sienelių atveju visos dalelės juda ciklono viduje tol kol pasiekia analizės ribas (kelias, laikas, skaičiavimų kiekis), taip sukurdamos papildomų trajektorijų, tačiau tai neįtakoja dalelių kiekio pasiekiančio ciklono išėjimo angą.

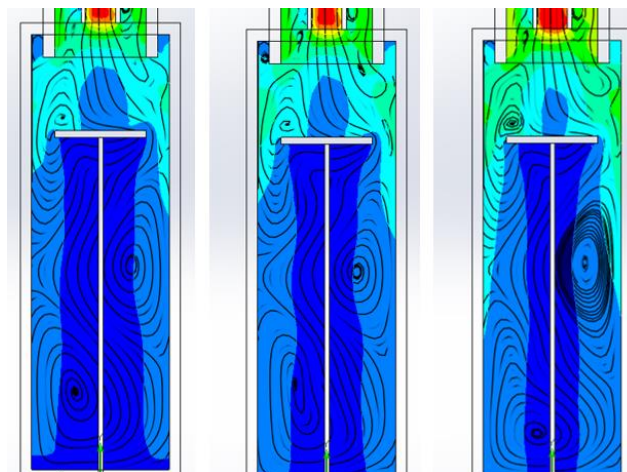
Atlikus šias analizes galima daryti išvadą jog ciklono efektyvumui tiesioginę įtaką daro analizuojamų dalelių dydis ir veikianti gravitacijos jėga.



18 pav. Kairėje pavaizduotas dalelių judėjimas esant absorbuojančioms sienelėms, dešinėje – idealaus atspindžio.

3.1.2.2. Srauto greičio įtaka ciklono efektyvumui

Srauto greičiui įvertinti buvo modeliuojami 4 variantai, esant įleidimo greičiams: 1, 5, 10 15 m/s. 19 pav. pavaizduojami atitinkamai 1, 5 ir 10 m/s greičio srautai. Iš šio paveikslo akivaizdžiai matyti, kad srauto greitis nežymiai veikia srautų trajektorijas, bet padidina sūkurių susidarymą.



19 pav. Srautų greičio įtaka judėjimo trajektorijoms.

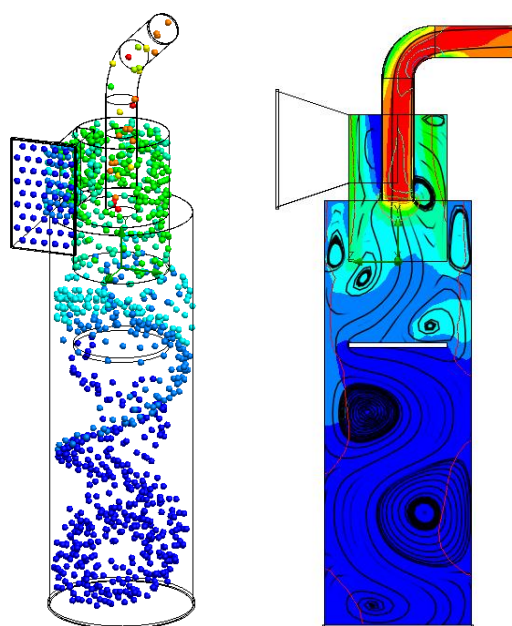
3.1.2.3. Optimalios ciklono modelio charakteristikos

Pagal anksčiau minėtas sąlygas suprojektuotas optimalios ciklono charakteristikos yra pavaizduotas 20 pav. Oro srauto išleidimo anga suprojektuota priešingoje įleidimo angos pusėje, kad cikloną būtų galima integruoti blokelių viduje ir iš jų statyti konstrukcines sienes. Ciklono viduje

yra suprojektuotas sūkurių susidarymo ribotuvas, kurio pagalba analizuojamas optimalus aukštis oro sūkuriams susidaryti.

Lentelė 6. Suprojektuoto blokelyje integruoto ciklono parametrai.

Matmuo	Žymėjimas	Reikšmė, mm
Pimojo cilindro diametras	D_1	40
Antrojo cilindro diametras	D_2	60
Įleidimo angos aukštis	H	28
Įleidimo angos plotis	W	8
Oro išleidimo angos diametras	D_e	13
Ilgis oro išleidimo angos	S	30
Srauto ribotuvo diametras	D_3	40
Srauto ribotuvo aukštis	L_s	50
Blokelio aukštis	L_b	190



20 pav. Optimalus ciklonas. Kairėje pusėje pavaizduotos dalelių judėjimo trajektorijos, dešinėje srautai ir sūkurių susidarymas.

3.2. Sferinių kietųjų dalelių ribinio greičio skaičiavimas

Mažoms kietosioms dalelėms, kurių $d \leq 1 \mu\text{m}$, ribiniam greičiui apskaičiuoti naudojama (4) formulė. Ši formulė yra išvedama iš Stokso jėgos lygties. Tuo tarpu didelėms dalelėms, $d \geq 1 \mu\text{m}$, naudojama (5) formulė.

Skaičiavimui naudojama jėgos reikšmė yra gauta iš optimalaus sienelės modelio skaičiavimų rezultatų. Naudojama reikšmė yra $F = 431,4$ N. Skaičiavimai atliekami mažoms dalelėms nuo 0,5 iki 1 μm imtinai ir didelėms 1 – 100 μm .

Lentelė 7. Sferinių kietųjų dalelių ribiniai greičiai.

Mažos dalelės		Didelės dalelės	
d, μm	V, m/s	d, μm	V, m/s
0.5	5.29	1	2.65
0.6	4.41	2.5	1.06
0.7	3.78	5	0.529
0.8	3.31	10	0.265
1	2.65	100	0.026

Iš gautų rezultatų galima išvelti tokią tendenciją, kad egzistuoja atvirkštinė tiesinė priklausomybė tarp dalelių dydžio ir ribinio greičio:

- mažų dalelių atveju dalelės skersmeniui kintant nuo 0,5 iki 1 μm , ribinis greitis mažėja nuo 5,29 iki 2,65 m/s;
- didelių dalelių atveju dalelės skersmeniui kintant nuo 1 iki 10 μm greitis mažėja nuo 2,65 iki 0,265 m/s.

3.3. Teoriniai ciklono efektyvumo skaičiavimai

Kaip minėta darbo metodologinėje dalyje klasikiniai ciklonai skirstomi į tris grupes, pagal paskirtį: aukšto efektyvumo, standartiniai ir aukšto pralaidumo. Microsoft Excel programoje pagal metodologinėje dalyje pateiktas skaičiavimų formules atlikti skaičiavimai visoms ciklonų grupėms ir suprojektuotam nestandartiniam ciklonui. Skaičiavimai atliekami esant 50 mm korpuso diametru ir 16,7 l/min srauto debitui. Gauti ciklonų efektyvumai ir slėgių nuostoliai pateikiami 7 lentelėje.

Lentelė 8. Ciklonų skaičiavimų rezultatai.

	Aukšto efektyvumo		Standartiniai		Didelio pralaidumo		Novel*
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Efektyvumas, %	88,81	89,37	83,43	82,49	51,25	52,33	69,89
Slėgių nuostoliai, Pa	15863,3	26825,1	12690,6	12690,6	2506,8	2518	3510,8

*Blokelyje integruoto ciklono teoriniai efektyvumo ir slėgių nuostolių skaičiavimai.

Aukšto efektyvumo ir standartinių ciklonų efektyvumai gaunami aukščiausi, skirtumas tarp jų nedidelis. Tuo tarpu aukšto pralaidumo ciklonuose gaunamas ženkliai mažesnis efektyvumas, kuris siekia vos 52,33 %. Tuo tarpu suprojektuoto nestandartinio ciklono efektyvumas siekia 69,89 %. Lyginant slėgių nuostolius standartiniuose ir aukšto efektyvumo ciklonuose susidaro dideli 12690,6 - 26825,1 Pa nuostoliai, o didelio pralaidumo ir nestandartiniam 3,6 - 10,7 karto mažesni.

Šiame darbe analizuojamas nestandartinės formos ciklonas lyginant su standartiniais, įvairių konfigūracijų ciklonais, pagal atliktus teorinius skaičiavimus yra vidutinis. Ciklono efektyvumas 20 % mažesnis nei aukšto efektyvumo ciklonų, tačiau slėgių nuostoliai yra artimi didelio pralaidumo ciklonams ir net 4,52 - 7,64 mažesni už aukšto efektyvumo.

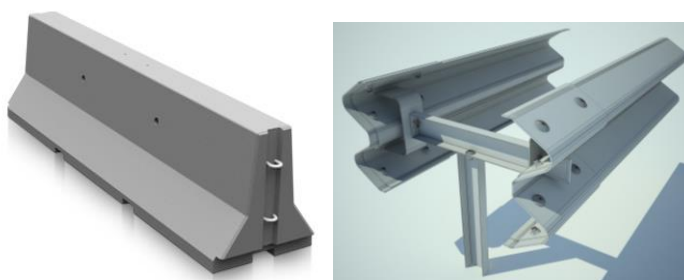
4. STATYBINIUOSE BLOKELIUOSE INTEGRUOTŲ CIKLONŲ PANAUDOJIMAS

Pastaraisiais metais daug tyrimų yra koncentruoti į transporto sukiamą oro taršą miestų teritorijose ir nustatyta, kad kietosios dalelės yra labai svarbus oro kokybės indikatorius. Kietosios dalelės gali sukelti didžiulio spektro poveikius biologinėms sistemoms ir žmonių sveikatai. Kadangi pagrindinis KD emisijų šaltinis yra kelių transportas, Europos Sąjunga bei kitos šalys peržiūri oro kokybės standartus ir leidžia naujas įstatymines bazes [38].

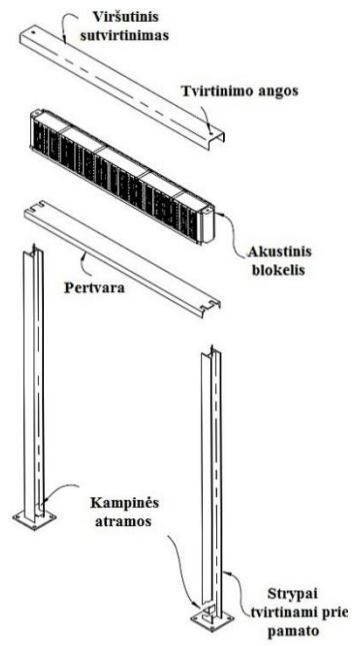
Prisidedant prie oro užterštumo kietosiomis dalelėmis mažinimo, ypatingai miestų aplinkoje, suprojektuotas statybinis blokelis su integruotu ciklonu gali būti panaudojamas konstrukcinių sienelių (akustinių, apsauginių ir kt.) statyboje bei pritaikomas kelių konstrukcijose, tokiose kaip kelio atitvarai ir pan.. Konstrukcines sienes taip pat yra tikslinga įrenginėti aplink statybų aikštes.

Populiaraus dizaino akustinių sienelių konstrukcijos pavyzdys yra pateikiamas 22 pav. Tokio stiliaus sienelės yra statomos ant išlieto pamato tvirtinant atraminius strypus, tarp kurių panaudojant pertvaras sumontuojami akustiniai blokėliai. Parenkant tinkamas medžiagas sumontuotos sienelės yra tvirtos ir ilgaamžės. Taip pat tokia konstrukcija įgalina sienelių statybą kelių vingiuose bei nelygaus reljefo vietovėse. Statybinis blokelis su integruotu ciklonu gali būti pagamintas iš triukšmą izoliuojančių medžiagų ir panaudotas akustinių sienelių gamyboje.

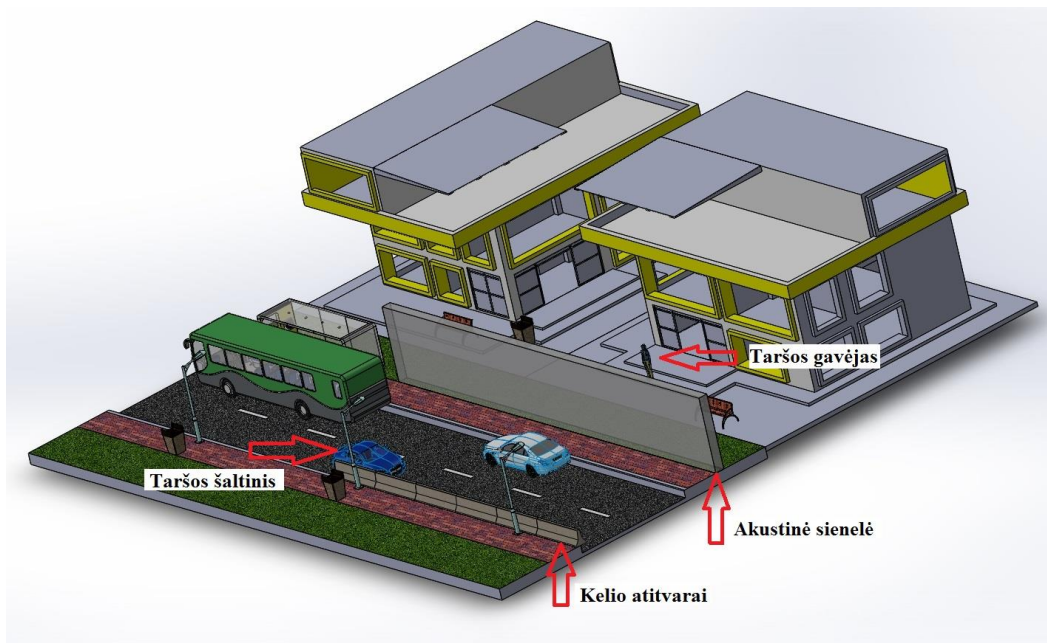
21 paveiksle pavaizduoti dviejų rūšių kelio atitvarai: betoniniai ir metaliniai. Metaliniai atitvarai dėl jų montavimo paprastumo bei galimybės suformuoti pagal kelio vingius ir plačiau naudojami. 23 paveiksle yra pavaizduota akustinių sienelių ir kelio atitvarų panaudojimo iliustracija.



21 pav. Betoninių ir metalinių kelio atitvarų pavyzdžiai.



22 pav. Akustinių sienelių konstrukcijos pavyzdys.



23 pav. Konstrukcinės sienelės ir kelio atitvarų vizualizacija.

IŠVADOS

1. Atlikus judančių automobilių sukkelto oro srauto modeliavimą SolidWorks Flow Simulation programine įranga buvo nustatyta, kad esant pradiniam šaltinio srauto greičiui 6 m/s ties konstrukcine sienele (aukštis - 4 m, ilgis - 15 m, atstumas iki sienelės 4 m) susidaro tokie greičiai: vidutinis modelyje srauto greitis 5,4 m/s, mažiausias ties sienelės viduriu - 1 m/s, o maksimalus greitis pasiekiamas ties sienelės viršumi - 8 m/s.
2. Statybiniame blokelyje integruoto ciklono parametrų modeliavimas buvo atliekamas panaudojant SolidWorks Flow Simulation programinę įrangą. Nustatyti šie optimalūs ciklono parametrai: pirmo cilindro skersmuo - 40 mm, antrojo - 60 mm, įleidimo anga 28x8 mm, oro išleidimo angos skersmuo 13 mm, išleidimo angos ilgis 30 mm, srauto ribotuvo skersmuo 40 mm, ribotuvo aukštis 50 mm; bendras statybinio blokelių aukštis - 190 mm.
3. Atlikus sferinės formos aerozolinės dalelės ribinių greičių skaičiavimus nustatyta, kad egzistuoja atvirkštinė tiesinė priklausomybė tarp dalelių dydžio ir ribinio greičio. Mažoms 0,5 - 1 μm dydžio dalelėms, ribinis greitis mažėja nuo 5,29 iki 2,65 m/s, o didelėms 1 - 10 μm dydžio dalelėms greitis mažėja nuo 2,65 iki 0,265 m/s.
4. Atlikus skaičiavimus buvo gauti teoriniai trijų pramonėje naudojamų modifikacijų ciklonų efektyvumai ir slėgio nuostoliai: aukšto efektyvumo ciklonų - 89,09% ir 21344,2 Pa; standartinių ciklonų - 82,96 % ir 12690,6 Pa; didelio pralaidumo ciklonų - 51,79 % ir 2512,4 Pa. Palyginimui šiame darbe suprojektuoto nestandartinio ciklono apskaičiuotas efektyvumas siekia 69,89 %, o slėgio nuostoliai 3510,8 Pa.
5. Iš statybinių blokelių su integruotais ciklonais gali būti suformuotos įvairių konstrukcijų sienelės, skirtos pasyviai teršalų sugaudymui. Tuo pat metu sienelės gali turėti triukšmo apsauginę, dekoratyvinę ar kitą paskirtį.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

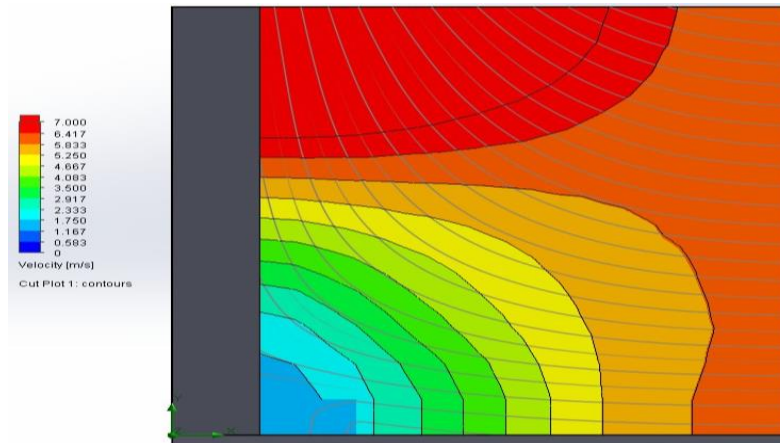
1. World Health Organization (2003). Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide. Bonn, Germany;
2. European Environment Agency (2015). Air quality in Europe – 2015 report. Luxembourg: Publications Office of the European Union;
3. European Environment Agency (2015). Safeguarding people from environmental risks to health. The European Environment State and Outlook 2015. Denmark: Copenhagen;
4. Geller, M. D., Ntziachristos, L., Mamakos, A., Samaras, Z., Schmitz, D. A., Froines, J. R., et al. (2006). Physicochemical and redox characteristics of particulate matter (PM) emitted from gasoline and diesel passenger cars. *Atmospheric Environment*, 40(36), 6988-7004;
5. Berger, J., & Denby, B. (2011). A generalised model for traffic induced road dust emissions. model description and evaluation. *Atmospheric Environment*, 45(22), 3692-3703;
6. Halonen, J. I., Blangiardo, M., Toledano, M. B., Fecht, D., Gulliver, J., Anderson, H. R., et al. (2016). Long-term exposure to traffic pollution and hospital admissions in London. *Environmental Pollution*, 208, Part A, 48-57;
7. Katsoulis, M., Dimakopoulou, K., Pedeli, X., Trichopoulos, D., Gryparis, A., Trichopoulou, A., et al. (2014). Long-term exposure to traffic-related air pollution and cardiovascular health in a Greek cohort study. *Science of the Total Environment*, 490, 934-940;
8. Gustafsson, M., Blomqvist, G., Gudmundsson, A., Dahl, A., Swietlicki, E., Bohgard, M., et al. (2008). Properties and toxicological effects of particles from the interaction between tyres, road pavement and winter traction material. *Science of the Total Environment*, 393(2–3), 226-240;
9. Ferm, M., & Sjöberg, K. (2015). Concentrations and emission factors for PM_{2.5} and PM₁₀ from road traffic in Sweden. *Atmospheric Environment*, 119, 211-219;
10. Kwak, J., Kim, H., Lee, J., & Lee, S. (2013). Characterization of non-exhaust coarse and fine particles from on-road driving and laboratory measurements. *Science of the Total Environment*, 458–460, 273-282;
11. Pant, P., & Harrison, R. M. (2013). Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review. *Atmospheric Environment*, 77, 78-97;
12. Lenschow, P., Abraham, H. -, Kutzner, K., Lutz, M., Preuß, J. -, & Reichenbacher, W. (2001). Some ideas about the sources of PM₁₀. *Atmospheric Environment*, 35, Supplement 1, S23-S33;
13. Ntziachristos, L., Mamakos, A., Samaras, Z., Mathis, U. et al., Overview of the European Particulates Project on the Characterization of Exhaust Particulate Emissions From Road Vehicles: Results for Light-Duty Vehicles, SAE Technical Paper 2004-01-1985, 2004;

14. Bertil Forsberg, Hans-Christen Hansson, Christer Johansson, Hans Areskoug, Karin Persson, and Bengt Järholm (2005). Comparative Health Impact Assessment of Local and Regional Particulate Air Pollutants in Scandinavia. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*: Vol. 34, Issue 1, pg(s) 11-19;
15. Gustafsson, M., Blomqvist, G., Gudmundsson, A., Dahl, A., Swietlicki, E., Bohgard, M., et al. (2008). Properties and toxicological effects of particles from the interaction between tyres, road pavement and winter traction material. *Science of the Total Environment*, 393(2–3), 226-240;
16. Kupiainen, K. J., & Pirjola, L. (2011). Vehicle non-exhaust emissions from the tyre–road interface – effect of stud properties, traction sanding and resuspension. *Atmospheric Environment*, 45(25), 4141-4146;
17. Hagino, H., Oyama, M., & Sasaki, S. (2016). Laboratory testing of airborne brake wear particle emissions using a dynamometer system under urban city driving cycles. *Atmospheric Environment*, 131, 269-278;
18. Burtscher, H. (2005). Physical characterization of particulate emissions from diesel engines: A review. *Journal of Aerosol Science*, 36(7), 896-932;
19. Matti Maricq, M. (2007). Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: A review. *Journal of Aerosol Science*, 38(11), 1079-1118;
20. Geller, M. D., Ntziachristos, L., Mamakos, A., Samaras, Z., Schmitz, D. A., Froines, J. R., et al. (2006). Physicochemical and redox characteristics of particulate matter (PM) emitted from gasoline and diesel passenger cars. *Atmospheric Environment*, 40(36), 6988-7004;
21. Hung-Lung, C., & Yao-Sheng, H. (2009). Particulate matter emissions from on-road vehicles in a freeway tunnel study. *Atmospheric Environment*, 43(26), 4014-4022;
22. Hussein, T., Johansson, C., Karlsson, H., & Hansson, H. (2008). Factors affecting non-tailpipe aerosol particle emissions from paved roads: On-road measurements in stockholm, sweden. *Atmospheric Environment*, 42(4), 688-702;
23. Giechaskiel, B., Maricq, M., Ntziachristos, L., Dardiotis, C., Wang, X., Axmann, H., et al. (2014). Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: From smoke and filter mass to particle number. *Journal of Aerosol Science*, 67, 48-86;
24. Alves, C. A., Gomes, J., Nunes, T., Duarte, M., Calvo, A., Custódio, D., et al. (2015). Size-segregated particulate matter and gaseous emissions from motor vehicles in a road tunnel. *Atmospheric Research*, 153, 134-144;
25. Kim, K. H., & Yoon, G. H. (2015). Optimal rigid and porous material distributions for noise barrier by acoustic topology optimization. *Journal of Sound and Vibration*, 339, 123-142;
26. Stacy Murray. Sound Walls: Absorptive versus reflective design and effectiveness. Sound Fighter Systems, LLC;

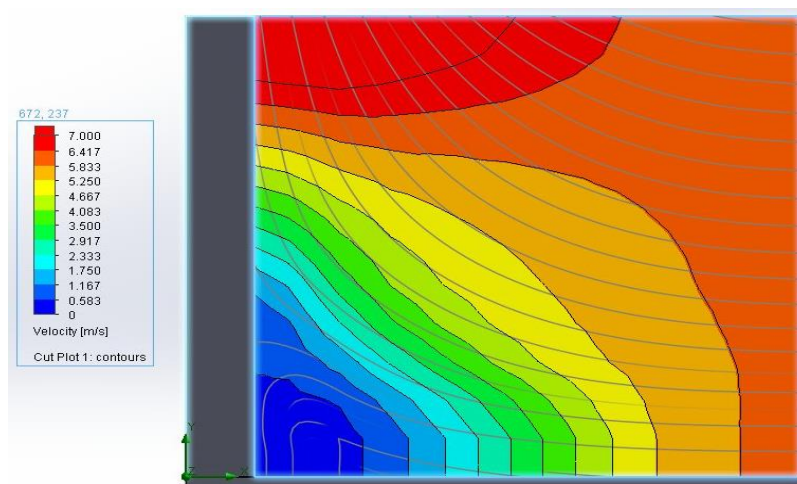
27. S. Samuels, E. Ancich (2002). Recent developments in the design and performance of road traffic noise barriers. *Noise & Vibration Worldwide*, vol. 33 no. 3 16-23;
28. Ishizuka, T., & Fujiwara, K. (2004). Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions. *Applied Acoustics*, 65(2), 125-141;
29. Dustin Watson (2006). Evaluation of benefits and opportunities for innovative noise barrier designs. Arizona. Dept. of Transportation, FHWA-AZ-06-572;
30. Louis F. Cohn, Roswell A. Harris (2007). Special noise barrier applications: Phase II. University of Louisville. Dept. of Engineering, WA-RD 378.1;
31. Deborah S. McAvoy, Ryan Theberge (2014). Comparison and testing of various noise wall materials. The Ohio Department of Transportation, Office of Statewide Planning & Research, FHWA/OH-2014/8;
32. Watts, G. R. (1996). Acoustic performance of parallel traffic noise barriers. *Applied Acoustics*, 47(2), 95-119;
33. C. David Cooper, F.C. Alley (2011). *Air Pollution Control: A Design Approach 4th Edition*. Waveland Press, Inc., p 135-159;
34. SolidWorks simulation suite: 3D engineering solutions. Dassault Systemes, The 3DExperience Company;
35. John E. Matsson (2014) *An introduction to SolidWorks Flow Simulation*. SDC Publications, ISBN:1585038598 9781585038596;
36. Martin Crawford (1976). *Air pollution control theory*. McGraw-Hill Inc, p 93-105. ISBN 0-07-013490-1;
37. Rimkus E. (2011). *Meteorologijos įvadas*. Vilnius: Vilniaus Universitetas, 151 psl;
38. Oucher, N., & Kerbachi, R. (2012). Evaluation of air pollution by aerosol particles due to road traffic: A case study from algeria. *Procedia Engineering*, 33, 415-423.

PRIEDAI**PRIEDAS Nr. 1.** Atstumo iki sienelės analizė.

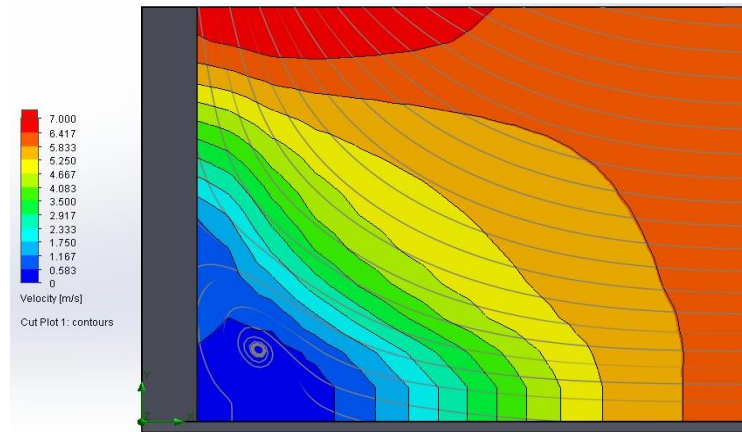
Šiame priede yra pateikiami grafikai atstumo iki sienelės įtakos oro srauto formavimuisi.



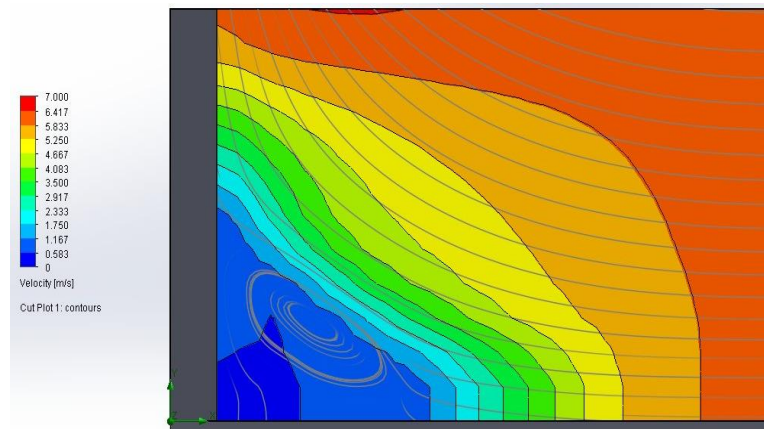
Oro srauto judėjimas, kai srauto šaltinis 3 m atstumu nuo sienelės.



Oro srauto judėjimas, kai srauto šaltinis 4 m atstumu nuo sienelės.



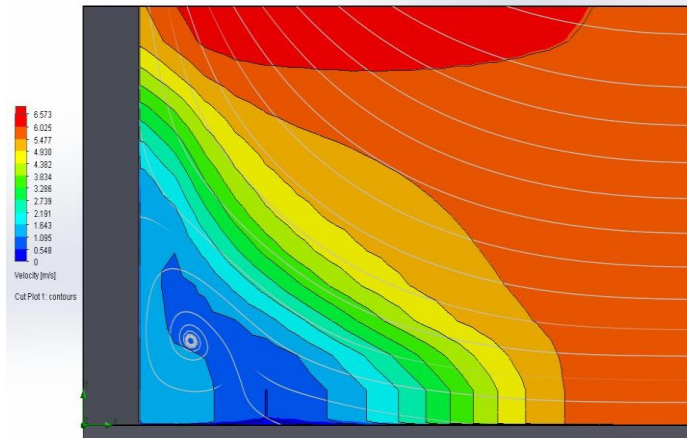
Oro srauto judējimas, kai srauto šaltinis 5 m atstumu no sienelēs.



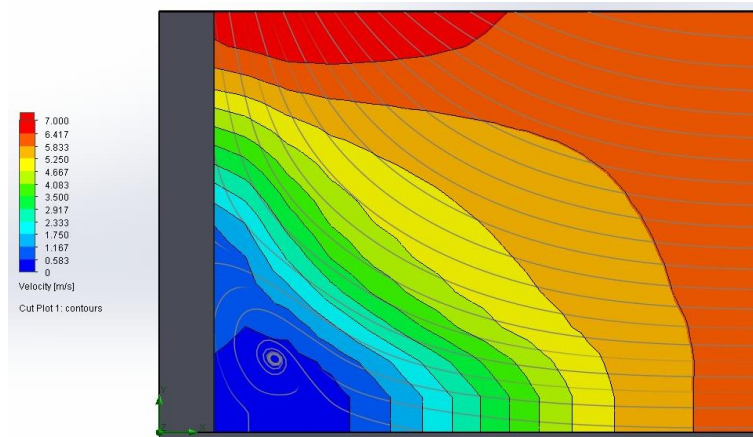
Oro srauto judējimas, kai srauto šaltinis 6 m nuo sienelēs.

PRIEDAS Nr. 2. Sienelės aukščio analizė.

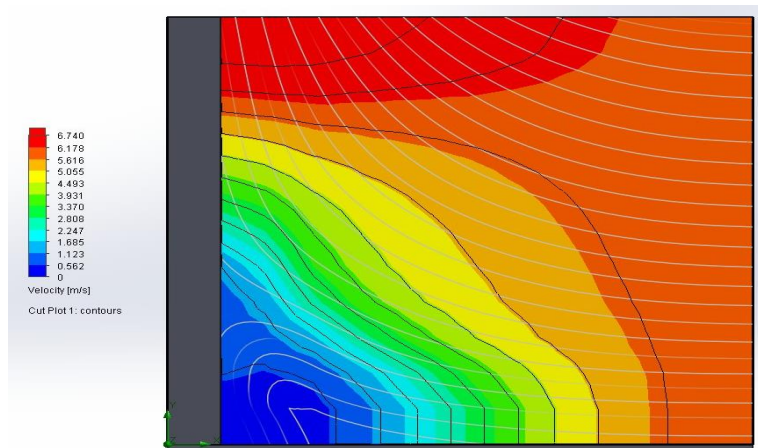
Šiame priede yra pateikiami grafikai sienelės aukščio įtakos oro srauto formavimuisi.



Oro srauto judėjimas esant 3 m aukščio sieniei.



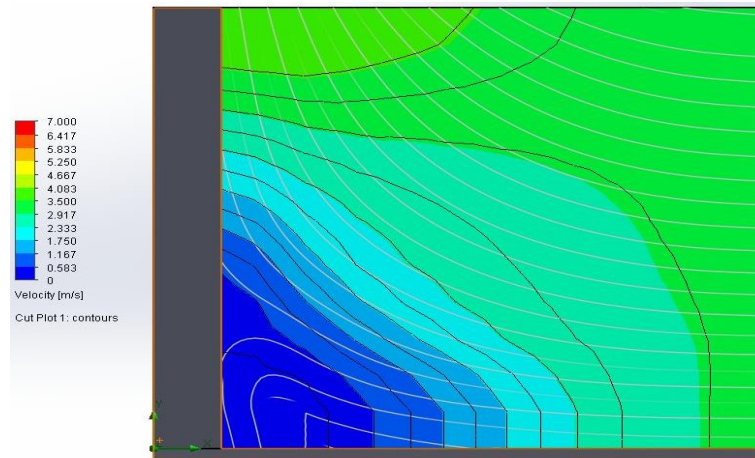
Oro srauto judėjimas esant 4 m aukščio sieniei.



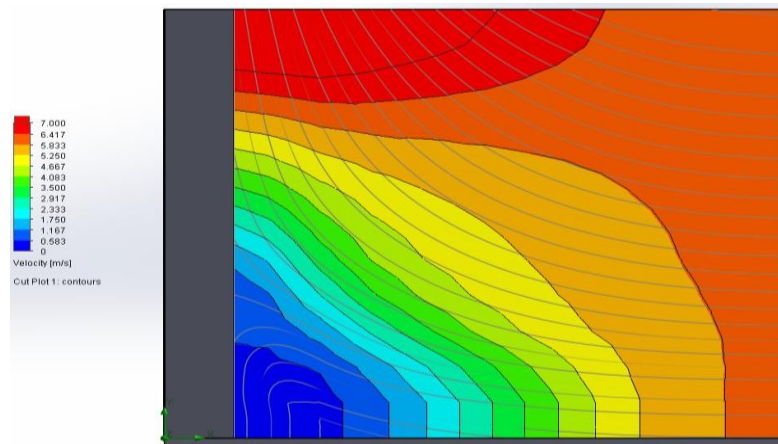
Oro srauto judėjimas esant 5 m aukščio sieniei.

PRIEDAS Nr. 3. Tėkmės greičio analizė.

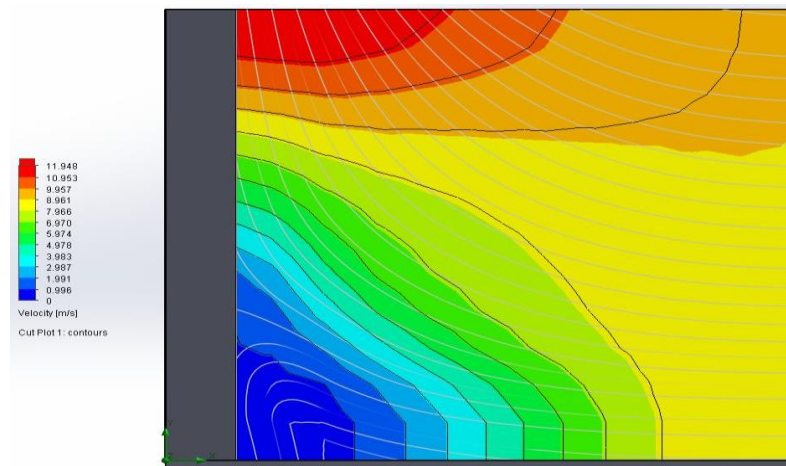
Šiame priede yra pateikiami grafikai tėkmės greičio įtakos oro srauto formavimuisi.



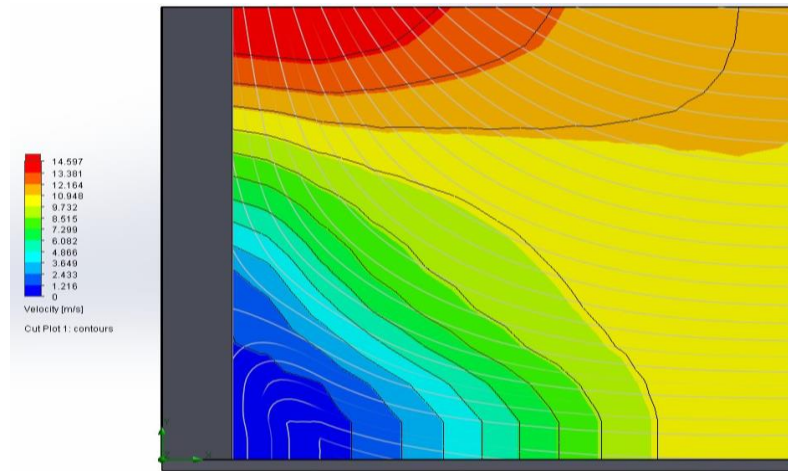
Oro srauto judėjimas esant 3 m/s vėjo greičiui.



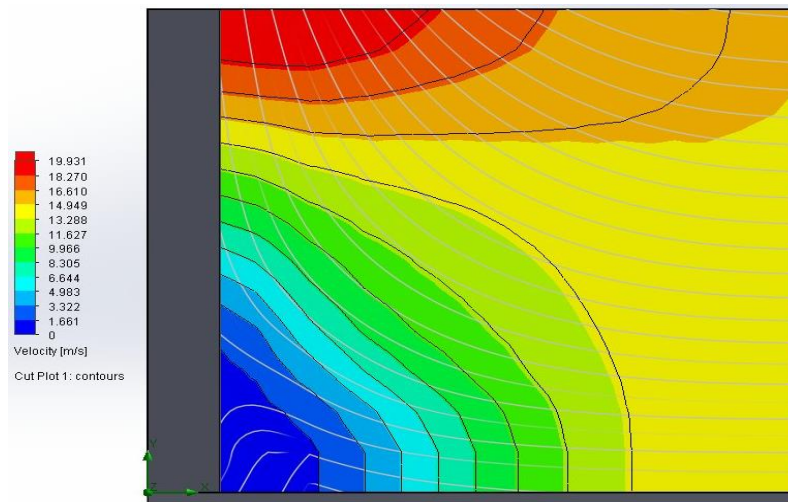
Oro srauto judėjimas esant 6 m/s vėjo greičiui.



Oro srauto judėjimas esant 9 m/s vėjo greičiui.



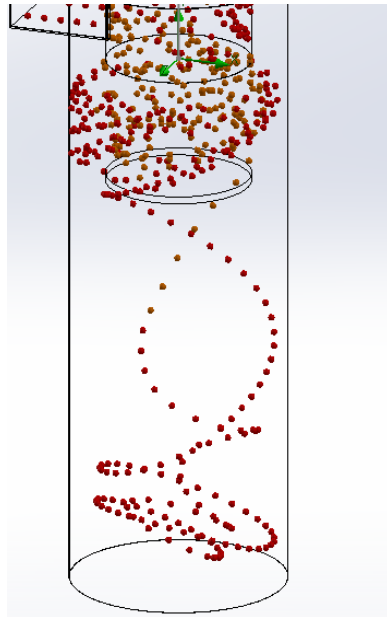
Oro srauto judėjimas esant 11 m/s vėjo greičiui.



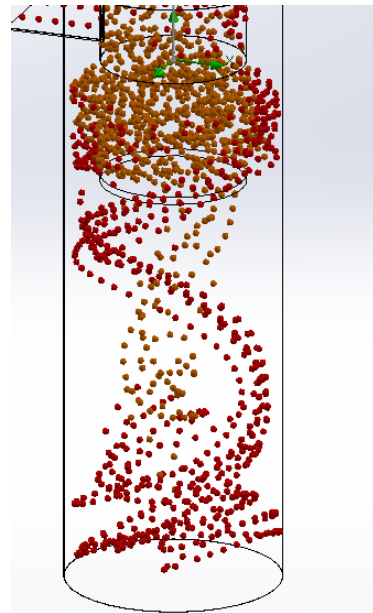
Oro srauto judėjimas esant 15 m/s vėjo greičiui.

PRIEDAS Nr. 4. Ciklono modeliavimo pavyzdžiai.

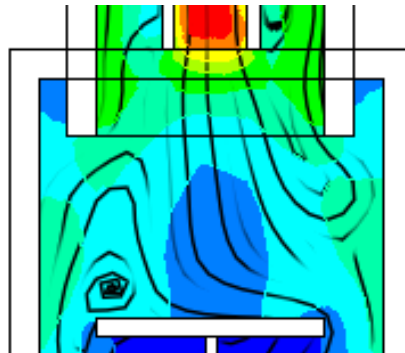
Šiame priede yra pateikiami ciklono modeliavimo pavyzdžiai.



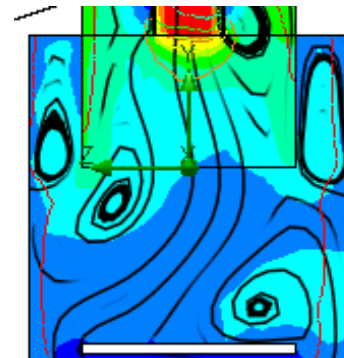
Blogi sūkuriai



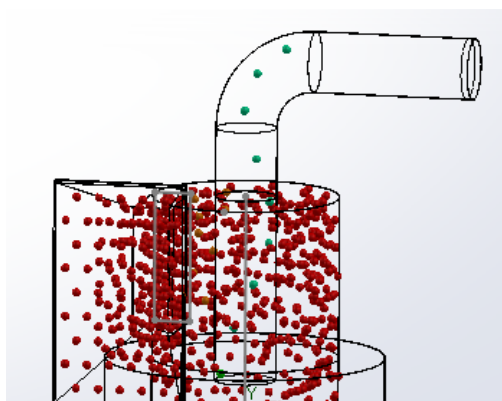
Geri sūkuriai



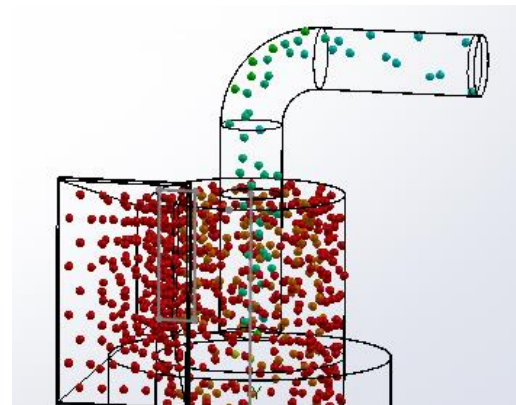
Blogi sūkuriai



Geri sūkuriai



Blogos srautų trajektorijos



Geros srautų trajektorijos