



D A R I U S Č I U Ž A S

**ORO KOKYBĖ IR
JOS VALDYMAS
MAŽAI ENERGIJOS
NAUDOJANČIUOSE
GYVENAMUOSIUOSE
PASTATUOSE**

D A K T A R O D I S E R T A C I J O S
S A N T R A U K A

T E C H N O L O G I J O S
M O K S L A I , A P L I N K O S
I N Ž I N E R I J A (0 4 T)

K a u n a s
2 0 1 6

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ALEKSANDRO STULGINSKIO UNIVERSITETAS
LIETUVOS ENERGETIKOS INSTITUTAS

Darius Čiužas

**ORO KOKYBĖ IR JOS VALDYMAS MAŽAI ENERGIJOS
NAUDOJANČIUOSE GYVENAMUOSIUOSE PASTATUOSE**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, aplinkos inžinerija (04T)

2016, Kaunas

Disertacija rengta 2012–2016 metais Kauno technologijos universiteto Cheminės technologijos fakultete, Aplinkosaugos technologijos katedroje. Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba.

Mokslinis vadovas:

Doc. dr. Dainius MARTUZEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija, 04T).

Aplinkos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Prof. dr. Žaneta STASIŠKIENĖ (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija – 04 T) – **pirmininkė**;

Prof. dr. Gintaras DENAFAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija – 04T);

Doc. dr. Jolanta DVARIONIENĖ (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija – 04T);

Dr. Kęstutis KVIETKUS (Fizinių ir technologijos mokslų centro Fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02P);

Dr. Jurgita OVADNEVAITĖ (Galway nacionalinis Airijos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P).

Lietuvių kalbos redaktorė:

Aurelija Gražina Rukšaitė

Leidykla „Technologija“

Disertacija bus ginama viešame Aplinkos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2016 m. spalio 21 d. 10 val. Kauno technologijos universiteto Centrinė rūmų disertacijų gynimo salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73–403, 44249 Kaunas, Lietuva.

Tel. +370 37 30 00 42; faksas +370 37 32 41 44; e. paštas doktorantura@ktu.lt.

Disertacijos santrauka išsiųsta 2016 m. rugsėjo 21 d.

Su disertacija galima susipažinti internetinėje svetainėje <http://ktu.edu> ir Kauno technologijos universiteto (K. Donelaičio g. 20, Kaunas), Aleksandro Stulginskio universiteto (Studentų g. 11, Akademija, Kauno r.) ir Lietuvos energetikos instituto (Breslaujos g. 3, Kaunas) bibliotekose.

IŽANGA

Patalpų oro kokybė (POK) yra vienas iš svarbiausių parametrų, darančių įtaką patalpų mikroklimatui ir žmonių komfortui. Ištirta, kad žmonės išsivysčiusiose šalyse patalpose praleidžia didžiąją dalį savo laiko (apie 90 proc.), todėl patalpų oro kokybė yra labai svarbus, tačiau sunkiai kontroliuojamas veiksnys (Brasche and Bischof, 2005; Kleipeis et al., 2001). POK labiausiai veikia patalpų ir lauko oro taršos šaltiniai. Dažniausiai pasitaikantys patalpų oro taršos šaltiniai yra: rūkymas, žvakių ir smilkalų deginimas, patalpų valymas, maisto gaminimas, baldai, spausdintuvai, statybinės apdailos medžiagos ir kiti elektronikos prietaisai. Direktyvoje 2010/31/EU dėl pastatų energetinio naudingumo numatyta, kad nuo 2021 m. visi nauji pastatai turi būti energijos nevartojančios – pasyvūs pastatai. Statant pasyvius arba mažai energijos vartojančius pastatus, reikia pasiekti maksimalų pastatų atitvarų sandarumą ir šiluminę izoliaciją. Dėl šių priežasčių patalpų vidaus izoliacija sukuria prielaidas intensyvesnei žmonių ekspozicijai vidaus oro taršos šaltiniams. Šio fenomeno pavyzdys yra „sergančio namo“ sindromas. Todėl yra svarbu ištirti ir įvertinti POK mažai energijos naudojančiuose namuose.

POK valdyti gali būti panaudojamos kelios strategijos, tokios kaip: taršos šaltinio kontrolė, patalpų oro skiedimas lauko oru (ventiliacija) ir oro valymas. Siekiant efektyviai panaudoti šias skirtingas strategijas POK gerinti, reikia žinoti patalpų oro taršos šaltinius ir jų sukeltą taršos pobūdį.

Ventiliacija yra viena iš efektyviausių POK gerinimo strategijų, tačiau dažniausiai ji yra brangi dėl šildymo ar šaldymo poreikio, be to, ventiliacija gali tiekti teršalus iš lauko. Kitas teršalų šalinimo iš patalpų oro būdas yra oro valymas, plačiai taikomas siekiant sumažinti aerolio dalelių (AD) ir kitų dujinės fazės teršalų (daugiausia organinės kilmės) koncentracijas, išskiriamas pramonės ir buitines aplinkoje. Tyrimais nustatyta, kad ventiliacija ir oro valymas yra efektyviausi būdai siekiant sumažinti neigiamą POK įtaką gyventojams. Šiuo metu yra mažai duomenų apie šių technologijų derinio įtaką POK gerinimui.

Atsiradus naujiems matavimo metodams, naujoms žinioms apie patalpų oro taršos šaltinius ir naujoms POK valdymo strategijoms, reikia žengti naują žingsnį į išplėstinį POK valdymą, kuris būtų paremtas realaus laiko taršos matavimu ir būtų integruotas į protingo namo sistemą. Žinios apie POK valdymo modelius / algoritmus, paremtus realaus laiko skirtingų teršalų matavimu, yra labai ribotos, todėl reikia naujo, sisteminio požiūrio į šią galimybę.

Disertacijos tikslas

Sukurti patalpų oro kokybės valdymo principus, remiantis realaus laiko teršalų koncentracijų matavimu, valdymu ir modeliavimu.

Disertacijos uždaviniai:

1. Ištirti POK mažai energijos naudojančių namų gyvenamojoje aplinkoje;
2. Nustatyti teršalų išsiskyrimą ir sklaidą iš įvairaus pobūdžio taršos šaltinių eksperimentinio modeliavimo būdu;
3. Ištirti POK valdymo galimybes, panaudojant ventiliaciją ir oro valymą;
4. Sudaryti POK valdymo algoritmą, remiantis realaus laiko matavimo duomenimis.

Darbo naujumas:

1. Įvertinta POK 11 Lietuvoje naujai pastatytuose mažai energijos naudojančiuose namuose;
2. Charakterizuojant ir tiriant aktyvių taršos šaltinių skleidžiamų AD ir LOJ koncentracijų kitimo dinamiką, buvo parengta duomenų bazė, kuri gali būti panaudojama POK valdymo modeliams ir algoritmams sudaryti;
3. Ištirta ventiliacijos ir nešiojamųjų oro valymo įrenginių įtaka šalinant AD ir LOJ iš patalpų oro;
4. Sukurtas POK valdymo modelis, paremtas realaus laiko AD (nano- ir mikro-) ir LOJ koncentracijų matavimu.

Disertacijos struktūra

Disertacija yra sudaryta iš: įžangos, mokslinės literatūros apžvalgos, eksperimentų metodikos, rezultatų ir diskusijos, išvadų, rekomendacijų, literatūros sąrašo ir priedų. Disertacija pateikiama 118 puslapiuose, įskaitant 11 lentelių ir 21 paveikslą.

Disertacijos tyrimų rezultatų publikavimas

Tyrimų rezultatai publikuoti trijuose „Thomson Reuters“ sąrašo leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą, septynios publikacijos / pranešimai – konferencijų pranešimų medžiagoje ir vienas mokslo populiarinimo straipsnis.

Disertacijos praktinė vertė:

1. Tyrimo rezultatai apie mažai energijos naudojančių namų POK suteiks žinių tokių namų, šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemų projektuotojams parenkant naudojamą medžiagą ir vėdinimo režimus, užtikrinančius sveiką POK;

2. Aktyvių taršos šaltinių įtakos POK duomenų bazė apie gali toliau būti naudojama kuriant naujus POK valdymo algoritmus;
3. Sukurtas pilkos dėžės POK valdymo modelis, kurio veikimas paremtas realaus laiko AD ir LOJ koncentracijų matavimu, gali būti integruotas į pastatų valdymo sistemas (pvz.: „protingų namų“ sistemos);
4. Disertacijoje pateikti rezultatai gauti įgyvendinant projekto „IAQSmart (Air quality management in Low Energy Homes), financed by the European Social Fund under Global Grant Scheme“ veikas.

Autoriaus indėlis

Skyriuje „3.1. POK Lietuvos mažai energijos naudojančiuose pastatuose“: dalyvavo atliekant oro kokybės matavimus namuose ir apdorojant surinktus mėginius laboratorijoje.

Skyriuje „3.2. Aktyvių taršos šaltinių skleidžiamos taršos charakterizavimas“: atliko eksperimentinius tyrimus, atliko duomenų analizę ir parengė rankraštį.

Skyriuje „3.3. Patalpų oro kokybės valdymas panaudojant ventiliaciją ir nešiojamuosius oro valymo įrenginius“: atliko eksperimentinius tyrimus, atliko duomenų analizę ir parengė rankraštį.

Skyriuje „3.4. Pilkos dėžės modelis POK valdyti patalpose, paremtas AD ir LOJ koncentracijų matavimu realiu laiku“: atliko eksperimentinius tyrimus, duomenų analizę ir jų interpretaciją.

LITERATŪROS APŽVALGA

Skyrius 1.1. Patalpų oro kokybė (POK) yra vienas iš svarbiausių parametru, darančių įtaką patalpų vidaus mikroklimatui bei žmonių sveikatai ir komfortui. POK daro įtaką taršos šaltiniai (pvz.: degimo procesai, maisto ruošą, naminiai gyvūnai, buitinės chemijos naudojimas, emisijos iš baldų ir kitų dangų) ir nuolatinis išorės oro poveikis. Atlikus literatūros analizę, patalpų oro taršos šaltiniai pagal išskiriamos taršos pobūdį buvo suskirstyti į aktyviuosius (žmogaus metabolizmo reakcijų produktai, ventiliacija, maisto gaminimas, rūkymas, oro gaiviklių ir buitinės chemijos naudojimas ir kiti) ir pasyviuosius taršos šaltinius (kilimai / kiliminės dangos, baldai, vinilo tapetai, statybinės medžiagos ir kiti).

Skyrius 1.2. Atlikus literatūros analizę, nustatyta, kad didžiausią įtaką POK daro aktyvūs taršos šaltiniai, kurie per gana trumpą laiką išskiria labai didelę AD ir dujinių teršalų emisiją. Šiuos taršos šaltinius pagal taršos pobūdį galima skirstyti į maisto gamavimo operacijas (virimas, kepimas ir kiti), degimo šaltinius (rūkymas, žvakių ir smilkalų deginimas, židinio kūrenimas ir kiti) ir kitas namų apyvokos operacijas (buitinės chemijos naudojimas, oro gaiviklių naudojimas, dulkių siurbimas ir kiti).

Skyrius 1.3. Literatūros apžvalga patvirtino neigiamą patalpų oro taršos poveikį gyventojų sveikatai. Nepakankama POK gali nulemti tokius sveikatos sutrikimus, kaip kosėjimas, čiaudėjimas, akių ašarojimas, nuovargis, galvos skausmas ir kiti. Ore esančios AD yra laikomos vienais iš pagrindinių patalpų oro teršalų dėl savo kompleksiško ir neigiamo poveikio sveikatai. Smulkią AD frakciją ($AD_{2.5}$) yra siejama su įvairiomis mirtinomis ir nemirtinomis širdies ir kraujagyslių ligomis. Patalpų ore galima išskirti nuo 50 iki 300 skirtingų LOJ, ir šis skaičius tik didėja. Daugelis LOJ junginių pasižymi kancerogeninėmis savybėmis, todėl padidėjusios jų koncentracijos patalpų ore gali smarkiai paveikti gyventojų sveikatą.

Skyrius 1.4. Atsirandant naujiems energijos taupymo standartams, tai neaplenkė ir naujų namų statybos, kur ypač didelis dėmesys skiriamas namo energetiniams poreikiams. Mažai energijos naudojančiuose pastatuose dėl padidėjusio atitvaro sandarumo ir nepakankamos mechaninės ventiliacijos patalpų ore gali atsirasti teršalų sankaupti. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad padidėjusios teršalų koncentracijos tokiuose pastatuose tikėtinos, ypač naujuose mažai energijos naudojančiuose namuose.

Skyrius 1.5. POK valdyti dažniausiai naudojama: ventiliacija (skiedimas lauko oru), oro valymas (tiek tiekiamo lauko oro, tiek naudojant nešiojamuosius valymo įrenginius (NVĮ) patalpose), prevencija – šaltinio kontrolė. Minimalus rekomenduojamas oro kaitos dažnis (OKD) patalpose – $0,5 \text{ h}^{-1}$ (ASHRAE, 2009), tačiau net ir jis gali būti nepakankamas, jeigu patalpose bus stiprus taršos šaltinis. POK valyti dažnai naudojami kompleksinio veikimo nešiojamieji

valymo įrenginiai arba į mechaninę ventiliacijos sistemą instaliuojami oro valymo įrenginiai. Valymo įrenginių veikimas pagrįstas skirtingomis technologijomis: mechanine filtracija; elektrostatine filtracija; adsorbicija; jonizacija; fotooksidacija; ozono gamyba ir kitomis. Prevencijos – šaltinio kontrolė (nerūkyti patalpose, rinktis baldus ir kitas apdailos medžiagas, kurios skleidžia mažiau cheminių medžiagų ir t. t.), oro kokybės gerinimo priemonė yra efektyvi, tačiau riboto panaudojimo.

SKYRIUS 2. TYRIMO METODAI IR MATAVIMAI

Skyrius 2.1. Patalpų oro kokybė mažai energijos naudojančiuose namuose

POK matavimai buvo vykdomi 11 mažai energijos naudojančių namų, esančių Kaune (8 namai) ir Vilniuje (3 namai). Pastatų amžius matavimo metu buvo nuo 2 mėnesių iki 1 metų, taip pat buvo parinkti du nebaigti įrengti (N5 ir N10) ir vienas dešimties metų (N8) senumo namas duomenims palyginti. Namai priskiriami mažai energijos naudojančioms pastatams, visi namai buvo sertifikuoti (STR 2.01.09:2012) ir priskirti B, A ir A+ energetinio suvartojimo klasėms. Visuose namuose buvo instaliuota mechaninė rekuperacinė ventiliacijos sistema. Visi namai, išskyrus du (N5 ir N10), buvo apgyvendinti, o gyventojų skaičius juose kito nuo 2 iki 5 (**1 lentelė**).

1 lentelė. Pagrindinės pastatų charakteristikos

Parametrai	Namo numeris										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Eksplotacijos pradžia	2013 05	2013 08	2013 08	2014 02	Nepa- baigtas	2013 02	2013 05	2004	2011 01	Nepa- baigtas	2014 02
Energetinė klasė	A+	A	A+	B	B	B	A	A	A	A+	A+
Naudingas plotas, m ²	169	77	133	209	182	103	153	149	181	196	199
Bendras energijos suvartojimas, kW/m ²	40	129	34	109	61	107	63	26	98	49	49
Energijos poreikis šildymui, kW/m ²	17	65	15	83	33	77	38	17	55	23	24
Gyventojų skaičius	4	2	4	3	0	2	4	5	2	0	3
Plotas / gyventojų skaičius, m ²	42	39	33	70	-	52	37	30	91	-	66

Patalpų ore buvo matuojamos šių dujų teršalų koncentracijos: policiklinių aromatinių angliavandenilių (PAA), lakiųjų organinių junginių (LOJ),

formaldehido, azoto dioksido (NO₂), anglies dioksido (CO₂) ir anglies monoksido (CO). Dujiniai teršalai buvo matuojami pasyviais ėminių ėmikliais, o CO₂ ir CO koncentracijos bei patalpų komforto parametrai (temperatūra (T) ir santykinė drėgmė (RH) vėsoje ir šiltoje pastato zonoje) buvo įvertinti realaus laiko instrumentais / duomenų kaupikliais. Matavimai buvo atliekami balandžio–rugpjūčio mėnesiais 2014 metais. Dažniausiai patalpų oro ėminių ėmikliai buvo eksponuojami gyvenamajame kambaryje septynių parų laikotarpiu, tačiau keliais atvejais ėmikliai buvo eksponuojami ir pastato koridoriuje.

Dujinės fazės (PAA) koncentracijos buvo tiriamos pusiau pralaidžių membranų (PPM) metodu. Tyrimo metu buvo naudojamos membranos (ExposMeter AB, Švedija), kurios eksponuotos 1 mėn. pasatuose. Vėliau membranos buvo analizuojamos dujų chromatografijos / masių spektrometrijos būdu. Realaus laiko nešiojamasis patalpų oro kokybės matuoklis (HD21AB, Delta Ohm S.r.L., Italija) buvo naudojamas CO₂ ir CO koncentracijų kitimams stebėti. Matavimo aukštis buvo pasirinktas atsižvelgiant į žmogaus kvėpavimo zonos padėtį sėdint, t. y. 1,2–1,5 m virš grindų. Kartu su dujiniais teršalų matavimais buvo fiksuojami ir vidaus aplinkos T bei RH rodmenys, naudojant nešiojamuosius duomenų kaupiklius (DT-172 Logger, Shenzhen Everbest Machinery Industry Co, Ltd, Kinija) vieno mėnesio laikotarpiu.

Šiam tyrimui atlikti buvo sudaryti specialūs būsto klausimynai, siekiant surinkti informaciją, susijusią su pastato statybos ypatumais (pastato amžius, naudotos statybinės medžiagos, pastato vėdinimo ir šildymo sistema, ir kt.) bei gyventojų veikla matavimo laikotarpio metu (maisto ir namų ruoša).

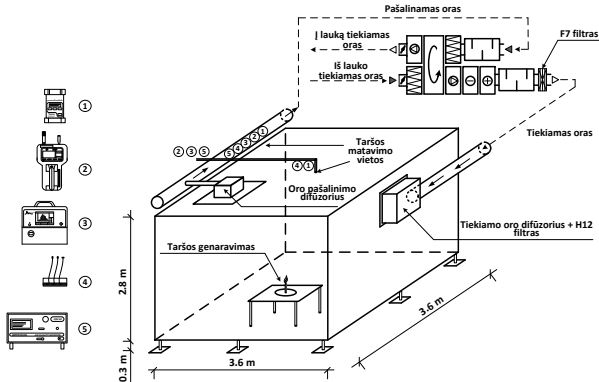
2.2. Aktyvių taršos šaltinių išskiriamos taršos charakterizavimas

Eksperimentams buvo parinkta 20 taršos generavimo veiku: aliejaus virimas; elektrinės plytelės kaitinimas; svogūnų kepimas; tefloninės keptuvės kaitinimas; vandens virimas, žvakių deginimas (aromatinių ir parafino); cigaretės deginimas; smilkalų deginimas; plaukų džiovintuvo naudojimas (dviem režimais); plaukų lako purškimas; oro gaiviklio purškimas; elektrinio oro vėjelio / šildytuvo naudojimas; elektrinio radiatoriaus naudojimas; dulkių siurbimas; grindų plovimas su detergentais; baldų valiklio purškimas; drabužių lyginimas (su garu ir be garo). Taršos generavimo laikas kito nuo 5 sek. (purškimo operacijų metu) iki 20 min. (virimo operacijų metu).

Eksperimentai buvo vykdomai tyrimų kameroje (grindų plotas – 13 m², kameros tūris – 35,8 m³) (**1 pav.**), kuri atitinka tipinį kambarį ir kuri buvo patalpinta 150 m³ tūrio laboratorijoje. Tyrimo kameros sienos, grindys ir lubos buvo pagamintos naudojant tradicines statybines medžiagas (pvz.: dažytos gipso kartono sienos, PVC grindų danga ir t. t.). Tyrimų kamera buvo sujungta su oro tiekimo ir pašalinimo sistema (Gold04, Swegon, Sweden), kuria buvo galima keisti OKD. OKD tyrimų metu buvo $0,5 \pm 0,1 \text{ h}^{-1}$ ir nustatomas panaudojant CO₂

dujų koncentracijos mažėjimo standartinį metodą (ASTM E741–11). Eksperimentai buvo vykdomi 30 min.

Maža AD koncentracija ($< 300 \text{ d/cm}^3$) buvo pasiekama panaudojant F7 klasės filtrą (instaliuotas oro padavimo įrenginyje) ir didelio efektyvumo oro filtrą (HEPA 12, General Filter, Italy), instaliuotą oro tiekimo difuzoriuje.

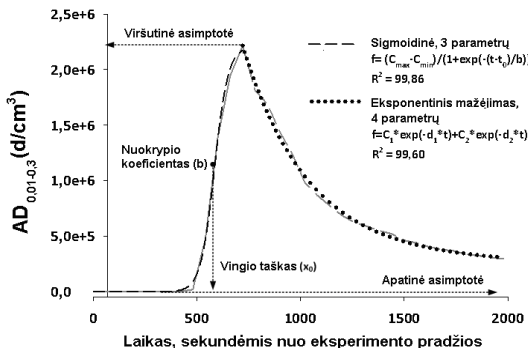


1 pav. Tyrimų kamera su oro tiekimo ir pašalinimo sistema: 1 – nefelometras pDR-1000AN (AD10.0); 2 – optinis aerozolio dalelių skaitiklis 3016 IAQ (AD_{0.3-10.0}); 3 – nanodalelių skaitiklis SMPS-3910 (AD_{0,01-0,3}); 4 – LOJ/T/RH duomenų kaupiklis (LOJ jutiklis – iAQ–2000); 5 – oro kokybės monitorius IQM-60 (CO, CO₂, O₃, NO₂, LOJ, NMHC)

Komercinės skaičiuojamosios skysčių dinamikos (*Commercial computational fluid dynamics* (CFD)) kodas buvo naudojamas prognozuojant teršalų sklaidą tyrimų kameroje. Panaudojant sklaidos rezultatus buvo parinktos taršos matavimo vietos: oro ištraukimo ortakis ir kambario centras prie lubų.

AD koncentracijos matavimai buvo vykdomi panaudojant nanodalelių skaitiklį (SMPS, modelis SMPS 3910, TSI Inc., USA) (AD_{0,01-0,3}), optinį dalelių skaitiklį (OPC, modelis 3016IAQ, Lighthouse worldwide solutions, Fremont, CA, USA) (AD_{0,3-10}) ir nefelometrą (modelis pDR-1000AN, Thermo Fisher Scientific Inc, USA) (AD10). LOJ, ozono, NO₂, CO, CO₂ koncentracijoms matuoti buvo naudojamas oro kokybės monitorius (modelis IQM-60, Aeroqual Limited, New Zealand). Taip pat LOJ koncentracijoms matuoti buvo panaudotas puslaidininkių metalų oksidų jutiklis (iAQ2000, AMS Sensor Solutions Germany GmbH).

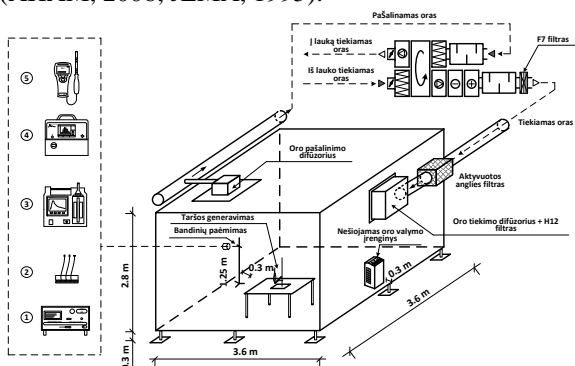
AD koncentracijos kitimas buvo suskirstytas į dvi dalis – AD koncentracijos didėjimo ir AD koncentracijos mažėjimo. AD koncentracijos didėjimo fazė buvo apibūdinta panaudojant logistinę trijų parametru sigmoidinę (S-formos) funkciją, o AD koncentracijos mažėjimas – keturių parametru eksponentinio mažėjimo funkciją (**2 pav.**).



2 pav. AD skaitinės koncentracijos kitimo charakterizavimas aliejaus virimo ant elektrinės viryklės atveju, panaudojant trijų parametru sigmoidinę (AD koncentracijos didėjimas) ir dvigubą keturių parametru eksponentinio mažėjimo (AD koncentracijos mažėjimo) funkcijas. Aliejaus virimo veika buvo vykdoma 15 min., esant 0,5 h⁻¹ OKD

2.3. POK valdymas panaudojant ventiliaciją ir nešiojamuosius oro valymo įrenginius

Eksperimentai buvo vykdomi tyrimų kameroje, kurios pagrindiniai parametrai aprašyti skyriuje – „2.2. Aktyvių taršos šaltinių išskiriamos taršos charakterizavimas“. Tyrimų kameroje (**3 pav.**) NVĮ vieta parinkta remiantis pateiktomis gamintojų rekomendacijomis. POK matuojama priešingoje pusėje nei pastatyti NVĮ, žmogaus kvėpavimo zonoje – 1,25 m aukštyje virš grindų. Kaip taršos šaltinis buvo parinkti cigarečių dūmai, kurie dažniausiai naudojami NVĮ testuoti (AHAM, 2006; JEMA, 1995).



3 pav. Tyrimų kamera su oro padavimo ir pašalinimo sistema: 1 – oro kokybės monitorius IQM-60 (CO, CO₂, O₃, NO₂, VOC, NMHC); 2 – LOJ/T/RH duomenų kaupiklis (LOJ jutiklis – iAQ-2000); 3 – elektrinis žemo slėgio impaktorius ELPI+ (AD_(0,006-10,0)); 4 – nanodalelių skaitiklis SMPS-3910 (AD_{0,01-0,3}); 5 – CO₂ koncentracijos matuoklis 7545 IAQ-CALC

Buvo testuojami trijų skirtingų gamintojų NVĮ, kurių veikimas paremtas skirtingų technologijų deriniu (pvz.: C1 atveju – pradinis filtras (nuo stambiujų dalelių), plaunamas aktyvuotos anglies filtras, HEPA 13 filtras, „Plazmacluster“ technologija). NVĮ kaina kito nuo 500 iki 575 €, o gamintojų deklaruojamas aptarnaujamas plotas – nuo 46 iki 48 m².

AD koncentracijos kitimas buvo matuojamas panaudojant nanodalelių skaitiklį (SMPS, modelis SMPS 3910, TSI Inc., USA) ir elektrinį žemo slėgio impaktorių (ELPI+, Dekati Inc., Finland). LOJ, ozono, NO₂, koncentracijoms matuoti buvo naudojamas oro kokybės monitorius (IQM-60, Aeroqual Limited, New Zealand). LOJ matuoti buvo panaudotas puslaidininkių metalų oksidų jutiklis (iAQ-2000, AMS Sensor Solutions Germany GmbH). CO, CO₂, temperatūrai ir drėgmei matuoti buvo naudojamas oro kokybės monitorius (7545 IAQ-CALC, TSI Inc., USA).

Eksperimentiniai tyrimai buvo suskirstyti į dvi dalis: pirmiausia buvo charakterizuoti NVĮ, veikdami skirtingais režimais (teršalų pašalinimo efektyvumas (E), švaraus oro pateikimo koeficientas (ŠOPK), energijos vartojimo efektyvumo rodiklis (EVE)), o paskui ištirta skirtingų ventiliacijos režimų ir skirtingų NVĮ režimų derinių įtaka oro taršos mažinimui tyrimų kameroje.

Antrojo tyrimų etapo metu buvo atliktas kontroliuojamas eksperimentas ir, pasinaudojant regresijos modeliu ir programinės įrangos paketu (Modde 10, MKS Umetrics, Sweden), ištirtos skirtingų parametrų priklausomybės. Buvo parinkti šie eksperimentiniai kintamieji: vėdinimo intensyvumas (0,2 h⁻¹; 0,6 h⁻¹; 1,0 h⁻¹) ir NVĮ darbo režimai (nenaudojant NVĮ, žemas režimas ir maksimalus režimas), išreikšti santykinė oro kaita h⁻¹, t. y. NVĮ oro srautas padalintas iš kameros tūrio. Buvo atliktas išsamus faktorinis eksperimentas.

2.4. Pilkos dėžės modelis POK valdyti patalpose, paremtas AD ir LOJ koncentracijų matavimu realiu laiku

Kalibruojant pilkos dėžės modelį POK valdyti panaudoti eksperimentiniai rezultatai, gauti atliekant tyrimą, kuris aprašytas skyriuje „2.2. Aktyvių taršos šaltinių išskiriamos taršos charakterizavimas“.

Duomenų analizė grindžiama POK masės balanso modeliu (Hussein et al., 2008). Tokie modeliai yra plačiai taikomi teršalų šaltinių išskiriamos taršos poveikiui bendrai POK apibūdinti bei teršalų koncentracijų kitimui dėl ventiliacijos, nusėdimo ir kitų procesų įvertinti. Masės balanso modelis:

$$\frac{d}{dt} N_p = \lambda P_i N_o - (\lambda + \lambda_d) N_p + S \quad (1)$$

čia: N_p – teršalų koncentracija kamaryje (LOJ – ppm, didžiųjų AD – mg/m³, mažųjų AD – #/cm³), t – laikas (s); N_o – teršalų koncentracija lauko (ventiliacijos tiekiamame) ore (LOJ – ppm, didžiųjų AD – mg/m³, mažųjų AD – #/cm³); P_i – tiekiamo oro srautas (m³); λ – oro kaitos dažnis (s⁻¹); λ_d – aerozolio

dalelių nusėdimo greitis (s^{-1}), S – taršos šaltinio intensyvumas (LOJ – ppm/s, didžiųjų AD – mg/m^3s , mažųjų AD – $\#/cm^3s$).

Šio eksperimento metu buvo atliktos kelios prielaidos: 1 – tiekiamas neužterštas lauko oras (tiekiamas oras buvo valomas panaudojant HEPA filtrą); 2 – oro kaitos dažnis, didesnis nei $0,5 h^{-1}$, tada $\lambda_d \ll \lambda$; 3 – taršos šaltinis yra nepastovus. Atsižvelgus į pateiktas prielaidas (1), lygtį galima transformuoti taip:

$$\frac{dN_p}{dt} + \lambda(t)N = S(t) \quad (2)$$

Taršos kitimas laike aprašomas panaudojant šią lygties funkciją $f(t)$:

$$f(t) = \frac{0,5a_0}{1 + \exp \frac{t_1 - t}{b}} (\operatorname{sgn}(t_1 - t) + 1) + \sum_{i=2} a_i \exp(-b_i(t - t_{i-1})) \frac{(\operatorname{sgn}(t - t_{i-1}) + 1)(\operatorname{sgn}(1 - (t_i - t)))}{4} \quad (3)$$

čia: a_0 ir b sigmoidinės funkcijos parametrai, apibūdinantys teršalų koncentracijos didėjimą, a_i ir b_i eksponentinės funkcijos parametrai, apibūdinantys teršalų koncentracijos mažėjimą.

3. REZULTATAI

3.1. POK mažai energijos naudojančiuose namuose

3.1.1. Patalpų mikroklimatas

Patalpų oro drėgmė (40–60 proc.) namuose atitiko komforto reikalavimus (HN 42:2009). Nustatyta terminė aplinka ne visais atvejais buvo komfortiška, ir tik trijuose namuose maksimali užfiksuota temperatūra neviršijo $25 ^\circ C$. Daugelyje namų buvo užfiksuota maksimali temperatūros vertė, kuri viršijo $27 ^\circ C$. Šie rezultatai rodo, kad šių mažai energijos vartojančių namų atitvarai sudaro sąlygas patalpų perkaitimui (vasaros sezono metu), ir gali atsirasti papildomas energijos poreikis tokioms patalpoms vėsinti. Siekiant to išvengti reikia didesnę dėmesį skirti tokių namų projektavimui ir projektuojant panaudoti inžinerines priemones, kad vasaros sezono metu saulė neprišildytų tokių namų patalpų.

Nustatytas vidutinis OKD daugeliu atvejų buvo žemas (mediana $0,2 h^{-1}$) ir kito nuo $0,08$ iki $0,69 h^{-1}$. Tačiau tai mažai paveikė vidutinę patalpų oro CO_2 koncentraciją, kuri kito nuo 439 ppm (N5) iki 1117 ppm (N2), tą labiausiai lėmė aukšta santykio tarp patalpų ploto ir gyventojų skaičiaus (kito nuo 30 iki $70 m^2/gyventojui$) vertė, dėl kurios iškvepiamas oras efektyviai prasiskiedavo.

Išmatuotos NO_2 koncentracijos buvo mažos ir neviršijo ribinių verčių (nuo $1,0 \mu g/m^3$ (N10) iki $5,4 \mu g/m^3$ (N10)), tai rodo, kad šie namai yra nutolę nuo intensyvių transporto srautų ir jie nedaro įtakos šių namų POK. Nustatyta didelė formaldehido koncentracija (nuo $3,3 \mu g/m^3$ (N10) iki $52,3 \mu g/m^3$ (N7) (mediana

30,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) kelia susirūpinimą, nes daugeliu atvejų viršijo ribinę vertę – 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (HN 35:2002). Didelė formaldehido koncentracija veikiausiai rodo didelę šio junginio emisiją iš naujos statybos namų vidinių paviršių (dažų, grindų dangos, baldų). Anksčiau Lietuvoje atliktų tyrimų senos statybos gyvenamosiose patalpose duomenimis, nustatyta vidutinė formaldehido koncentracija buvo daugiau nei du kartus mažesnė – 23,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Du et al. 2014). Bendra BTEX junginių koncentracija namuose kito nuo 1,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (N10) iki 66,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (N5) ir neviršijo rekomenduojamų verčių, išskyrus N4 name (1092,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), kuriame matavimo laikotarpiu buvo atlikti interjero įrengimo darbai.

Antrojo tyrimų etapo metu stebint BTEX junginių koncentracijų pokytį (N4) (2 lentelė) 5 savaites patalpų ore iš karto po visų apdailos ir baldų instaliavimo darbų, buvo nustatytos labai didelės šių junginių koncentracijos. Laikui bėgant buvo pastebimas BTEX junginių koncentracijų mažėjimas, ir 4 savaitę nuo matavimų pradžios buvo užfiksuotos ribinių verčių neviršijančios vertės. Tai parodo, kad, siekiant išvengti neigiamo POK poveikio gyventojų sveikatai, POK tyrimai turi būti viena iš pastatų sertifikavimo dalių.

2 lentelė. LOJ koncentracijų kitimas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 5 savaites po interjero įrengimo darbų

Savai- tės	Benze- nas	Etil- benzenas	Toluenas	o- Ksilenas	p- Ksilenas	BTEX	Stire- nas	TCE	PCE
1	16,6	126,3	812,4	100,9	188,8	1366	60,6	4,9	5,2
2	3,1	75,5	377,5	66,4	113,4	753,7	58,9	7	3,9
3	24,4	32,1	113,3	35,3	53	295	18,4	9,1	1
4	10,2	14,7	19	10,6	24,9	82,3	1,5	8,5	1,2
5	7,2	2,5	13,1	2,3	4,2	31,8	1,2	17	2

3.1.2. PAA (PAHs, PCBs, ir HCB)

Suminė PAA koncentracija namuose buvo pasiskirsčiusi gana tolygiai ir kito nuo 29,7 (N10) iki 94,3 (N5) ng/PPM/d, ir tai yra truputį daugiau nei atliekant ankstesnius tyrimus Kaune (Kaunelienė et al., 2015), kai buvo nustatytas suminis PPA kiekis membranose 14–19 ng/PPM/d. Strandberg et al. (2006) nustatė panašius PAA kiekius 30–60 ng/PPM/d Švedijoje namų, kuriuose nekūrenamas biokuras, patalpų ore. Nustatytas daug didesnis suminių alkilintų PPA kiekis, palyginti su suminiu PPA, didžiausios užfiksuotos koncentracijos buvo fenantreno (441–1270 ng/PPM/d), fluoreno (59–651 ng/PPM/d), naftaleno (53–409 ng/PPM/d) ir fluoranteno (56–180 ng/PPM/d). Alkilintų PPA kiekiai yra panašūs, kaip ir Stranberg et al. (2006) tyrime.

3.2. Aktyvių taršos šaltinių charakterizavimas

3.2.1. Aktyvių taršos šaltinių aerozolio dalelių emisija

Didžiausia nustatyta mažųjų AD skaitinė koncentracija ($AD_{0,01-0,3}$, išmatuota naudojant SMPS-3910) buvo eksploatuojant terminius taršos šaltinius, tokius kaip: oro džiovituvo naudojimas maksimaliu režimu ($4,28 \times 10^6$ d/cm³, moda – 21 nm); tefloninės keptuvės kaitinimas ant elektrinės plytelės ($2,58 \times 10^6$ d/cm³, moda – 37 nm); kepančią svogūnų ($1,17 \times 10^6$ d/cm³, moda – 49 nm) (**2 lentelė**).

Didžiausia nustatyta didesniųjų AD skaitinė koncentracija ($AD_{0,3-10}$, išmatuota OPC) buvo verdant aliejų – $1,82 \times 10^3$ d/cm³. Taip pat buvo nustatytos gana didelės koncentracijos degant cigaretei ($1,25 \times 10^3$ d/cm³) ir smilkalams ($1,02 \times 10^3$ d/cm³) (**2 lentelė**).

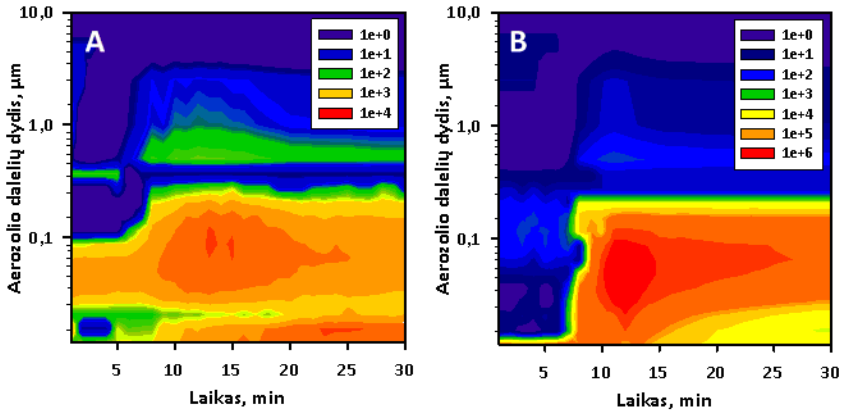
2 lentelė. Nustatytos maksimalios AD skaitinės koncentracijos tiriant 20 skirtingų veikų, matavimai vykdyti oro ištraukimo ortakyje. Lentelėje greta nustatytų maksimalių verčių pateikti ir standartiniai nuokrypiai (SN).

Patalpų oro taršos šaltiniai	$AD_{0,01-0,3} C_{max} \pm$ SN $\times 10^3$, d/cm ³	$AD_{0,3-10} C_{max} \pm$ SN, d/cm ³
Aliejaus virimas ant elektrinės plytelės	1555±279	1824±506
Elektrinės plytelės naudojimas	35±7	3±2
Svogūnų kepinimas tefloninėje keptuvėje ant elektrinės plytelės	1175±144	649±362
Tefloninės keptuvės kaitinimas ant elektrinės plytelės	2583±328	576±145
Vandens virimas ant elektrinės plytelės	411±49	172±42
Aromatinės žvakės deginimas	392±47	23±7
Cigaretės deginimas	543±113.4	1253±421
Smilkalų deginimas	63±11	1015±150
Parafino žvakės deginimas	399±32	25±8
Plaukų džiovituvo naudojimas (maksimaliu režimu)	4277±589	13±5
Plaukų džiovituvo naudojimas (minimaliu režimu)	863±135	6±3
Plaukų lako purškimas	7±1	378±82
Oro gaiviklio (aerozolio) naudojimas	1±0,1	31±14
Elektrinio oro šildytuvo (vėjelio) naudojimas	252±44	2±1
Elektrinio radiatoriaus naudojimas	4±0,6	4±1
Dulkių siurbimas	1,5±0,1	2±1
Grindų plovimas su detergentais	17±3	3±2
Baldų valiklio naudojimas	6±0,6	70±16
Drabužių lyginimas su garais	3±0,58	61±12
Drabužių lyginimas be garų	19±2,4	6±2

3.2.2. Taršos šaltinių išskiriamos taršos kitimas laike

Vertinant AD skaitinės koncentracijos kitimą laike buvo pastebėti AD transformacijos procesai, tokie kaip AD nukleacija, augimas ir koaguliacija. Nukleacijos ir AD skaitinės koncentracijos augimas ypač pasireiškia testuojant

taršos šaltinius, kurie išskiria daug LOJ (4 pav. A). Ypač smulkių AD formavimasis pasireiškia po 10–15 min. nuo taršos operacijos pradžios (4 pav. A). Dauguma taršos šaltinių generavo daug $AD_{0,01-0,3}$, kurių koncentracija išliko didelė net ir po 30 min., esant $0,5 \text{ h}^{-1}$ OKD (4 pav. B).



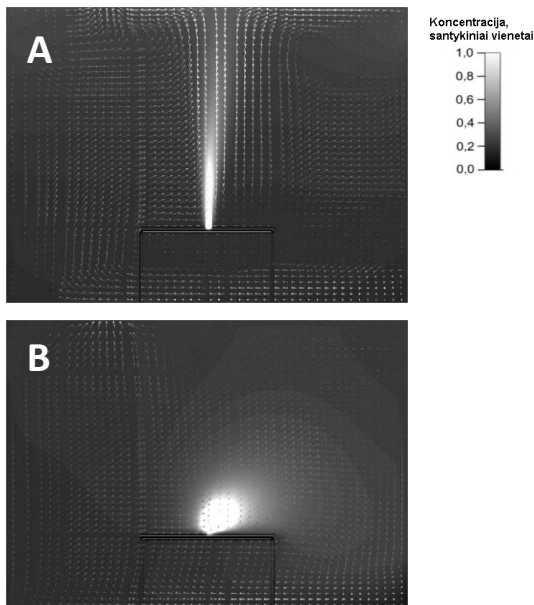
4 pav. AD skaitinės koncentracijos kitimo dinamika plaukų lako purškimo (A) ir svogūnų kepimo tefloninėje keptuvėje (B) bandymų metu ($DN/d\log Dd$, d/cm^3)

Analizuojant $AD_{0,01-0,3}$ ir $AD_{0,3-10}$ skaitinių koncentracijų didėjimą ir mažėjimą, visi taršos šaltiniai buvo suskirstyti į sparčiuosius procesus (maksimali $AD_{0,01-0,3}$ koncentracija užfiksuojama po 1–2 min. nuo taršos veikos pradžios) ir lėtuosius procesus (po 7–25 min.). Pagal nuokrypio koeficiento vertę b (reprezentuojančio AD koncentracijos didėjimo greitį) iš sigmoidinės funkcijos greitiesiems taršos šaltiniams priskiriami tie, kurių $b \leq 30$, ir lėtiesiems, kurių $b \geq 30$. Greitiesiems taršos šaltiniams priskirti daugiausia terminiai šaltiniai (elektrinės plytelės naudojimas maistui gaminti, elektrinis oro šildytuvai (vėjelis), lyginimas be garų ir t. t.), taip pat plaukų džiovintuvo (maksimaliu režimu) naudojimas. Tokios taršos veikos, kaip plaukų lako, baldų valiklių, oro gaiviklio (aerolio) naudojimas (purškimas), dulkių siurbimas, grindų plovimas su detergentais, buvo priskirti prie lėtųjų procesų, nes didžiausia AD koncentracija buvo užfiksuojama praėjus 20–25 min. nuo eksperimento pradžios.

3.2.3. Skirtingų taršos matavimo vietų palyginimas: oro ištraukimo ortakyje ir kambario centre prie lubų

Dvi skirtingos matavimo vietos – oro ištraukimo ortakis ir kambario centras prie lubų – buvo pasirinktos tyrimui atlikti kaip galimos POK jutiklių įrengimo vietos. Taršos matavimas mechaninės ventilacijos oro ištraukimo ortakyje patogu tuo, kad pašaliname iš patalpų ore tarša yra koncentruota, matavimo priemonės gali panaudoti mechaninės ventilacijos sukuriamą srautą, atsisakant

bandinių ėmimo siurblių, kurie skleidžia triukšmą. O kambario centras prie lubų jau seniai yra naudojamas įvairiems jutikliams įrengti (pvz., dūmų detektoriams). Atliktas kameros srautų CFD modeliavimas patvirtino spėjimus apie taršos koncentravimąsi tam tikrose tyrimo kameros vietose (**5 pav.**).

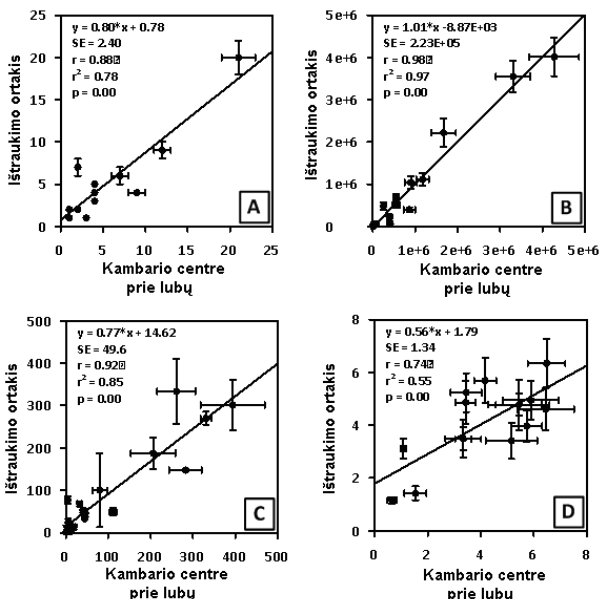


5 pav. AD koncentracijos kitimo kameroje CFD modeliavimo rezultatai, esant terminiam (A) ir neterminiam (B) taršos šaltiniui

Analizuojant $AD_{0,01-0,3}$ koncentracijų aptikimo laikus skirtingose matavimo vietose (**6 pav. A**) buvo nustatyta, kad kambario centre prie lubų šis laikas truputį trumpesnis, t. y. $R^2 = 0,88$. Aptikimo (AD koncentracijos didėjimo užfiksavimo) trukmė svyravo nuo mažiau nei minutės (cigarečių deginimas, smilkalų, parafino ir aromatinių žvakių deginimas) iki kelių dešimčių minučių (pvz., plaunant grindis su detergentais).

6 pav. (B) parodo skirtumą tarp užfiksuotų maksimalių $AD_{0,01-0,3}$ skirtingose matavimo vietose. Duomenų pasikartojimas skirtingose matavimo vietose buvo labai didelis ($R^2 = 0,98$). Analizuojant nuokrypio koeficiento b (iš sigmoidinės lygties) vertes (**6 pav. C**) buvo nustatytas geras atitikimas tarp skirtingose matavimo vietose nustatytų verčių ($R^2 = 0,85$). Analizuojant $AD_{0,01-0,3}$ mažėjimo greičių ryšius skirtingose matavimo vietose (**6 pav. D**), buvo nustatytas mažesnis

pasikartojimas ($R^2 = 0,55$), tačiau pakankamas, kad būtų nustatytas statistiškai reikšmingas ryšys ($p < 0,05$).

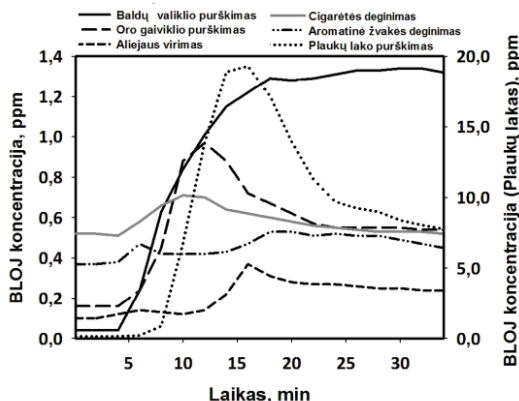


6 pav. Koreliacija tarp $AD_{0,01-0,3}$ aptikimo laiko (A, min.), maksimalios užfiksuotos $AD_{0,01-0,3}$ koncentracijos (B), nuokrypio koeficiento b (C) ir $AD_{0,01-0,3}$ koncentracijos mažėjimo greičio (D), skirtingose matavimo vietose: oro ištraukimo ortakyje ir kambario centre prie lubų

3.2.4. Aktyvių taršos šaltinių LOJ emisija

Tiriant bendrą LOJ (BLOJ) koncentraciją imituojujant skirtingas taršos veikas buvo nustatyta, kad didžiausią BLOJ emisiją sudaro plaukų lako purškimo veika, kurios metu BLOJ koncentracija padidėja iki 19,16 ppm daugiau nei foninė koncentracija. Taip pat BLOJ gana nemažai padidėjo purškiant baldų valiklį (1,3 ppm), purškiant oro gaiviklį (0,81 ppm) bei verdant aliejų (0,27 ppm).

7 pav. pateiktos nustatytų didžiausių BLOJ koncentracijų taršos kitimo dinamika, esant $OKD 0,5 h^{-1}$.



7 pav. BLOJ kitimo dinamika atliekant skirtingas patalpų oro taršos veikas

3.3. POK valdymas panaudojant ventiliaciją ir oro valymą

3.3.1. NVĮ charakterizavimas

3 lentelėje pateiktos tiek gamintojo nurodytos, tiek išmatuotos – apskaičiuotos NVĮ charakteristikos. Nustatytos skirtingos NVĮ energetinės sąnaudos, kurios kito nuo 6,2 (C1) iki 34,7 W (C3) NVĮ dirbant žemu režimu ir nuo 15,5 (C1) iki 109 W (C3) NVĮ dirbant maksimaliu režimu. Nustatytas suvartojamas energijos kiekis nekoreliavo tiesiogiai su oro debitu, kuris praeina pro NVĮ, ir kito nuo 75 iki 126 m³h⁻¹ NVĮ veikiant žemu režimu, ir nuo 120 iki 276 m³h⁻¹ NVĮ dirbant maksimaliu režimu.

Nustatytas ŠOPK_{AD} taip pat smarkiai svyravo ir buvo gerokai mažesnis nei oro debitas, praeinantis pro valymo įrenginius. AD iš kameros oro efektyviausiai šalino C1 įrenginys (ŠOPK_{AD} kito nuo 77±5 iki 237±11 m³h⁻¹). Tai patvirtino ir nustatytos didelės efektyvumo (E_{AD}) vertės (78–97,2 proc.). Tuo pačiu metu buvo nustatyta, kad C3 įrenginys prasčiausiai šalina AD (ŠOPK_{AD} kito nuo 37±4 iki 69±9 m³h⁻¹, E_{AD} kito nuo 53,8 iki 73,7 proc.) (**3 lentelė**).

Nustatytas gerokai mažesnis LOJ pašalinimo efektyvumas nei AD atveju. NVĮ C1 buvo mažiausiai efektyvus (ŠOPK_{LOJ} svyravo nuo 2,6±0,4 iki 7,6±1,4 m³h⁻¹, E_{LOJ} kito nuo 21,4 iki 33,1 proc.), o C3 buvo efektyviausias (ŠOPK_{LOJ} svyravo nuo 11,2±1,1 iki 19,9±2,8 m³h⁻¹, E_{LOJ} kito nuo 38,8 iki 45,7 proc.). Nors visi NVĮ LOJ koncentracijoms mažinti naudojo skirtingus technologijų derinius, tačiau pagrindas LOJ skaidyti yra ozono gamyba. NVĮ C3 konfigūracija buvo technologiškai efektyviausia, tačiau ir energijos naudojo daugiausia, dėl to jo EVE_{LOJ} buvo pats mažiausias – 0,19 m³h⁻¹W⁻¹ (**3 lentelė**).

3 lentelė. Testuojamų nešiojamųjų valymo įrenginių (NVI) pagrindinės charakteristikos: energijos suvartojimas, oro debitas, švaraus oro pateikimo koeficientas ($\dot{S}OPK_{AD}$ – aerosolio dalelių, $\dot{S}OPK_{LOJ}$ – lakiųjų organinių junginių), teršalų pašalinimo efektyvumas (E_{AD} – aerosolio dalelių, E_{LOJ} – lakiųjų organinių junginių), energijos vartojimo efektyvumo (EVE_{AD} – aerosolio dalelių, EVE_{LOJ} – lakiųjų organinių junginių) (SN – standartinis nuokrypis).

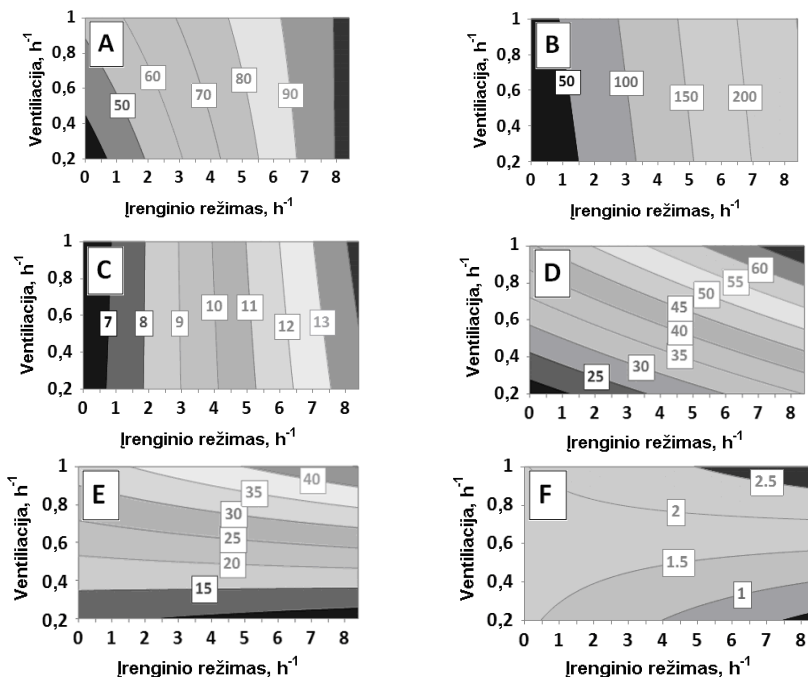
Įrenginiai	Veikimo režimas	Energijos suvartojimas ^a , W	Energijos suvartojimas ^b , W	Oro debitas ^a , m ³ h ⁻¹	Oro debitas ^b , ± SN, m ³ h ⁻¹	$\dot{S}OPK_{AD}^b$, ± SN ^a , m ³ h ⁻¹	$\dot{S}OPK_{LOJ}^b$, ± SN ^a , m ³ h ⁻¹	E_{AD}^b ± SN ^a , proc.	E_{LOJ}^b ± SN ^a , proc.	EVE_{AD}^b , m ³ h ⁻¹ W ⁻¹	EVE_{LOJ}^b , m ³ h ⁻¹ W ⁻¹
C1	žemas	~5.3	6.2	94	97±1.7	77±5	2.6±0.4	78.0±1.4	21.4±2.7	14.53	0.49
	maksimalus	~22	22.8	270	276±3.2	237±11	7.6±1.4	97.2±2.2	33.1±4.9	10.72	0.34
C2	žemas	~10	9.6	130	126±1.2	106±8	2.2±0.3	81.5±1.6	30.7±2.7	14.58	0.99
	maksimalus	~16	15.5	210	204±2.4	153±7	8.2±1.7	90.2±1.8	36.2±5.1	15.62	1.1
C3	žemas	~35	34.7	N/A	75±1.5	37±4	11.2±1.1	53.8±0.9	38.8±4.3	1.05	0.31
	maksimalus	~100	109	N/A	120±2.8	69±9	19.9±2.8	73.7±1.9	45.7±6.4	0.64	0.19

^a gamintojo pateikiama informacija;

^b išmatuota.

3.3.2. Kombinuotas ventiliacijos ir valymo įrenginių poveikis

Analizuojant modeliavimo rezultatus, kur pateikiama ventiliacijos ir NVĮ skirtingų režimų įtaka teršalų pašalinimui (**8 pav.**), buvo nustatyta, kad AD pašalinimui įtakos turėjo tiek naudojama ventiliacija, tiek NVĮ. Analizuojant regresiniuose grafikuose pateiktus duomenis nustatyta, kad AD pašalinimui didesnę įtaką darė ventiliacijos didinimas, pvz., E_{AD} padidėjimą nuo 40 iki 50 proc. būtų galima pasiekti keičiant ventiliacijos intensyvumą nuo 0,4 iki 0,9 h^{-1} nenaudojant valymo įrenginių. Tas pats efektyvumas galėtų būti pasiekiamas didinant NVĮ oro srautą nuo 0,7 iki 1,9 h^{-1} ir esant minimaliai ventiliacijai. Nors ventiliacija atrodo efektyvesnė AD koncentracijai mažinti, tačiau jos veikimas gyvenamuosiuose pastatuose yra ribotas (dažniausiai iki 1 h^{-1} , išskyrus virtuvės patalpą, kur panaudojus gartraukį galima pasiekti iki 20 h^{-1}), todėl efektyviai pašalinti AD iš patalpų oro naudojant tik ventiliaciją neįmanoma. Panaudojant minimalią ventiliaciją ir maksimalų NVĮ režimą, jau po 30 min. AD koncentracija patalpoje sumažėja nuo 75 iki 90 proc.



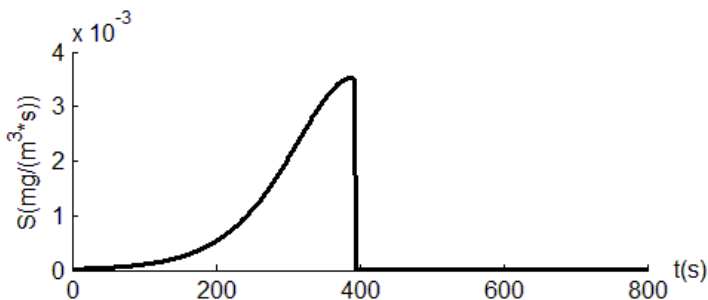
8 pav. Taršos rodiklių prognozė panaudojant vėdinimo intensyvumo ir NVĮ režimų pokyčius (C1): A – E_{AD} (proc.); B – $\dot{S}OPK_{AD}$ (m³h⁻¹); C – EVE_{AD} (m³h⁻¹W⁻¹); D – E_{LOJ} (proc.); E – $\dot{S}OPK_{LOJ}$ (m³h⁻¹); F – EVE_{LOJ} (m³h⁻¹W⁻¹). Prietaiso režimas atspindi oro kaitos normą, kurią jis sukuria, h⁻¹

LOJ pašalinimui iš tyrimų kameros oro didesnę įtaką darė ventiliacija nei NVĮ (8 pav.). Tai patvirtina ir NVĮ testavimo rezultatus, kur buvo nustatyta, kad NVĮ prastai skaido LOJ. Mechaninės ventiliacijos norma 1 h^{-1} be valymo įrenginių pasiekia $E_{\text{LOJ}} \sim 40\text{--}45\text{proc.}$, o tas pats E_{LOJ} pasiekiamas aktyvuojant $\sim 9 \text{ h}^{-1}$ valymo intensyvumą (esant minimaliai ventiliacijai). Naudojant tik maksimalią ventiliaciją galima pasiekti iki $E_{\text{LOJ}} 40\text{--}45\text{proc.}$, o naudojant maksimalią ventiliaciją ir maksimalų NVĮ darbo režimą E_{LOJ} po 30 min. padidėja iki 60 proc.

3.4. Pilkos dėžės modelis POK valdyti panaudojant realaus laiko AD ir LOJ matavimo duomenis

3.4.1. Teršalų koncentracijos kitimas kambaryje ir taršos šaltinio išskiriama tarša

Teršalų koncentracijos didėjimas / mažėjimas tyrimų kameroje, atliekant skirtingas veikas, buvo apibūdintas panaudojant sigmoidinę ir eksponentinio mažėjimo funkcijas. Tyrimų metu buvo nustatyta, kad skirtingų taršos skleidimo operacijų metu teršalų kitimo dinamika labai skyrėsi, tai parodo, kad taršos šaltiniai nėra nuolatiniai, t. y. jų išskiriamos taršos dydis kinta laike. Pagal AD emisiją taršos šaltiniai buvo suskirstyti į lėtusius ir greituosius (Čiužas et al., 2015). Tas pats gali būti atliekama ir panaudojant LOJ koncentracijų kitimo analizę. Šis tyrimas panaudojo ankstesnio tyrimo duomenis ventiliacijos pagrindu parentam POK valdymui modeliuoti. Vienas iš tokių taršos šaltinio išskiriamos taršos pavyzdžių yra pateiktas 9 pav., čia aiškiai matoma, kad AD koncentracija palaipsniui didėja (bandymo pradžios laikas $t = 0 \text{ s}$) ir sparčiai sumažėja, kai procesas nutraukiamas. Panašūs rezultatai gauti ir kitais atvejais.

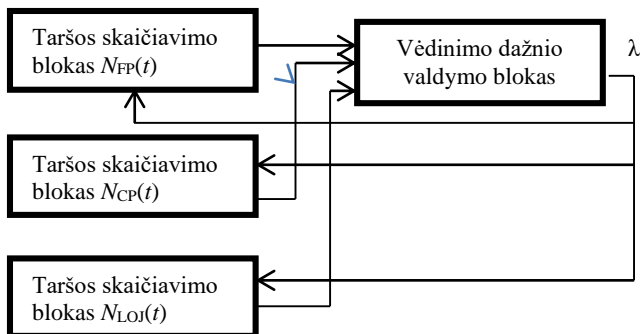


9 pav. Kepant svogūnus nustatyta didžiųjų AD ($AD_{0,3-10}$) emisijos variacija

3.4.2. POK valdymo modelio sudedamosios dalys

POK valdymo modelį, parentą realaus laiko didžiųjų ir mažųjų AD, bei LOJ koncentracijų matavimu, sudaro trys blokai, kurių kiekvienas atspindi skirtingus

teršalus. Šie trys blokai pateikia signalą į valdymo bloką, kuriame gauta vertė palyginama su užsiduotomis ribinėmis vertėmis (**10 pav.**).



10 pav. POK valdymo modelio struktūra (FP – mažosios AD, CP – didžiosios AD, LOJ – lakūs organiniai junginiai, $N(t)$ – koncentracijos kitimas laike)

POK valdymo modelio tikslas yra maksimaliai sumažinti laiką, kai teršalų koncentracija viršys užsiduotas ribines vertes, todėl ventiliacijos intensyvumas turi būti didinamas, kol teršalų koncentracija didėja, ir atvirkščiai. Ventiliacijos intensyvumas kontroliuojamas panaudojant šia išraišką:

$$\lambda_i = \lambda_{i-1} + \Delta\lambda \frac{1 + \operatorname{sgn}(\Delta N_m - \Delta N)}{2} \operatorname{sgn}(\Delta N_m - \Delta N) \frac{1 + \operatorname{sgn}(\lambda_{\max} - \Delta\lambda - \lambda_{i-1})}{2} \quad (4)$$

$$\operatorname{sgn}(\lambda_{\max} - \Delta\lambda - \lambda_{i-1}) + \Delta\lambda (1 - \operatorname{sgn} \beta) \frac{1 + \operatorname{sgn}(\lambda_{\max} - \Delta\lambda - \lambda_{i-1})}{2}$$

$$\operatorname{sgn}(\lambda_{\max} - \Delta\lambda - \lambda_{i-1}) - \Delta\lambda \frac{1 - \operatorname{sgn}(\Delta N_m + \Delta N)}{2} \operatorname{sgn}(\Delta N_m + \Delta N) \beta$$

čia: $\Delta\lambda$ – ventiliacijos intensyvumo keitimo žingsnis (s^{-1}), λ_{\max} – maksimali galima λ vertė (s^{-1}), $\Delta N_{FP} = N_{FP}(t_{i-1}) - N_{FP}(t_{i-2})$, $\Delta N_{CP} = N_{CP}(t_{i-1}) - N_{CP}(t_{i-2})$, $\Delta N_{LOJ} = N_{LOJ}(t_{i-1}) - N_{LOJ}(t_{i-2})$ – mažųjų ir didžiųjų aerozolio dalelių, bei LOJ koncentracijos kitimas (didėjimas arba mažėjimas), ΔN – maksimalus mažųjų ir didžiųjų bei LOJ koncentracijos pokytis (mažųjų AD – $\#/m^3$, didžiųjų AD – mg/m^3 , LOJ – ppm), ΔN_m – teršalų ribinė vertė (ventiliacijos norma didinama kai ΔN viršija šią vertę), β – sąlyga, kad nė vieno teršalo koncentracija neviršys nustatytų ribinių verčių.

$$\beta = \frac{1 + \operatorname{sgn}(N_{FPn} - N_{FP})}{2} \operatorname{sgn}(N_{FPn} - N_{FP}) \times \frac{1 + \operatorname{sgn}(N_{CPn} - N_{CP})}{2} \operatorname{sgn}(N_{CPn} - N_{CP}) \times \quad (5)$$

$$\frac{1 + \operatorname{sgn}(N_{VOCn} - N_{VOC})}{2} \operatorname{sgn}(N_{VOCn} - N_{VOC})$$

čia: N_{FP} , N_{CP} ir N_{VOC} – tai mažųjų, didžiųjų aerozolio dalelių ir LOJ koncentracijos (mažųjų AD – $\#/cm^3$, didžiųjų AD – mg/m^3 , LOJ – ppm), N_{FPn} , N_{CPn} ir N_{VOCn} – atitinkamos ribinės vertės.

Taigi visą modeliavimo proceso eigą galima apibendrinti taip:

1. Teršalų koncentracijos kitimas tyrimų kameroje buvo matuojamas esant pastoviam oro kaitos dažniui;
2. Teršalų koncentracijos kitimas buvo aprašytas (aproksimuotas) panaudojant lygties funkciją $f(t)$ (3);
3. Taršos šaltinio intensyvumo $S(t)$ kitimas buvo apskaičiuojamas panaudojant lygties funkciją (2);
4. Oro kaitos norma siekiant sumažinti teršalų koncentracijas buvo keičiama panaudojant lygtį (4).

3.4.3. Modeliavimo rezultatai

Taršos šaltiniai buvo suskirstyti į dvi grupes – maisto ruošimo veikas (įskaitant ir cigarečių degimą) ir ne maisto gaminimo veikas. Taip padaryta todėl, kad virtuvėse panaudojant gartraukį OKD galima smarkiai padidinti, o kitose patalpose OKD didinimas yra ribotas. Modeliuojant buvo panaudoti šie didžiausios ventilacijos lygiai: pirmajai grupei – 20 h^{-1} ($\lambda_{1\max}$) ir antrajai grupei – 4 h^{-1} ($\lambda_{2\max}$). Įprastai patalpose OKD būna apie $0,5\text{ h}^{-1}$. Buvo sumodeliuoti visi galimi variantai, esant šioms ribinėms vertėms: mažųjų AD koncentracija – $10000\text{ d}/cm^3$, didžiųjų AD koncentracija – $0,05\text{ mg}/m^3$; LOJ koncentracija – 1000 ppm CO_2 ekvivalento.

Rezultatų analizė parodė, kad, pvz., deginant smilkalus (išskiria daug mažųjų AD), ribinė mažųjų AD koncentracija bus pasiekama po 25 min. ($\lambda_{s\max} = 4\text{ h}^{-1}$) nuo taršos operacijos pradžios. O esant vėdinimo dažniui, lygiam 1 h^{-1} , ribinė vertė būtų pasiekama po 105 min. Nors vėdinimo standartai ir nereglamentuoja, per kiek laiko turi būti pasiekama gera POK nuo taršos epizodo pradžios, tačiau tokio realaus laiko modeliavimas ir vėdinimo dažnio keitimas leistų optimizuoti vėdinimo įrenginio veikimą ir jo sunaudojamą energijos kiekį.

Kai kurių taršos šaltinių įtaką POK yra sunku efektyviai valdyti, net ir panaudojus didžiausią ventilacijos normą, pvz., purškiant plaukų laką mažųjų AD koncentracija išlieka padidėjusi net ir po 120 min. vėdinimo sistemai veikiant maksimaliu režimu, tą nulemia dėl cheminių junginių ir ozono atsirandančios mažosios AD. Tais atvejais, kai patalpų taršos šaltinis ilgam laikui gali paveikti POK, yra būtina tokią taršos veiką perkelti į virtuvės patalpą, kur, panaudojus gartraukį, šaltinio poveikis bendrai POK būtų maksimaliai sumažinamas.

Pateiktas modeliavimo metodas gali turėti keletą trūkumų. Pirma, pilkos dėžės POK valdymo modelis buvo sukurtas ir atliktas modeliavimas panaudojant duomenis, kurie buvo gauti esant kontroliuojamoms sąlygoms, t. y. tarša imituota tyrimų kameroje. Tyrimų kamera atitiko standartinio kambario sąlygas,

tačiau realioje gyvenamojoje aplinkoje laisvės laipsnių skaičius, darantis įtaką POK, yra daug didesnis, įskaitant skirtingas vėdinimo normas skirtingose patalpose, skirtingus taršos šaltinius, veikiančius vienu metu (tiek aktyvūs, tiek pasyvūs taršos šaltiniai), teršalų kaupimąsi, dispersiją ir t. t. Siūlomas valdymo algoritmas bendrai POK valdymo koncepcijai, kad tiekiamo oro kiekis turi būti didinamas, kai teršalų koncentracija didėja, ir atvirkščiai. Pilkos dėžės POK valdyti modelis gali būti priskirtas prie hibridinių modelių.

4. DISKUSIJA IR GAUTŲ REZULTATŲ PRITAIKOMUMO REKOMENDACIJOS

Oro teršalų matavimo technologijos

Norint efektyviai valdyti POK, neužtenka matuoti tik patalpų oro temperatūrą, drėgmę ar CO₂ koncentraciją, nes šie parametrai iki galo neatspindi patalpų oro taršos. Teršalai patalpų viduje būna tiek dujų, tiek AD fazės. Rekomenduojama realiu laiku matuoti AD (nano- ir didžiųjų) bei LOJ koncentracijas. AD koncentracijoms matuoti naudojama daug skirtingų metodų, tačiau tik maža jų dalis gali būti integruoti į POK valdymo sistemas. Pagrindiniai veiksniai, ribojantys jų integravimo galimybes, yra prietaisų kaina, techninė priežiūra bei matavimų metu skleidžiamas triukšmas.

Matavimo metodų apžvalga parodė, kad nefelometrija gali būti tinkamiausias metodas AD matuoti. Šis metodas fiksuoja AD nuo 0,3 μm, todėl negali įvertinti nanodalelių, tai ir yra pagrindinis šio metodo trūkumas. Šiuo metu rinkoje dar nėra pigių, didelių priežiūros sąnaudų nereikalaujančių nanodalelių skaitiklių, bet dėl intensyvių tyrimų šioje srityje manoma, kad greitai laiku jie atsiras.

LOJ koncentracija patalpų ore gali būti matuojama realaus laiko matuokliais, panaudojant LOJ jutiklį – dujoms jautrų fotojonizacinį detektorį (Photo ionization detector, PID). Siekiant LOJ koncentraciją matuoti didele skiriamąja laiko geba, matuojama bendroji LOJ koncentracija, kuri išreiškiama per bendrosios organinės anglies koncentraciją, kalibruojant matavimo prietaisą pagal žinomos sudėties LOJ dujas. Šis matavimo metodas dėl aukštos įrenginių kainos, sudėtingo prietaisų aptarnavimo bei skleidžiamo triukšmo negali būti integruotas į OKV sistemas.

Puslaidininkinių metalų oksidų pagrindo jutiklių naudojimas plačiai plinta ir yra LOJ koncentracijų matavimo alternatyva. Šie jutikliai fiksuoja įvairius nemetaninius angliavandenilius, įskaitant alifatinius ir aromatinius angliavandenilius, alkoholius, ketonus, organines rūgštis, aminos ir t. t. Šie jutikliai yra pigūs, geros rezoliucijos ir tikslumo. Šie jutikliai sukalibruoti taip, kad išmatuotą LOJ koncentraciją jie pateikia kaip CO₂ koncentracijai ekvivalentiškas vertes (ppm), taip pasiekiamas suderinamumas su CO₂ koncentracijų standartais.

AD ir LOJ matuoklių vieta gyvenamosiose patalpose

AD ir LOJ matuoklių padėtis tinkamai POK reprezentuoti yra labai svarbi. Priklausomai nuo naudojamų ventiliacijos strategijų, tarša patalpose sklinda skirtingai.

Remiantis tyrimų rezultatais pagal ventiliacijos tipą, rekomenduojamos dvi strategijos POK matuokliams išdėstyti:

- 1) Esant priverstinei ventiliacijai, POK matuokliai galėtų būti įmontuoti oro pašalinimo vamzdyje, taip teršalai būtų sukoncentruoti vienam sraute. Be to, nebus reikalinga papildoma traukos sistema. Manome, kad, didėjant reikalavimas dėl pastatų energetinio efektyvumo, ateityje mechaninė ventiliacija bus vyraujantis ventiliacijos tipas, dėl to matavimo įranga gali būti projektuojama atsižvelgiant į tai;
- 2) Jei mechaninės ventiliacijos pastate nėra, siūlomas „dūmų detektoriaus“ metodas, kai matuokliai būtų įmontuoti lubose, kambario centre.

Ventiliacija ir oro valymo įrenginiai

Šiuolaikiniai mažai energijos naudojantys pastatai neįsivaizduojami be priverstinės ventiliacijos. Ventiliacija užtikrina patalpų vėdinimą, kai pašalintas panaudotas oras kartu pakeičiamas lauko oru. Esant poreikiui, toks tiekiamas oras gali būti filtruojamas, pašildomas ar atvėsinamas, sudrėkinamas ar nusausinamas.

Tose srityse, kur lauko oras labai užterštas, tiesioginis lauko oro tiekimas gali pabloginti POK, todėl toks oras, prieš patiekiant į patalpas, turi būti papildomai valomas (pašalinant AD ir LOJ) panaudojant į vėdinimo sistemą instaliuojamus kompleksinio veikimo oro valymo įrenginius. Tokių įrenginių veikimas dažniausiai paremtas derinant skirtingas technologijas, tokias kaip: vainikinis iššlydis, katalizė, UV spinduliuotė, filtracija, sorbcija ir t. t.

Dėl taršos, susidaranti patalpų viduje, vėdinimo gali nepakakti, nes oro kaitos dažnis būna ribotas ir patalpose dažniausiai gali būti padidinamas iki 1 h^{-1} . Esant patalpų viduje stipriam taršos šaltiniui ir nepakankamam oro kaitos dažniui, išsiskiriantys teršalai ilgam laikui pablogina POK. Siekiant efektyviai naudoti energiją ir maksimaliai sumažinti patalpų taršos šaltinių įtaką POK, kartu su ventiliacija gali būti naudojami ir NVĮ. Tokių NVĮ veikimas taip pat dažniausiai būna pagrįstas keliomis lygiagrečiomis technologijomis (filtravimas, ozonavimas, katalizė ir t. t.), jie efektyviai ir greitai iš patalpų oro pašalina AD ir LOJ. Atlikus tyrimą buvo nustatyta, kad, naudojant ventiliaciją ir NVĮ, galima pasiekti labai gerų rezultatų, maksimaliai sumažinti patalpų oro taršos šaltinių įtaką POK.

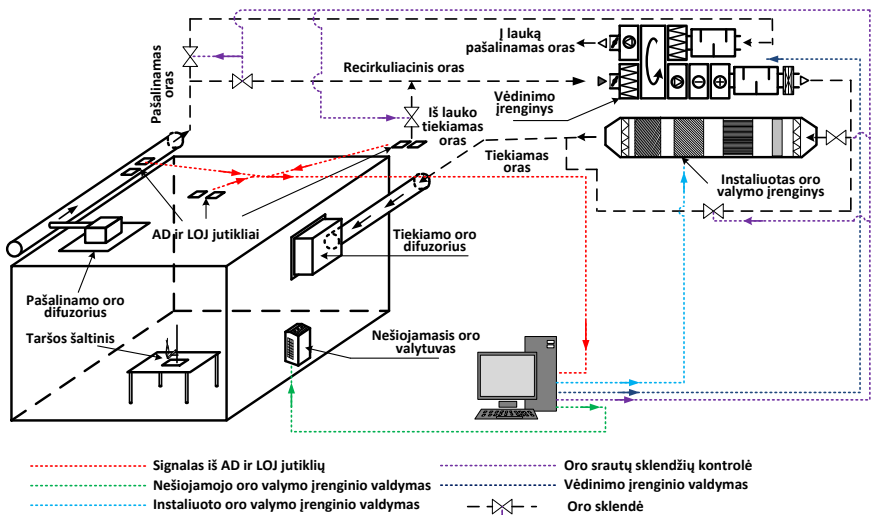
POK valdymo algoritmai

Esami šildymo, ventiliacijos ir oro kondicionavimo algoritmai yra paremti kontroliuojamų parametų matavimo duomenimis (realiu laiku). Tokioms sistemoms valdyti panaudojami įvairūs modeliavimo metodai, tokie kaip: baltos dėžės, juodos dėžės ir pilkos dėžės modeliai, subzoniniai ir multizoniniai modeliai, skaičiuojamosios skysčių dinamikos (Computational Fluid Dynamics) „Windows“ paremtas patalpų oro kokybės imitavimas. Baltos dėžės modeliai pagrįsti deterministinėmis lygtimis, kurios apibūdina fizinius procesus. Patalpų oras priskiriamas prie sudėtingų sistemų, todėl tarp įvesties ir išvesties signalų reikalingas duomenų aproksimavimas su eksperimentiniais duomenimis (matuojant įvesties ir išvesties signalo vertes). Pilkos dėžės modelio atveju analitiniai procesų lygčių sprendiniai yra žinomi, o eksperimentiniai duomenys naudojami tik nustatant kai kurių analitinių sprendinių parametrus.

Sukurtas pilkos dėžės POK valdyti modelis, paremtas mažųjų ir stambiųjų AD koncentracijų bei LOJ koncentracijų matavimu realiu laiku, yra sudarytas iš trijų blokų, kurių kiekvienas atspindi skirtingus teršalus. Oro kaitos dažnis yra keičiamas atsižvelgiant į gautą duomenų palyginimo rezultatą. Nors šis modelis skirtas konkrečioms teršalams, atsirandantiems dėl patalpose vykdomų veiklų, jis gali būti papildytas ir kitais oro kokybės parametų matavimais, tokiais kaip CO₂ ir drėgmė.

Siūlomų technologijų integracija į pastatų POK valdymo sistemas

POK valdymo schema pateikta **11 pav.** Šią schemą sudaro šie segmentai: teršalų jutikliai, vėdinimo įrenginys, instaliuotas oro valymo įrenginys, NVĮ, automatinės oro srautų valdymo sklendės, sistemos kompiuteris duomenims apdoroti, analizuoti ir visai sistemai valdyti.



11 pav. Rekomenduojama POK valdymo schema

Ši schema atspindi ventiliacija paremtą POK valdymo sistemą, kurios veikimui daro įtaką AD ir LOJ koncentracijų matavimo vertės bei oro valymo priemonių naudojimas. Oras gali būti valomas panaudojant vėdinimo sistemoje instaliuotą oro valymo įrenginį arba kambaryje esantį NVĮ. Visi segmentai turi būti sujungti su centriniu kompiuteriu, kuris, apdorodamas taršos matavimo jutiklių pateiktas vertes ir panaudodamas valdymo algoritmą, aktyvuotų reikiamus įrenginius.

Taršos matavimo jutiklių išdėstymas kambarių centre prie lubų yra rekomenduojamas tada, kai POK yra valdoma keliuose kambariuose tuo pačiu metu panaudojant automatines oro srautų valdymo sklendes. Taip POK galima kontroliuoti keliuose kambariuose, o, nesant taršos, sumažinti tame kambaryje oro kaitos dažnį iki minimalaus, taip taupant energiją.

Rekomenduojama taip pat naudoti taršos jutiklius ir iš lauko tiekiamo oro kokybei įvertinti, prirėikus tokį orą valyti. Taip pat sistemoje yra numatyta galimybė iš patalpų pašalintą orą išvalyti ir tiekti atgal į patalpas.

APIBENDRINIMAI IR IŠVADOS

1. Ištirta POK 11 mažai energijos naudojančių namų. Nepaisant mažo OKD (ventiliacijos intensyvumo), daugelyje namų ($0,08-0,69 \text{ h}^{-1}$) nebuvo užfiksuotų aukštų CO_2 , LOJ ir pusiau LOJ verčių, išskyrus formaldehido ($3,3-52,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), šio junginio koncentracija daugelyje namų viršijo ribinę vertę ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) net kelis kartus. Pastate, kuriame oro kokybės matavimai buvo vykdomi iš karto po interjero apdailos darbų, buvo nustatytos labai

- didelės BTEX junginių koncentracijos. Nustatyta, kad, veikiant nuolatinei mechaninei ventilacijai ($0,5 \text{ h}^{-1}$), BTEX junginių koncentracija priimtinus lygmenis pasiekia po 4 savaičių po interjero apdailos darbų pabaigos.
2. Tyrimų kameroje buvo iširta AD ir LOJ koncentracijų kitimo dinamika panaudojant 20 skirtingų dažniausiai butyje pasitaikančių veiktų, tokių kaip maisto gaminių veikos, įvairių šiluminių šaltinių, asmens priežiūros ir buitinės chemijos naudojimo veikos. Daugeliu atvejų maksimali AD ir LOJ koncentracija buvo užfiksuojama nuo eksperimento pradžios praėjus kelioms minutėms. Taršos šaltiniai buvo suskirstyti į: greituosius (maksimali mažųjų AD koncentracija buvo užfiksuojama po 1–2 min. nuo taršos skleidimo pradžios), tokius kaip žvakių, cigarečių ar smilkalų deginimas, ir lėtuosius (7–25 min.), kai naudojamas baldų valiklis, plaunamos grindys su detergentais ir t. t. Buvo nustatyta, kad tiek oro ištraukimo ortakis, tiek kambario centras prie lubų panašiai atspindi skirtingus taršos šaltinius, ir abi matavimo vietos yra tinkamos POK jutikliams įrengti.
 3. Ištyrus vedinimo ir NVĮ veikimo derinių įtaką AD ir LOJ pašalinimui iš tyrimų kameros, kuri atitinka standartinio kambario sąlygas, nustatyta, kad ši strategija gali būti efektyviai pritaikyta POK valdyti. NVĮ efektyviai šalino AD, pasiekdami iki 97 proc. AD pašalinimo efektyvumą po 30 min. veikimo, o \dot{SOPK}_{AD} kito nuo 37 ± 4 iki $237 \pm 11 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, o štai LOJ šalino daug prasčiau: \dot{SOPK}_{LOJ} kito nuo $2,2 \pm 0,3$ iki $29,9 \pm 2,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Vedinimo ir NVĮ veikimo derinys pateikė skirtingus atsakymus, susijusius su teršalų pašalinimu ir energijos suvartojimu. NVĮ efektyviausi buvo per gana trumpą laiką šalinant AD, kita vertus, ventilacija efektyviau šalino LOJ junginių koncentracijas, o abiejų technologijų naudojimas leido pasiekti iki 20 proc. didesnę teršalų pašalinimą, taip optimizuojant energijos suvartojimo efektyvumą.
 4. Suprojektuotas pilkos dėžės veikimo principu paremtas POK valdymo modelis, kai pradiniai duomenys apie taršos šaltinių charakterizavimą surinkti eksperimentinių matavimų metu ir toliau apdorojami taikant teršalų masės balanso modelį. Deginant smilkalus (daugiausia išskiria mažųjų AD), kai oro kaitos dažnis yra 4 h^{-1} , užsiduota ribinė mažųjų AD koncentracija pasiekama praėjus 25 min. nuo taršos epizodo pradžios, esant 1 h^{-1} , ribinė vertė būtų pasiekama po 105 min. Siūlomas valdymo metodas gali būti taikomas siekiant valdyti POK, užtikrinant optimalų vedinimo panaudojimą, kad priimtina POK būtų pasiekama per trumpiausią laiką, įskaitant ir optimalų energijos panaudojimą.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. AFSHARI, A., MATSON, U., EKBERG, L. E. Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full scale chamber. *Indoor Air*. 2008, 15, 141–150.
2. AI, Z. T., MAK, C. M. AND CUI, D. J. On-site measurements of ventilation performance and indoor air quality in naturally ventilated high-rise residential buildings in Hong Kong. *Indoor Built Environ.* 2015, 24, 214–224.
3. ASHRAE. (2009). Handbook-fundamentals: Inch-Pound Edition. American Society of Heating, Refrigerating Air-Conditioning, Engineers, Inc., Atlanta.
4. BRASCHE, S., BISCHOF, W. Daily time spent indoors in German homes—baseline data for the assessment of indoor exposure of German occupants. *International journal of hygiene and environmental health*, 2005, 208(4), 247–253.
5. CHEN, W., ZHANG, J. S., ZHANG, Z. Performance of air cleaners for removing multiple volatile organic compounds in indoor air. *ASHRAE Transactions* 2005, 111: 1101–1114.
6. CIUZAS, D., PRASAUSKAS, T., KRUGLY, E., SIDARAVICIUTE, R., JURELIONIS, A., SEDUIKYTE, L., KAUNELIENE, V., WIERZBICKA, A. and MARTUZEVICIUS, D. Characterization of indoor aerosol temporal variations for the real-time management of indoor air quality. *Atmos. Environ.* 2015, 118, 107–117.
7. *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings*. Official Journal of the European Union L 153/13, 2010.
8. DU, L., PRASAUSKAS, T., LEIVO, V., TURUNEN, M., AALTONEN, A., KIVISTE, M., HAVERINEN-SHAUGHNESSY, U. Building Energy-efficiency Interventions in North-East Europe: Effects on Indoor Environmental Quality and Public Health. In *The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, July (pp. 7–12).
9. FISCHER, A., LJUNGSTRÖM, E., ENGMAN, L. H. AND LANGER, S. (2015). Ventilation strategies and indoor particulate matter in a classroom. *Indoor Air* 25, 168–175.
10. GÉHIN, E., RAMALHO, O., KIRCHNER, S. Size distribution and emission rate measurement of fine and ultrafine particle from indoor human activities. *Atmos. Environ.* 2008, 42, 8341–8352.
11. GRINSHPUN, S. A., MAINELIS, G., TRUNOV, M., ADHIKARI, A., REPONEN, T., WILLEKE, K. Evaluation of ionic air purifiers for reducing aerosol exposure in confined indoor spaces. *Indoor air*. 2005, 15: 235–245.
12. HE, C., MORAWSKA, L., HITCHINS, J., GILBERT, D. Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. *Atmos. Environ.* 2004, 38, 3405–3415.
13. HEUDORF, U., NEITZERT, V., SPARK, J. Particulate matter and carbon dioxide in classrooms – The impact of cleaning and ventilation. *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 2009, 212, 45–55.
14. HN 42:2009 „Gyvenamųjų ir visuomeninių pastatų patalpų mikroklimatas“ 2009, Nr-1081, Vilnius.

15. HUSSEIN, T., KULMALA, M. Indoor aerosol modeling: Basic principles and practical applications. *Water Air Soil Pollut. Focus*, 2008, 8, 23–34.
16. HUSSEIN, T., GLYTSOS, T., ONDRÁČEK, J., DOHÁNYOSOVÁ, P., ŽDÍMAL, V., HÄMERI, M., SMOLÍK, J., KULMALA, M. Particle size characterization and emission rates during indoor activities in a house. *Atmos. Environ.* 2006, 40, 4285–4307.
17. JEMA. (1995). JEM 1467, air cleaners of household and similar use. Japanese Electrical Manufacturers' Association (JEMA).
18. KAUNELIENE, V., KRUGLY, E., KLIUCININKAS, L., STASIULAITIENE, I., PRASAUSKAS, T., AUZBIKAVICIUTE, A., MARTUZEVICIUS, D. (2015). PAHs in Indoor and Outdoor Air from Decentralized Heating Energy Production: Comparison of Active and Passive Sampling. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 1–19.
19. KIM, H. J., HAN, B., KIM, Y. J., YOON, Y. H., ODA, T. Efficient test method for evaluating gas removal performance of room air cleaners using FTIR measurement and CADR calculation. *Build. Environ.* 2012, 47: 385–393.
20. KIM, J. Y., CHU, C. H., SHIN, S. M. ISSAQ: An integrated sensing systems for real-time indoor air quality monitoring. *IEEE Sens. J.* 2014, 14, 4230–4244.
21. KLEPEIS, N. E., et al. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 2001, 11(3), p. 231–252.
22. KOLARIK, B., GUNNARSEN, L., LOGADOTTIR, A., FUNCH, L. W. Concentrations of formaldehyde in new Danish residential buildings in relation to WHO recommendations and CEN requirements. *Indoor and Built Environment*, 2012, 21(4), 552–561.
23. SHIUE, A., HU, S. C. AND TU, M. L. Particles removal by negative ionic air purifier in cleanroom. *Aerosol Air Qual. Res.* 2011, 11: 179–186.
24. STRANDBERG, B., GUSTAFSON, P., SÖDERSTRÖM, H., BARREGARD, L., BERGQVIST, P. A., SÄLLSTEN, G. (2006). The use of semipermeable membrane devices as passive samplers to determine persistent organic compounds in indoor air. *Journal of Environmental Monitoring*, 8(2), 257–262.
25. ASTM E741 – 11 Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution.
26. AHAM. (2006). ANSI/AHAM AC-1-2006, method for measuring performance of portable household electric room air cleaners. *Association of Home Appliance Manufacturers (AHAM)*.
27. STR 2.01.09:2012. Statybos techninis reglamentas „Pastatų energetinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas“, galioja nuo 2014 09 17.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Straipsniai „Thomson Reuters” sąrašo leidiniuose

1. ČIUŽAS, Darius; PRASAUSKAS, Tadas; KRUGLY, Edvinas; SIDARAVIČIŪTĖ, Rūta; JURELIONIS, Andrius; ŠEDUIKYTĖ, Lina; KAUNELIENĖ, Violeta; WIERZBICKA, Aneta; MARTUZEVIČIUS, Dainius. Characterization of indoor aerosol temporal variations for the real-time management of indoor air quality // *Atmospheric environment*. Oxford: Pergamon-Elsevier Science. ISSN 1352-2310. 2015, vol. 118, p. 107-117. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Academic Search Complete; Academic Search Premier; BIOSIS Previews; Chemical Abstracts (CAplus); Compendex; Science Direct]. [IF: 3,281, AIF: 2,929 (E, 2014)].
2. ČIUŽAS, Darius; PRASAUSKAS, Tadas; KRUGLY, Edvinas; JURELIONIS, Andrius; ŠEDUIKYTĖ, Lina; MARTUZEVIČIUS, Dainius. Indoor air quality management by combined ventilation and air cleaning: an experimental study // *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, DOI: 10.4209/aaqr.2015.10.0577.
3. MIKUCKAS, Antanas; ČIUŽAS, Darius; PRASAUSKAS, Tadas; MIKUCKIENE, Irena; Lukas, Romas; KAZANAVICIUS, Egidijus; JURELIONIS, Andrius; MARTUZEVICIUS, Dainius. A Grey Model Approach to Indoor Air Quality Management in Rooms Based on Real-Time Sensing of Particles and Volatile Organic Compounds // *Applied Mathematical Modelling*, priimtas.

Konferencijų pranešimų medžiagoje

1. MARTUZEVIČIUS, Dainius; ČIUŽAS, Darius; PRASAUSKAS, Tadas; SIDARAVIČIŪTĖ, Rūta; ŠEDUIKYTĖ, Lina; JURELIONIS, Andrius; GAGYTĖ, Laura; KAUNELIENĖ, Violeta. Characterization of indoor pollution sources for a real - time management of IAQ // *Indoor Air 2014* [elektroninis išteklius] : the 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 7–12 July, 2014, Hong Kong : participant guide book. Hong Kong: ISIAQ, 2014. p. [1–3].
2. KRUGLY, Edvinas; ČIUŽAS, Darius; PRASAUSKAS, Tadas; KAUNELIENĖ, Violeta; ŠEDUIKYTĖ, Lina; JURELIONIS, Andrius; GAGYTĖ, Laura; MARTUZEVIČIUS, Dainius. Management of indoor air quality by in-room air cleaners and ventilation // *WSB 2014: World Sustainable Building Conference* [elektroninis išteklius], *Management of Indoor Air Quality by In-Room Air Cleaners and Ventilation*, 28-30 October, 2014, Barcelona, Spain. Barcelona: Green Building Council Espana, 2014, ISBN 9788469718155. p. [1–6].

3. **ČIUŽAS, Darius**; PRASAUSKAS, Tadas; SIDARAVIČIŪTĖ, Rūta; MARTUZEVIČIUS, Dainius. Dynamics of TVOC emissions from common indoor pollution sources // *Chemistry and chemical technology: proceedings of the international conference, 25 April, 2014 / Kaunas University of Technology*. Kaunas: Technologija, 2014. ISSN 2351-5643. 2014, p. 17–20.
4. MARTUZEVIČIUS, Dainius; **ČIUŽAS, Darius**; SIDARAVIČIŪTĖ, Rūta; PRASAUSKAS, Tadas; KRUGLY, Edvinas; STANKEVIČIUS, Kazimieras; KAUNELIENĖ, Violeta; ŠEDUIKYTĖ, Lina; JURELIONIS, Andrius. Dynamics of aerosol emissions from common indoor pollution sources as characterised in the ventilation exhaust // *Aerosols 2014 : 3rd workplace and indoor aerosols conference, 13th-16th May, 2014, Wrocław, Poland : program and abstracts / Institute of Immunology and Experimental Therapy Polish Academy of Sciences, Wrocław Branch of the Polish Academy of Sciences*. Wrocław: Institute of Immunology and Experimental Therapy Polish Academy of Sciences, 2014. p. 50–51.
5. MARTUZEVIČIUS, Dainius; PRASAUSKAS, Tadas; **ČIUŽAS, Darius**; KRUGLY, Edvinas; SIDARAVIČIŪTĖ, Rūta; ŠEDUIKYTĖ, Lina; JURELIONIS, Andrius; KAUNELIENĖ, Violeta. The effect of a sampling location within a room on the dynamics of aerosol concentrations for continuous monitoring of IAQ // *IAC 2014: International Aerosol Conference, August 28 – September 2, 2014, Bexco, Busan, Korea*. [S.l.]: IAC, 2014. p. [1].
6. KAUNELIENĖ, Violeta; PRASAUSKAS, Tadas; **ČIUŽAS, Darius**; KRUGLY, Edvinas; SIDARAVIČIŪTĖ, Rūta; ŠEDUIKYTĖ, Lina; JURELIONIS, Andrius; MARTUZEVIČIUS, Dainius. Characterization of aerosol-emitting cooking pollution sources in a building ventilation system // *IAC 2014: International Aerosol Conference, August 28 – September 2, 2014, Bexco, Busan, Korea*. [S.l.]: IAC, 2014. p. [1].
7. PRASAUSKAS, Tadas; MARTUZEVIČIUS, Dainius; **ČIUŽAS, Darius**; KRUGLY, Edvinas; SIDARAVIČIŪTĖ, Rūta; ŠEDUIKYTĖ, Lina; JURELIONIS, Andrius; KAUNELIENĖ, Violeta. Characterization of aerosol-emitting indoor pollution sources in a ventilation exhaust // *NOSA Aerosol Symposium 2014: 31-31 January, 2014, Stockholm*. [S.l.: s.n.], 2014. p. [1].
8. **ČIUŽAS, Darius**; KRUGLY, Edvinas; PRASAUSKAS, Tadas; ŠEDUIKYTĖ, Lina; JURELIONIS, Andrius; SIDARAVIČIŪTĖ, Rūta; MARTUZEVIČIUS, Dainius. Calibration of a light-scattering photometer for indoor aerosol monitoring // *NOSA Aerosol Symposium 2014: 31-31 January, 2014, Stockholm*. [S.l.: s.n.], 2014. p. [1].

9. MARTUZEVIČIUS, Dainius; **CIUZAS, Darius**; PRASAUSKAS, Tadas; KRUGLY, Edvinas; JURELIONIS, Andrius. IAQ management by combined ventilation and air cleaning: an experimental study // *Aerosols 2016*: 4rh workplace and indoor aerosols conference, 20th-22th April, 2016, Barcelona, Spain.
10. PRASAUSKAS, Tadas; **CIUZAS, Darius**; KRUGLY, Edvinas; JURELIONIS, Andrius; MARTUZEVIČIUS, Dainius. Is nephelometry sufficient for estimating indoor PM variation? // *Aerosols 2016*: 4rh workplace and indoor aerosols conference, 20th-22th April, 2016, Barcelona, Spain.

Kitos publikacijos

1. MARTUZEVIČIUS, Dainius; **ČIUŽAS, Darius**; PRASAUSKAS, Tadas. Sergančio namo sindromas: kaip jo išvengti? // *Statyk!: praktinis būsto vadovas Vilnius: Namas ir aš*. ISSN 1648-4150. 2013, Nr. 1–2 (88), p. 46–47.

KITOS MOKSLINĖS PUBLIKACIJOS

Straipsniai (ne disertacijos tema)

1. KAUNELIENĖ, Violeta; PRASAUSKAS, Tadas; KRUGLY, Edvinas; STASIULAITIENĖ, Inga; ČIUŽAS, Darius, ŠEDUIKYTĖ, Lina; MARTUZEVIČIUS, Dainius. Indoor air quality in low energy residential buildings in Lithuania // *Building and Environment*. Oxford: Pergamon-Elsevier Science. ISSN 0360-1323. 2016, vol. 108, p. 63-72. [Science Citation Index Expanded (Web of Science)]. [IF: 3,394, AIF: 2,304 (E, 2016)].
2. JURELIONIS, Andrius; GAGYTĖ, Laura; ŠEDUIKYTĖ, Lina; PRASAUSKAS, Tadas; ČIUŽAS, Darius; MARTUZEVIČIUS, Dainius. Combined air heating and ventilation increases risk of personal exposure to airborne pollutants released at the floor level // *Energy and buildings*. Lausanne: Elsevier. ISSN 0378-7788. 2016, vol. 116, p. 263-273. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Science Direct; Academic Search Complete; Academic Search Elite; Academic Search Premier; Academic Search Research & Development; Environment Complete]. [IF: 2,884, AIF: 2,447 (E, 2014)].
3. JURELIONIS, Andrius; GAGYTĖ, Laura; PRASAUSKAS, Tadas; ČIUŽAS, Darius; KRUGLY, Edvinas; ŠEDUIKYTĖ, Lina; MARTUZEVIČIUS, Dainius. The impact of the air distribution method in ventilated rooms on the aerosol particle dispersion and removal: the experimental approach // *Energy and buildings*. Lausanne: Elsevier. ISSN 0378-7788. 2015, vol. 86, p. 305-

313. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Academic Search Complete]. [IF: 2,884, AIF: 2,447 (E, 2014)].
4. KRUGLY, Edvinas; MARTUZEVIČIUS, Dainius; SIDARAVIČIŪTĖ, Rūta; ČIUŽAS, Darius; PRASAUSKAS, Tadas; KAUNELIENĖ, Violeta; STASIULAITIENĖ, Inga; KLIUČININKAS, Linas. Characterization of particulate and vapor phase polycyclic aromatic hydrocarbons in indoor and outdoor air of primary schools // *Atmospheric environment*. Oxford: Pergamon-Elsevier Science. ISSN 1352-2310. 2014, Vol. 82, iss. 2, p. 298-306. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Academic Search Premier; BIOSIS; Chemical Abstracts (CAplus); Compendex; Science Direct]. [IF: 3,281, AIF: 2,929 (E, 2014)].
 5. PRASAUSKAS, Tadas; MARTUZEVIČIUS, Dainius; KRUGLY, Edvinas; ČIUŽAS, Darius; STASIULAITIENĖ, Inga; SIDARAVIČIŪTĖ, Rūta; KAUNELIENĖ, Violeta, \$\$[Kauneliene, Violeta]; ŠEDIUKYTĖ, Lina; JURELIONIS, Andrius; HAVERINEN-SHAUGHNESSY, Ulla. Spatial and temporal variations of particulate matter concentrations in multifamily apartment buildings // *Building and Environment*. Oxford: Pergamon-Elsevier Science. ISSN 0360-1323. 2014, Vol. 76, p. 10-17. [Science Citation Index Expanded (Web of Science)]. [IF: 3,341, AIF: 2,304 (E, 2014)].
 6. PRASAUSKAS, Tadas; ŽEMAITYTĖ, Aida; KRUGLY, Edvinas; ČIUŽAS, Darius; MARTUZEVIČIUS, Dainius. Characterization of particle size distributions of powdery building material aerosol generated by fluidization and gravitation // *Environmental research, engineering and management = Aplinkos tyrimai, inžinerija ir vadyba*. Kaunas: KTU. ISSN 1392-1649. 2012, nr. 3(61), p. 50–57. [CAB Abstracts; Current Abstracts; DOAJ; INSPEC; Pollution Abstracts; TOC Premier].

INFORMACIJA APIE AUTORIŲ

Darius Čiužas gimė Šakiuose, Lietuvoje, 1985 m. vasario 28 d.
2004 m. baigė Varpo vidurinę mokyklą Šakiuose.

2004–2008 m. – Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas, Aplinkos inžinerijos bakalauro laipsnis;

2008–2010 – Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas, Aplinkos inžinerijos magistro laipsnis;

2012–2016 – Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas, doktorantūros studijos Aplinkos inžinerijos kryptyje.

Kontaktai: Tel. +370 608 20 260; e. paštas: darius.ciuzas@ktu.edu

SUMMARY

Indoor air quality (IAQ) is one of the most important parameters determining indoor microclimate and human comfort. It is known that people in developed countries spend a majority of their time indoors (about 90proc.) therefore IAQ is very important factor but difficult to control (Brasche and Bischof, 2005; Kleipeis et al., 2001). The IAQ is mostly affected by air pollution sources indoors and outdoors. Common indoor air pollution sources are smoking, candle and incense burning, household cleaning activities, cooking, furnishing, printers, building materials, and other electronic devices. The Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings determines that by 2021 all new buildings have to be zero-energy buildings. A construction of zero-energy or low-energy houses requires high tightness of a building. Insulation creates good conditions for a higher exposure to indoor pollutants and as a result sick building syndrome (SBS) may occur. Therefore, it is important to investigate and evaluate the IAQ in low-energy houses.

The IAQ may be managed by several strategies, including pollution source control, dilution (ventilation), and air cleaning. Any of these strategies requires good understanding of indoor air pollution sources in order to obtain effective application of engineering measures for the improvement of IAQ.

Ventilation has long been considered as one of the most effective strategies for improving IAQ, but it is often costly due to the heating or cooling needs; moreover, it also supplies pollutants from outdoors. Another measure for removing pollutants from indoor air is air cleaning. Is widely applied to reduce PM and selected gaseous phase pollutants (primarily of organic origin) generated by industrial and residential sources. The ventilation and air cleaning/purification have been proven as effective ways of reducing occupant exposure to indoor contaminants and improving IAQ. At the same time, the data on the combination of both of these technologies are sparse.

The integration of novel measurement methods, new knowledge on indoor pollution sources and the IAQ management strategies allows stepping one step further to the advanced management of IAQ based on real-time pollutant sensing and processing these tasks via smart home environments. The knowledge on the IAQ management modelling/algorithms based on real-time sensing of specific pollutants is yet very limited, thus providing an opportunity for a systematic and novel approach to this issue.

Aim of the thesis

To provide scientific background for the control of IAQ via the real-time characterization, management and modeling of indoor pollutant variations.

Objectives of the dissertation

1. To investigate the IAQ in the existing low energy residential settings;
2. To characterize the dynamics of various common active indoor pollution sources via experimental modelling techniques;
3. To investigate the effectiveness of IAQ management via coupled ventilation and air cleaning;
4. To establish control algorithm for the management the IAQ based on the real-time measurement data.

Scientific novelty

1. The indoor environmental quality was investigated in 11 newly built low energy residential buildings in Lithuania;
2. The unique data was obtained on the characterization of dynamic patterns of indoor PM and VOC during various pollution episodes for real-time IAQ management;
3. A combination of ventilation and air cleaning regimes were investigated for the removal of aerosol particles and volatile organic compounds (VOCs);
4. A model has been developed for the management of IAQ based on real-time sensing of PM (nano and micro particles) and VOCs.

Structure and outline of the dissertation

This dissertation is divided into the following parts: introduction, literature review, measurements and methodology, results and discussion, conclusions, recommendations, list of 132 references, list of publications on the dissertation topic and list of annexes. The literature survey and results of the research are presented in 118 pages, including 11 tables and 21 figures.

Practical value of the work

1. The data obtained from the measurements in low energy buildings provide basis for the building and HVAC professionals with respect to the insights on selecting building materials and ventilation regimes for assuring healthy IAQ.
2. The database on the IAQ variation resulting from active pollution sources may serve as a basis for the further development of pollution control algorithms within buildings.
3. The created grey model for the management of IAQ in buildings based on real-time pollutant concentration measurements may be implemented in building management systems (e.g., smart home systems).

4. The results presented in the dissertation have been collected as a part of the project IAQSmart (Air quality management in Low Energy Homes), financed by the European Social Fund under Global Grant Scheme.

Conclusions

1. The indoor environment was investigated in 11 newly built low energy residential buildings. Despite of the low air change rate in most buildings ($0.08-0.69\text{ h}^{-1}$), CO_2 and many tested VOC and SVOC concentrations were at reasonable levels, while the concentration of formaldehyde was elevated above the national limit values ($3.3-52.3\ \mu\text{g}/\text{m}^3$). In several buildings, extremely high concentrations of VOCs were observed where the interior installation activities were done shortly prior the measurement campaign. Decrease of BTEX concentrations was rapid and fell below limit values in one month.
2. The variation of PM and VOC concentrations was assessed for 20 indoor activities, including cooking related sources, other thermal sources, personal care and household products. In most of the pollution episodes, the maximum concentration of particles and VOC in exhaust air was reached within a few minutes. The most rapid increase in particle concentration (the maximum UFP was measured after 1-2 min. after the pollution episode was generated) was during thermal source episodes such as candle, cigarette, incense stick burning and cooking related sources, while the slowest (7-25 min) rise of concentrations was associated with sources, emitting ultrafine particle precursors, such as furniture polisher spraying, floor wet mopping with detergent etc. Placement of the particle sensors in the ventilation exhaust vs. in the centre of the ceiling yielded comparable results for both measured maximum concentrations and temporal variations, indicating that both locations were suitable for the placement of sensors for the management of IAQ.
3. A combination of ventilation and air cleaning regimes were investigated for the removal of aerosol particles and VOCs in a test chamber, representing a typical room. Air cleaners were effective in removing of particles, reaching up to 97proc. removal efficiency based on particle number concentrations after 30 minutes, while CADR_{PNC} varied from 37 ± 4 to $237\pm 11\ \text{m}^3\text{h}^{-1}$. The removal of VOCs varied from 21.4 to 45.7proc. and CADR_{VOC} ranged from 2.2 ± 0.3 to $29.9\pm 2.8\ \text{m}^3\text{h}^{-1}$, indicating substantially lower efficiency. The combination of ventilation and air cleaning provided different responses with respect to pollutant removal and energy efficiency. The air cleaning was the most efficient for removing PM from indoor air, minimizing the requirement for ventilation. On the other hand, the ventilation seemed to be more efficient in the removal of VOCs, while the combination of ventilation and air

cleaning increased pollutant removal efficiency by 20proc. and maximized the energy efficiency.

4. The development of the model used a grey box approach where the initial data on pollutant variation was collected during the experimental phase, and further applied to the pollutant mass balance model. In case of incense smouldering (mostly releases fine particles) ventilation rate of 4 h^{-1} , the threshold value is reached after 25 minutes from the start of the pollution episode. If ventilation rate was kept as 1 h^{-1} , the threshold value would be reached in 105 minutes. The proposed management approach can be applied to control IAQ in homes, assuring optimal utilization of the air handling unit in order to achieve the acceptable IAQ in the lowest time span and optimal energy use.

UKD: 697.94 (043.3)

SL344. 2016-09-12, 2.5 leidyb. apsk. I. Tiražas 50 egz. Užsakymas 342 .
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas
38