



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS

Povilas Šeduikis

PATALPŲ ORO KOKYBĖS STEBĖSENOS SISTEMA

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. Linas Kliučininkas

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS

PATALPŲ ORO KOKYBĖS STEBĖSENOS SISTEMA

Baigiamasis magistro projektas

Aplinkosaugos inžinerija (kodas 621H17001)

Vadovas

(parašas) Prof. dr. Linas Kliučininkas
(data)

Recenzentas

(parašas) Prof. dr. Gintaras Denafas
(data)

Projektą atliko

(parašas) Povilas Šeduikis
(data)

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Cheminės technologijos fakultetas

(Fakultetas)

Povilas Šeduikis

(Studento vardas, pavardė)

Aplinkosaugos inžinerija (621H17001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Patalpų oro kokybės stebėsenos sistema“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Povilo Šeduikio** baigiamasis projektas tema „Patalpų oro kokybės stebėsenos sistema“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o 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)

TURINYS

Santrumpų sąrašas	5
PAVEIKSLAI.....	6
SANTRAUKA	7
SUMMARY	8
1. Įvadas.....	9
2. Teorinė dalis	10
2.1. Patalpų oro taršos šaltiniai.....	10
2.2. Skirtingos paskirties patalpų oro kokybės matavimai	11
2.3. Parametrų, nusakančių oro kokybę, matavimo metodų apžvalga.....	20
3. Tyrimo metodika	26
3.1. Eksperimento planas ir metodologija	26
3.2. Sistemos komponentų parinkimas	27
3.3. Įrenginio prototipo projektavimas ir parametrai	28
4. Tyrimų rezultatai ir aptarimas	30
4.1. Sistemos kalibravimas	30
4.2. Rezultatų apibendrinimas	36
5. Išvados.....	38
6. Rekomendacijos tolimesniam įrenginio prototipo tobulinimui	39
7. Naudota literatūra	40
PRIEDAI	43

Santrumpų sąrašas

AKK – Analogas – kodas keitiklis (*angl. – ADC – Analog to Digital Converter*)

GC–MS – Dujų chromatografija su masių spektrometrijos detekcija (*angl. – Gas Chromatography – Mass Spectrometry*)

HPLC – Didelio efektyvumo skysčių chromatografija (*angl. – High Pressure Liquid Chromatography*)

KD – Kietosios dalelės (*angl. – PM – Particulate matter*)

LOJ – Lakieji organiniai junginiai (*angl. – VOCs – Volatile organic compounds*)

PAA – Poliaromatiniai angliavandeniliai (*angl. – PAH – Poly-aromatic hydrocarbons*)

PAVEIKSLAI

2.1.1 pav. Kietu kuru kūrenamų šildymo sistemų generuojami teršalai.....	10
2.2.1 pav. Sensorių užfiksuotos kietųjų dalelių koncentracijos.....	12
2.2.2 pav. CO ₂ koncentracijų kaita natūraliai ventiliuojamame pastate.....	15
2.2.3 pav. Teršalų koncentracijų santyčiai naujos statybos ir senesniuose namuose.....	16
2.2.4 pav. CO ₂ koncentracijos miegamuosiuose.....	17
2.2.5 pav. Oro kokybės rodiklių kaita vasario ir liepos mėnesiais.....	19
2.3.1 pav. Eksperimento eigos diagrama.....	21
2.3.2 pav. Matavimų priklausomybė nuo santykinės drėgmės ir dalelių diametro.....	22
2.3.3 pav. Užsienio mokslininkų suprojektuotas oro kokybės stebėsenos įrenginys.....	24
3.1.1 pav. Patalpų oro kokybės stebėsenos sistemos struktūrinė schema.....	26
3.2.1 pav. „MSP430 Launchpad“ maketas.....	27
3.2.2 pav. „Sharp GP2Y10“ kietųjų dalelių sensorius.....	28
3.3.1 pav. Sistemos išmatuotų KD koncentracijų atvaizdavimas kompiuteryje.....	29
4.1.1 pav. Sistemos kalibravimo eksperimentų schema.....	30
4.1.2 pav. Trijų projektuojamų įrenginių išmatuoti parodymai taršą generuojant smilkalais.....	31
4.1.3 pav. Optiniu dalelių skaitikliu, elektroniniu impaktoriumi ir nefelometru išmatuoti parodymai taršą generuojant smilkalais.....	31
4.1.4 pav. Trijų projektuojamų įrenginių maketų išmatuoti parodymai taršą generuojant dulkėmis.....	32
4.1.5 pav. Optiniu dalelių skaitikliu, elektroniniu impaktoriumi ir nefelometru išmatuoti parodymai taršą generuojant dulkėmis.....	32
4.1.6 pav. Oro kokybės stebėsenos įrenginio korpuso veikimo principas.....	33
4.1.7 pav. Pagamintas oro kokybės stebėsenos įrenginio korpusas.....	33
4.1.8 pav. Modifikuoto įrenginio prototipo parodymai.....	34
4.1.9 pav. Optiniu dalelių skaitikliu išmatuotos skaitinės dalelių koncentracijos.....	34
4.1.10 pav. Optiniu dalelių skaitikliu išmatuotos kietųjų dalelių masės koncentracijos.....	35
4.1.11 pav. Įrenginio prototipo ir nefelometro parodymų palyginimas.....	36
4.1.12 pav. Įrenginio prototipo ir nefelometro parodymų tarpusavio koreliacijos grafikas.....	36

Šeduikis, Povilas. Patalpų oro kokybės stebėsenos sistema. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Linas Kliučininkas; Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas.

Mokslo kryptis: Bendroji inžinerija

Mokslo sritis: Technologijos mokslai

Reikšminiai žodžiai: *patalpų oro kokybė, kietosios dalelės, monitoringas, stebėsenos sistema.*

Kaunas, 2017. 46 p.

SANTRAUKA

Miesto gyventojų gyvenimo sąlygos per pastaruosius dešimtmečius gerokai pakito. Šiandieninis miesto gyventojas patalpose praleidžia didžiąją dienos dalį. Dažnai patalpų oro kokybė yra nepakankamai gera, todėl kenčia žmonių darbingumas, sutrinka miegas, atskirais atvejais gali atsirasti sveikatos sutrikimai. Vienas iš būdų užtikrinti žmogaus gerbūvį – kontroliuoti ir valdyti patalpų oro kokybę.

Projekto tikslas - sukurti universalią patalpų oro kokybės stebėsenos sistemą, kuri pasižymėtų nedidele, palyginti su komerciniais prietaisais, kaina, lengvu valdymu ir matavimo rezultatų patikimumu. Baigiamajame darbe nagrinėjami kietųjų dalelių susidarymo patalpose šaltiniai ir priemonės taršai patalpose kontroliuoti.

Teorinėje dalyje apžvelgiami moksliniai straipsniai, kuriuose aprašyta tyrimai susiję su patalpų oro kokybės matavimais. Apžvelgiami galimi taršos šaltiniai, taip pat, metodai skirti vykdyti oro kokybės monitoringą.

Metodinėje dalyje parenkami reikalingi sistemos komponentai kartu pagrindžiant jų pasirinkimą. Įrenginiai sukonstruojami bei paruošiami naudojimui. Nustatoma eksperimentų atlikimo metodika kalibravimo ir matavimų procedūroms.

Eksperimentinėje dalyje aprašomi atlikti pirminiai bandymai, kurių metu atliekama įrenginio darbo optimizavimo ir kalibracijos procedūros. Atliekami suprojektuoto įrenginio ir komercinių įrenginių išmatuotų rezultatų palyginimai ir statistinė analizė, pateikiamos rekomendacijos galimam tolimesniam sistemos vystymui.

Šeduikis, Povilas. *Indoor Air Quality Monitoring System: Master's thesis in Environmental Engineering / supervisor prof. Linas Kliučininkas; The Faculty of Chemical Technology, Kaunas University of Technology.*

Research area and field: General engineering, technological sciences

Key words: *indoor air quality, particulate matter, monitoring, monitoring system.*

Kaunas, 2017. 46 p.

SUMMARY

Life quality of cities residents had some major changes during last decades. Nowadays, typical person spends his time indoors significant part of day. Most of the time, indoor air has insufficient quality, and because of that people may encounter difficulties to focus their minds, sleep or even health problems. One of the main methods to ensure human's wellbeing is to monitor concentrations of pollutants of indoor air and control them.

Aim of this project – to develop universal low-cost indoor air quality monitoring system, which is easy to use and it has reliable readings of measurements. System is designed to measure particulate matter mass concentration.

Analysis of scientific articles on indoor air quality based studies was done. Review of possible contamination sources and methods for IAQ monitoring was also added.

Main components for system were chosen and taken into account. Using the components system was developed and made ready to use. Methods for experimentation and calibration procedures were developed.

Experimentations, including device calibration was done. Analysis and review of maintained data was done, also results of analysis was submitted. Comparison of results maintained by developed system and commercial analyzers was also added. Recommendations for further development of the system were made.

1. Įvadas

Gera patalpų oro kokybė yra vienas iš pagrindinių žmogaus gerbuvį užtikrinančių parametrų. Apskaičiuota, kad apie 90 procentų viso laiko, žmonės praleidžia patalpų viduje, todėl reikia rūpintis jų mikroklimatu. Taršos šaltinių čia gali būti daugybė: tai įvairūs plastikai ir plastikinės detalės panaudotos apdailoje išskiriančios daug skirtingų lakių organinių junginių, kietosios dalelės patenkančios per ventiliacines sistemas iš lauko. Kietu kuru kūrenamos šildymo sistemos gyvenamuose pastatuose taip pat gali prisidėti prie oro kokybės pabloginimo. PSO duomenimis, dėl prastos oro būklės patalpose visame pasaulyje kenčia apie 3 milijardus žmonių.

Metodų, kaip užtikrinti oro kokybę yra ne vienas: statybinių apdailos medžiagų atsargesnis parinkimas, ventiliacinių sistemų įrengimas ir t.t. Tačiau, nemažiau svarbi priemonė yra pastovus oro kokybės monitoringas, kurio pagalba galima reguliariai tikrinti ir įvertinti esamą situaciją, bei esant poreikiui pritaikyti sprendimus iškilusioms problemoms spręsti.

Darbo tikslas – sukurti universalią patalpų oro kokybės stebėsenos sistemą, pasižyminčią nedidele, palyginti su komerciniais prietaisais, kaina, lengvu valdymu ir matavimo rezultatų patikimumu.

Tiksliui pasiekti buvo iškelti šie **uždaviniai**:

- Parinkti tinkamus komponentus (jutiklius, valdymo plokštę) projektuojamam įrenginio prototipui montuoti;
- Suprojektuoti ir realizuoti sistemos prototipą matavimams pasirenkant kietųjų dalelių koncentracijų matavimo jutiklius;
- Atlikti sukurto įrenginio kalibravimo procedūras, bei gautų matavimo duomenų statistinę analizę;
- Atlikti patalpų oro kokybės matavimus ir gautus rezultatus palyginti su komerciniais prietaisais gautais rezultatais.

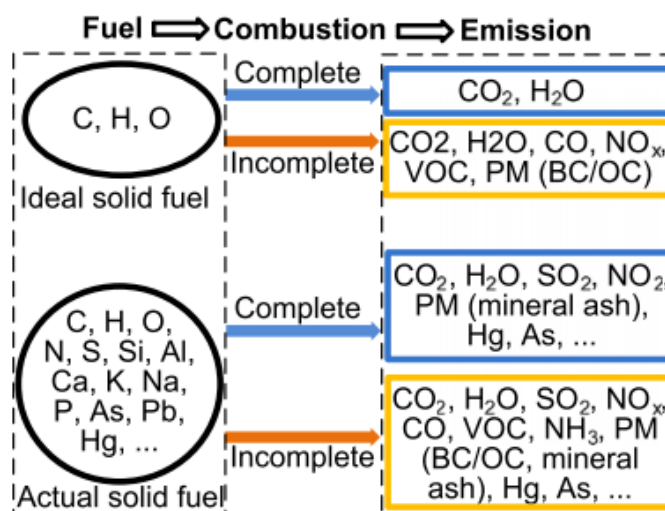
Šiam projektui įvykdyti buvo apsiribota kietųjų dalelių matavimais, tačiau įrenginys gali būti pritaikytas ir kitų medžiagų koncentracijų matavimams; junginiai, kuriuos galėtų išmatuoti sistema priklauso tik nuo vienintelio kintamojo – pasirinktų jutiklių. Sukurtas įrenginys galėtų ne tik matuoti teršalų koncentracijas patalpų ore ir kaupti matavimų duomenis, bet ir rodyti matuojamas koncentracijas realiu laiku.

2. Teorinė dalis

2.1. Patalpų oro taršos šaltiniai

Šaltinių, sukelenčių taršą aplinkos, o tuo pačiu ir patalpų ore galima suskaičiuoti ne vieną dešimtį. Kai kurie jų, priklausomai nuo pobūdžio, gali skleisti vienos rūšies, kiti – įvairius, daugelį teršalų grupių apimančias medžiagas. Kalbant apie patalpas, pirmiausiai verta paminėti LOJ išskyrimą; apdailos, statybinės medžiagos, baldai, o taip pat įvairūs oro gaivikliai, kvepalai – visi šie objektai gali išskirti kintamus kiekius lakių junginių. Viena iš Graikijos mokslininkų tyrimo užduočių, matuojant oro užterštumą mokyklose, buvo išmatuoti įvairių objektų skleidžiamų lakiųjų junginių kiekius (*Kalimeri, et al.*, 2016 [1]). Tyrimų grupė nustatė kelias medžiagas ir šaltinius, kurie jas skleidžia. Baldai ir statybinės medžiagos skirtingais kiekiais į orą išleisdavo benzeną, pineną ir lemoneną. Tačiau jų kiekiai nėra dideli, pvz.: benzeno išskyrimo kiekiai pateko į $0.34 \div 0.96 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

Dar viena medžiaga, nulemianti oro kokybę patalpose – anglies dioksidas, kurio pagrindinis skleidėjas yra pats žmogus. Tyrimai rodo, jog žmonėms esant patalpose CO_2 koncentracijos padidėja kelis ar net keliolika kartų (*Kotol, Rode, Clausen ir Nielsen*, 2014 [2]). Dar vienas ženklus taršos šaltinis gali būti šildymo sistemos individualiuose namuose – kietojo kuro ar dujomis kūrenami šildymo katilai. Tokiu atveju išskiriamų teršalų spektras gali būti gana platus (2.1.1. pav.): lakieji organiniai junginiai, policikliniai aromatiniai angliavandeniliai (PAA), kietosios dalelės, CO_2 ir netgi smalkės. Šia tema atlikta studija Kinijoje, kuomet buvo tiriama šildymo sistemų ir naudojamo kuro įtaka oro kokybei patalpose (*Li et al.*, 2017 [3]).



2.1.1 pav. Kietu kuru kūrenamų šildymo sistemų generuojami teršalai (*Li et al.*, 2017 [3])

Patalpų mikroklimato kokybei įtakos gali turėti ir taršos šaltiniai lauke. Transporto, pramonės ir kitų šaltinių kuriamos emisijos savo sudėtyje turi didelius kiekius kietųjų dalelių. Jų

dydis siekia nuo dešimčių nanometrų iki kelių mikrometrų. Nėgana to, automobiliai smulkias daleles skleidžia ne tik iš išmetamųjų sistemų, bet kaip ir trinties produktus, susidarius padangoms sąveikaujant su kelio danga ar stabdžių kaladėlėms su diskais. Tokių šaltinių skleidžiamas kietasias dalelias 80 procentų sudaro vienos pavojingiausių žmogaus sveikatai, nanodalelės (**Kumar, Pirjola, Ketzel ir Harrison**, 2013 [4]). Todėl, patalpų vėdinimas atveriant langus kartais irgi gali pabloginti situaciją, pvz.: sumažėja CO₂ koncentracijos, tačiau pakyla kietųjų dalelių ar azoto oksidų kiekis patalpose.

Daugybinių taršos šaltinių įtaka (tiek esančių lauke, tiek viduje) patalpų KD koncentracijoms tyrinėta Kinijos mokslininkų straipsnyje, kur buvo tirtos KD_{2.5} koncentracijos biurų pastatuose Guangzhou mieste (**Zhang et al.**, 2017 [5]). Dalelių kiekiai buvo matuoti matuokliu „Wuhan Tianhong Corporation TH-150C“ dvejais laikotarpiais – mažos generuojamos taršos dienomis ir aukštos generuojamos taršos dienomis. Tomis dienomis, kai lauke buvo stebima žemi užterštumo lygiai (esant mažesniai eismo intensyvumui ir pan.) buvo nustatyta, jog patalpose KD koncentracijas smarkiai salygoja jose esantys šaltiniai, tuo tarpu, laikotarpiu, kai buvo dideli lauko aplinkos užterštumo lygiai buvo stebima priešingos tendencijos. Viduje esantys KD šaltiniai oro kokybę salygoja daug mažiau (**Zhang, et al.**; 2017 [5]).

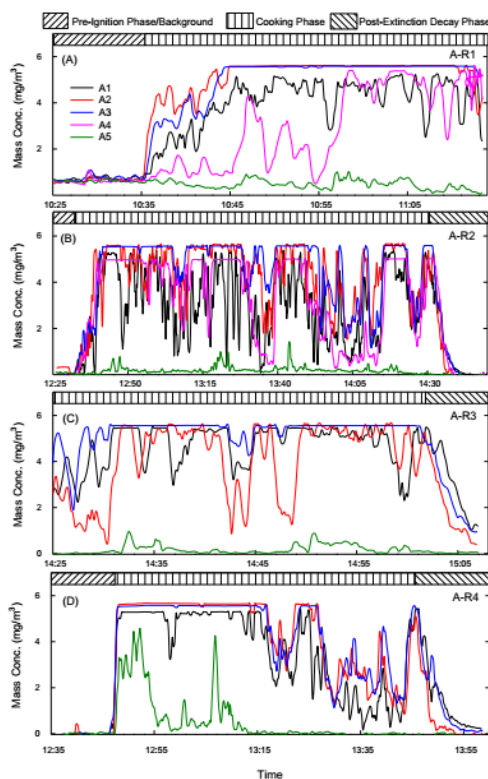
Taršos šaltinių esančių lauke įtaka patalpų oro kokybei taip pat aprašoma anksčiau paminėtame straipsnyje (**Zorpas, Skouroupatis**; 2016 [6]). Tam tikros ore aptiktos medžiagos (benzenas, benzoinė rūgštis, toluenas), kurios dažniausiai susidaro kuro degimo bei išmetamųjų dujų fotocheminės degradacijos metu, leidžia spręsti apie teršalų migraciją iš lauko.

2.2. Skirtingos paskirties patalpų oro kokybės matavimai

Yra atlikta nemažai studijų kuriose išmatuojama ir įvertinama kenksmingų žmogaus sveikatai teršalų koncentracijos gyvenamuosiuose namuose. Matavimams pasitelkiama tiek jau išbandyti tradiciniai metodai ir prietaisai, tiek ir novatoriškos, daug žadančios, priemonės. Atskiruose tyrimuose matuojami skirtingų teršalų kiekiai – vieni jų susitelkia ties vienos ar dviejų medžiagų matavimais, kituose – atliekami kelių ar net keliolikos teršalų matavimai.

Kietųjų dalelių koncentracijų matavimai yra vieni iš dažniausių, siekiant nustatyti oro kokybę. Šia tematika buvo atlikti tyrimai Indijoje, Raipuro mieste (**Patel et al.**, 2017 [7]) – buvo suprojektuota ir panaudota KD_{2.5} matavimo sistema, sudaryta iš nebrangių sensorių (veikiančių IR fotometrijos metodu). Matavimai buvo atliekami individualiuose namuose, kuriuose maisto gamybai naudojamos kietojo kuro krosnys. Eksperimentams atlikti buvo pasirinkti du individualūs namai; pirmajame name matavimai buvo atliekami 4 kartus, antrajame - du. Abejuose namuose buvo sumontuota po kelis sensorius skirtinguose kambariuose. Patikrinti sensorių tikslumui, kartu

buvo atliekami matavimai ir su komerciniu „TSI Sidepack“ matuokliu. Tyrimai parodė, jog kūrenant krosnį dalelių koncentracijos patalpose labai padidėdavo (2.2.1 pav.) ir ir darydavo didelę įtaką koncentracijoms gretimuose namuose. Kai kuriais atvejais koncentracijos viršydavo matavimų sistemos ribas.



2.2.1 pav. Sensorių užfiksuotos kietųjų dalelių koncentracijos, atlikus matavimus keturis kartus, viename iš namų. (*Patel et al., 2017 [7]*).

Taip pat buvo vertinama ir vntiliacijos tokiuose namuose galimybės – buvo matuojama dalelių išsisklaidymas užgesinus krosnį. Nustatytas dalelių koncentracijų mažėjimas ($0.26 \text{ mg}/(\text{m}^3\text{min})$ ir $0.87 \text{ mg}/(\text{m}^3\text{min})$ atitinkamai pirmame ir antrame pastatuose) buvo įvardintas kaip nepakankamas (*Patel et al., 2017 [7]*).

Degimo metu susidariusių produktų įtaką patalpų oro kokybei įvertino Vokietijos mokslininkai savo moksliniame darbe (*Salthammer, Schripp, Wientzek ir Wnsing; 2014 [8]*). Aprašyti eksperimentai, kai buvo vertinama židinių ir kitų kieto kuro katilų skleidžiamos taršos įtaka patalpų oro kokybei, buvo atliekami gyvenamuosiuose namuose šildymo sezonu. Tarp stebimų medžiagų buvo nanodalelės ($5.6\text{--}560 \text{ nm}$), smulkios dalelės ($0.3\text{--}20 \text{ }\mu\text{m}$) ir $\text{KD}_{2.5}$. Koncentracijos buvo matuojamos trimis būdais atitinkamai kiekvienam dalelių diapazonui: „TSI Model 3091“ dalelių matuokliu, optiniu dalelių skaitikliu ir gravimetriniu būdu. Matavimai buvo atliekami prieš užkuriant židinį, bei degimo metu. Taip pat buvo atliekami matavimai lauke, aplink pastatus kad įvertinti galimą įtaką oro kokybei. Gauti rezultatai parodė, kad trijuose iš septynių tyrime dalyvavusių namų $\text{KD}_{2.5}$ koncentracijos, veikiant židiniams viršija rekomenduotiną 25

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ koncentraciją. Smulkių bei nanodalelių koncentracijų ryškus padidėjimas vykstant degimo procesui taip pat pastebimas (*Salthammer et al.*; 2014 [8]).

Italų mokslininkai atliko tyrimus, kuriuose bandė susieti patalpų ir lauko kietųjų dalelių koncentracijas ore (*Sajani et al.*, 2015 [9]). Buvo skaičiuojamas ir vidaus ir lauko KD santykis, nustatyti kaip smarkiai taršos šaltiniai esantys lauke gali lemti gerbūvį namuose. Dalelių koncentracijoms išmatuoti buvo pasitelkti du FMPS tipo matuokliai ir pasyvus mėginių ėmiklis (impaktorius). Matavimai buvo atlikti dvejose vietovėse: viena jų buvo prie didelio intensyvumo kelių, kita – gyvenamajame rajone, su mažesniais eismo srautais. Eksperimentai buvo kartojami kelis kartus. Pirmosios matavimų kampanijos metu nustatytas $\text{KD}_{2,5}$ koncentracijų vidaus/lauko santykis siekė 0,4; kitais dviem matavimų etapais santykiai buvo kiek didesni – 0,9 prie intensyvaus eismo kelių ir 0,7 gyvenamajame rajone. Kalbant apie nanodalelių koncentracijų santykius, didžiąja dalimi atvejų santykiai dydesni buvo gyvenamajame rajone. Taip pat buvo nustatyti dalelių dydžių pasiskirstymai ir cheminė sudėtis. Buvo padarytos išvados, kad lauke esantys teršalai turi didelę įtaką patalpų oro kokybei – išmatuotos koncentracijos patalpose esančiose šalia didelio intensyvumo kelių buvo pastebimai didesnės nei lauke gyvenamajame rajone šalia mažo intensyvumo kelių (*Sajani et al.*, 2015 [9]).

Panašūs matavimai, kaip ir anksčiau nagrinėtame italų straipsnyje, buvo atlikti ir aprašyti Vietnamo mokslininkų (*Quang, Hue, Thai, Mazaheri ir Morawska*, 2017 [10]). Buvo atliekami ypač smulkių dalelių kiekybinių ir kokybinių koncentracijų matavimai patalpų viduje. Buvo atsižvelgiama ir į dalelių atsiradimą ore, todėl buvo įvertinami taršos šaltiniai viduje ir lauke (čia taip pat matuotos KD koncentracijos). Gauti rezultatai parodė, kad kiekybines dalelių koncentracijas lemia lauke esantys taršos šaltiniai (dauguma tirtų namų turėjo natūralios ventiliacijos sistemas). Bendru atveju dalelių kiekiai buvo panašūs kitų mokslininkų atliktuose tyrimuose (*Quang, et al.*; 2017 [10]).

Kietųjų dalelių koncentracijos buvo matuotos ir namuose Boulder mieste Kolorado valstijoje, JAV (*Escobedo, Champion, Li ir Montoya*, 2014 [11]). Buvo ištirti 29 gyvenamieji pastatai, kurių plotas siekė nuo 60 iki 150 kv. metrų. KD koncentracijos buvo matuojamos gravimetriniu metodu tiek lauke, tiek viduje 24 valandų periodais, panaudojant „Tactical Air Sampler“ mėginių emiklį, gebantį praleisti turintį 5 L/min oro srautą. Be kietųjų dalelių buvo tirtas organinės anglies kiekis (*Escobedo et al.*; 2014 [11]).

Atlikus matavimus ir išanalizavus surinktus duomenis buvo nustatyta, jog vidutinė $\text{KD}_{2,5}$ koncentraciją namų viduje siekė $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, kai tuo tarpu lauke koncentracija buvo žymiai mažesnė – $4.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Daugumoje pastatų koncentracijos buvo tarp 5 ir $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Išskirtos organinės anglies kiekis buvo proporcingas nustatytiems KD kiekiams: namuose jos buvo 8.7 - $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$, o lauke 0

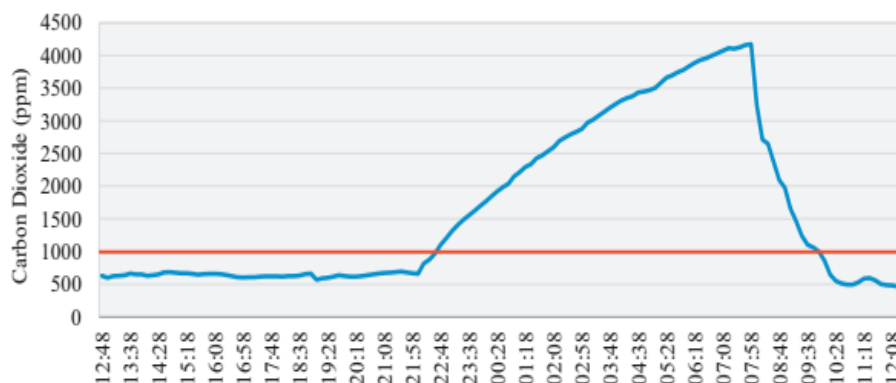
- 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Taigi, nors namuose buvo užfiksuotos didesnės koncentracijos nei lauke (kas indikuoja taršos šaltinio buvimą patalpoje), tačiau jos neviršijo nustatytų normų (*Escobedo et al.*; 2014 [11]).

Dar daugiau matavimų nustatyti dalelių koncentracijoms patalpose buvo atlikta ir aprašyta JAV mokslininkų straipsnyje (*Tunno et al.*, 2015 [12]). Buvo pasirinkta 21 gyvenamasis namas Pitsburgo mieste, JAV 1 savaitės trukmės $\text{KD}_{2.5}$ ir juodosios anglies matavimams. Dalelių mėginiai buvo surinkti naudojant „Harvard Personal Exposure Monitor“ kartu su vakuuminiu siurbliu ir „Teflon“ filtrais. Eksperimentai vyko žiemos ir vasaros laikotarpiais. Nustatyta kad dalelių koncentracijos buvo aukštesnės vasaros metu (vidurkis – 25,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), nei žiemos (18,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ir jos buvo didesnės nei lauke. Taip pat tyrimų rezultatai parodė, kad didžiausią įtaką koncentracijoms daro taršos šaltiniai, ypač tokie kaip rūkymas, patalpos viduje. Tačiau svarbios įtakos turi ir išoriniai, lauko, šaltiniai (*Tunno et al.*, 2015 [12]).

Platesni tyrimai buvo atliekami Švedijoje, kur buvo matuojamos kelių medžiagų koncentracijos gyvenamuosiuose namuose. Tam buvo pasirinkta 20 pasyvių namų ir 21 tradicinis namas (*Langer, Beko, Bloom, Widheden ir Ekberg*, 2015 [13]). Buvo atlikti temperatūros, santykinės drėgmės, CO_2 , NO_2 , O_3 , formaldehido, ir LOJ koncentracijų matavimai. Temperatūros ir drėgmės matavimams buvo naudota HOBO U12-012 matuoklis, CO_2 matavimams buvo naudojami CARBOCAP® CO_2 įrenginiai (veikiantys IR spektroskopijos metodu). NO_2 , ozono, formaldehido ir lakių organinių junginių koncentracijos išmatuotos naudojantis pasyviais mėginių ėmikliais. Surinkti duomenys buvo apdoroti statistinės analizės metodais, panaudojant programinę įrangą. Gauti rezultatai parodo, jog pasyviuose namuose oro kokybė yra panaši kaip ir tradiciniuose namuose, o kai kuriais atvejais net geresnė. Vidutinė patalpų temperatūra abiejų tipų namuose metų bėgyje išlieka pastovi (apie 22 laipsniai), CO_2 koncentracijos vidutiniškai svyruoja apie 1000ppm. Užfiksuotos NO_2 , O_3 ir formaldehido koncentracijos yra pastebimai mažesnės pasyviuose namuose (*Langer et al.*, 2015 [13]).

Panašūs eksperimentai buvo atliekami ir Didžiojoje Britanijoje, namuose su mechanine ventiliacija ir natūraliai ventiliuojamuose namuose (*McGill, Oyedele ir McAllister*, 2015 [14]). Pasirinktuose pastatuose žiemos ir vasaros laikotarpiais buvo atliekami CO_2 , temperatūros, santykinės drėgmės ir formaldehido matavimai. Kiekviename name tyrimai vyko svetainėje ir pagrindiniame miegamajame. CO_2 rodmenys buvo fiksuojami 24 valandų periodu. Vasaros laikotarpiu kai kur buvo fiksuojamos aukštos anglies dioksido koncentracijos, ypač didelės reikšmės buvo išmatuotos viename iš namų su mechanine ventiliacine sistema – koncentracijų pikinės reikšmės pasiekė 2558 ppm. Tačiau dauguma atvejų vidutinės reikšmės neviršijo rekomenduotinos 1000 ppm ribos. Tuo tarpu žiemos mėnesiais beveik visuose tyrime dalyvavusiuose namuose vidutinės CO_2 koncentracijos viršijo rekomenduojamas normas. Trijų

natūraliai ventiliuojamų namų miegamuosiuose buvo fiksuojamos > 2000 ppm reikšmės, pasiekiančios net 4000 ppm pikus (2.2.2 pav.).



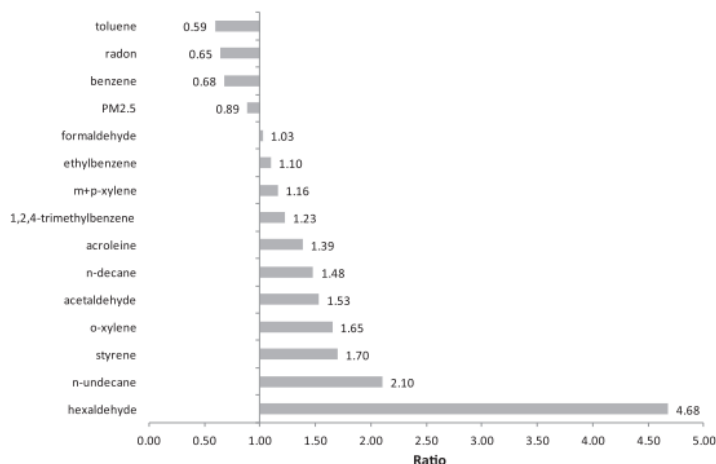
2.2.2 pav. CO₂ koncentracijų kaita ventiliuojamame pastatate paros laikotarpyje; oranžinė linija žymi maksimalią rekomenduotą ribą. (McGill *et al.*, 2015 [14]).

Išmatuotos vidaus temperatūros vasaros laikotarpiu buvo 21.5 – 25 laipsnių ribose, o poroje namų buvo fiksuojamos ir 28 laipsnių pikinės temperatūrų reikšmės. Tokios temperatūros gyventojams gali sukelti nemalonių pojūčių. Žiemą, kai kurių namų svetainėse buvo pasiekama ir 27 laipsnių temperatūra, kas gali byloti apie per daug intensyvų šildymo sistemos naudojimą. Kalbant apie santykinę drėgmę, vidutiniai jos dydžiai neišėjo iš rekomenduotinių ribų, nors kai kuriose patalpose buvo fiksuojami trumpalaikiai padidėjimai. Išmatavus formaldehido koncentracijas, buvo nustatyta, kad vidutinės reikšmės tiek vasarą, tiek žiemą buvo žemiau rekomenduotinos 0.08 ppm ribos, tačiau beveik visuose namuose pikinės reikšmės smarkiai viršydavo leidžiamas ribas. Surinkus duomenis apie gyventojų veiklą namuose nebuvo užfiksuota galimų teršalo šaltinių, taigi formaldehido šaltinis gali būti lauke. Verta paminėti, jog po formaldehido emisijos reikėdavo 4 valandų kad koncentracija grįžtų į rekomenduojamas ribas. (McGill *et al.*, 2015 [14]).

Kitame šaltinyje (Derbez *et al.*, 2014 [15]) pateikta eksperimentų, kurių metu tirta komforto sąlygos ir oro kokybė septyniuose naujos statybos energetiškai efektyviuose namuose, rezultatai. Prancūzų mokslininkai atliko keletos oro kokybę indikuojančių parametrų matavimus: LOJ, aldehydų, anglies oksidų, PM_{2.5} ir radono koncentracijas. Bendras LOJ kiekis buvo nustatinėjama fotojonizacijos detektoriumi „RAE Systems PGM 7240“. Atskiri LOJ (iš viso 16 skirtingų junginių) ir 4 aldehydai buvo nustatinėjami surenkant juos pasyviais mėginių ėmikliais kvantifikuojant juos dujų chromatografija – masių spektrometrija (GC – MS) ir didelio efektyvumo skysčių chromatografija su UV detekcija (HPLC – UV). Matavimų rezultatai parodo, kad aromatinių angliavandenilių, terpenų, alkanų ir aldehydų koncentracijos buvo didesnės prieš namuose apsigyvenant gyventojams. Kai kurių iš šių medžiagų koncentracijos bėgant laikui

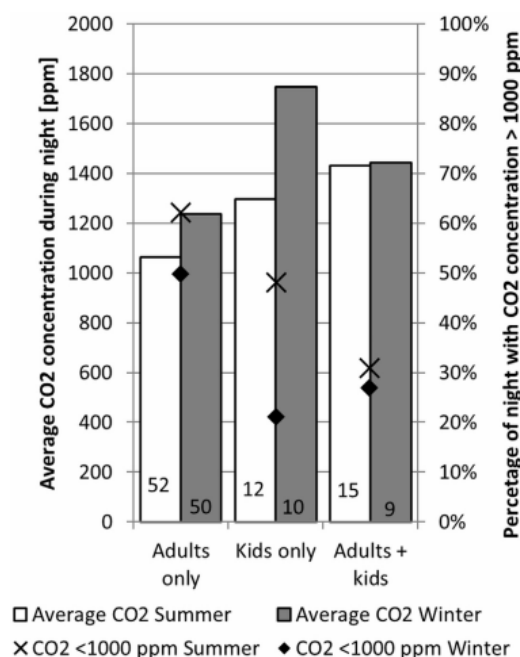
sumažėjo. Spėjama, kad tai susiję su sumažėjusiu šių junginių išskyrimu iš statybinių medžiagų. Taip pat buvo nustatyta, kad PM_{2.5}, radono, benzeno ir tolueno koncentracijos buvo mažesnės nei įprasta (2.2.3 pav.).

Kita vertus, daugelio kitų junginių koncentracijos ženkliai (25 proc. ir daugiau) viršijo įprastines vertes (*Derbez et al.*, 2014 [15]).



2.2.3 pav. Teršalų koncentracijų santykiai (palyginama naujos statybos namuose ir senesniuose namuose išmatuotos vidutinės vertės) (*Derbez, et al.*; 2014 [15]).

Dar viename moksliniame straipsnyje aprašoma Danijos mokslininkų atlikti tyrimai Grenlandijoje (*Kotol et al.*, 2014 [2]), kai buvo matuojama oro kokybė (CO₂ koncentracijos) trijų amžiaus kategorijų (senesnių kaip 1970 m., 1970 – 1990 m. ir naujesnių nei 1990 m. statybos) 79 – iuose gyvenamuosiuose namuose. Matavimai buvo atliekami „Vaisala GMW22“ matuokliais. Atlikus eksperimentus gauti rezultatai parodė, kad CO₂ koncentracijos pastatuose pastatytuose po 1980 metų yra didesnės tiek žiemos, tiek vasaros metu nei senesniuose namuose. Žiemos metu buvo fiksuojamos vidutinės 1307 ppm koncentracijos, o naktį kai kurių namų miegamuosiuose buvo fiksuojamos didesnės nei 4000 ppm koncentracijos. Taip pat buvo nustatyta, kad miegamuosiuose, kuriuose miega vaikai koncentracijos yra didesnės, nei tuose kur miega suaugusieji (2.2.4 pav.).



2.2.4 pav. CO₂ koncentracijos vaikų ir suaugusiųjų miegamuosiuose. (Kotol *et al.*, 2014 [2]).

Tyrėjų komanda Durban mieste Pietų Afrikos Respublikoje, atliko bandymus 246 namuose, priklausančiuose žemas ir vidutines pajamas gaunantiems gyventojams, kurių metu tyrė KD₁₀, NO₂ ir SO₂ junginių koncentracijas (Jafta, Barregard, Jeena ir Naidoo, 2017 [16]). Norint tyrimų rezultatams suteikti tikslumo, buvo atsižvelgta į tokius aspektus, kaip vartojamas kuras šildymui, gyventojų rūkymas, transporto srautai aplinkiniuose keliuose ir t.t. Kietųjų dalelių mėginiai buvo renkami pasitelkiant impaktorių, o azoto ir sieros dioksidai – pasyviais mėginių ėmikliais. Vidutinė nustatyta KD koncentracija siekė 64 μg/m³, o beveik 50 % tyrimuose dalyvavusių namų ji viršijo nustatytą leistiną 50 μg/m³ ribą. Nustatytų NO₂ koncentracijų (17 μg/m³) šaltiniai dažniausiai buvo dujinės viryklės ir transporto priemonės. Išmatuoti SO₂ kiekiai dažnu atveju buvo nedideli, o kai kada mažesni nei metodo aptikimo limitas. Taigi, tyrimo rezultatai leidė daryti išvadas, jog KD₁₀ ir NO₂ koncentracijos gali būti susijusios su kai kurių gyventojų sveikatos problemomis ir turi būti sumažintos (Jafta *et al.*, 2017 [16]).

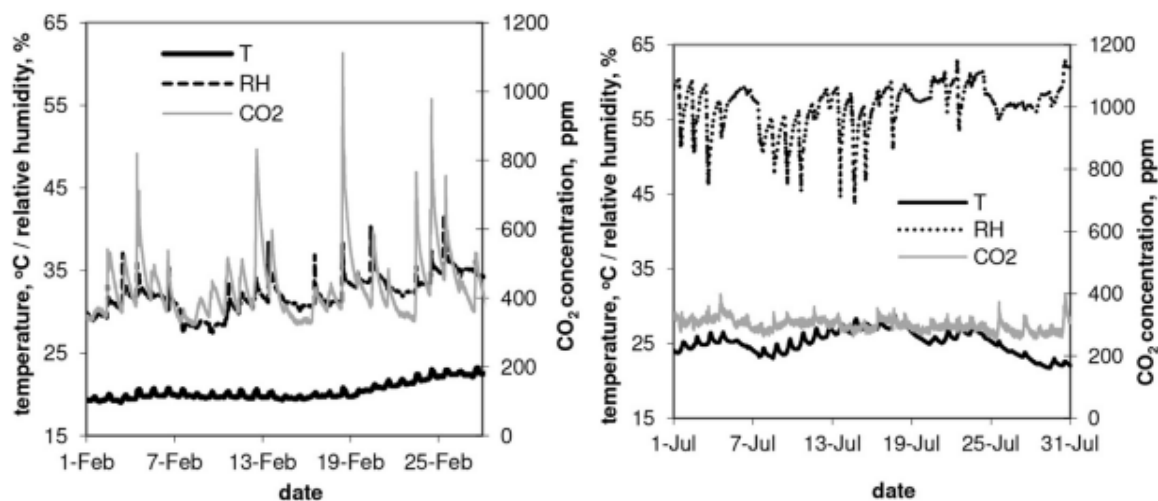
Kalbant apie komercines, industrines ar kitas viešas patalpas, čia oro kokybės tyrimai taip pat yra didelės svarbos, nes tokiose vietose žmonės taip pat praleidžia nemažai laiko. Todėl tokiose patalpose yra atlikta nemažai tyrimų, kad būtų žinoma oro kokybės padėtis. Kaip ir gyvenamosiose patalpose, čia eksperimentai gali apsiriboti tiek pavienių teršalų matavimais, tiek ir daugelio oro kokybės parametrų nustatymais. Tokie tyrimai, kai buvo atlikta 9 rodiklių, nusakančių oro kokybę, matavimai buvo vykdomi Pietų Korėjoje (Yang *et al.*, 2015 [17]). Buvo vykdomi plataus masto eksperimentai, tiriant oro kokybę 116 – oje Seulo mokyklų, kurie apėmė KD₁₀, anglies oksidų, azoto dioksido, formaldehido, bendro LOJ kiekio ir kt. medžiagų koncentracijų matavimai. Šio tyrimo aktualumą padidina ir tai, jog Pietų Korėjoje mokyklose oro kokybė yra reguliuojama

įstatymo, todėl mokyklų kabinetuose yra nustatytos tam tikros koncentracijų ribos. Atlikus bandymus ir išanalizavus duomenis buvo nustatyta, kad beveik visi teršalai savo koncentracijomis neviršija leistinų normų. KD_{10} koncentracijos klasėse kito nuo 17,3 iki 77,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, o vidutinė reikšmė buvo $42,3 \pm 9,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ribose. CO_2 koncentracijų vidurkis kito nuo 605 iki 988 ppm, o maksimali koncentracija, kuri buvo pasiekta - 2063 ppm (*Yang et al.*, 2015 [17]).

Mokyklose oro kokybė matuota ir Palestinoje esančiame Gazos ruože. Čia buvo vertinama užterštumas $KD_{2.5}$ ir KD_{10} klasėse dvylikoje mokyklų su natūralia ventiliacija (*Elbayoumi, Ramli, Yusof ir Madhoun*, 2013 [18]). Kiekvienoje mokykloje buvo pasirinkta po tris kabinetus. Dalelių kokybinės koncentracijos buvo matuotos naudojantis optiniu dalelių skaitikliu „HAL-HPC300“. Atlikus suplanuotus matavimus, tyrimų autoriai gavo tokius rezultatus: KD_{10} koncentracijos buvo $349,49 (\pm 196,57) \mu\text{g}/\text{m}^3$, $KD_{2.5}$ – $103,96 (\pm 84,96) \mu\text{g}/\text{m}^3$. Taigi daugumoje mokyklų kietųjų dalelių koncentracijos viršijo PSO rekomenduotinas normas. Taip pat, lauke KD koncentracijos buvo mažesnės nei viduje. Tyrimuose buvo įvertintas sezoniškumas – kietųjų dalelių kiekiai smarkiai priklausė nuo oro sąlygų ir įvairių klimatinių veiksnių. Straipsnio autoriai padarė išvadas, jog Gazos ruožas pasižymi dideliu oro užterštumu tiek patalpose tiek lauke (*Elbayoumi et al.*, 2013 [18]).

Panašūs oro parametrai buvo matuojami ir kitame tyrime, kuris buvo atliekamas dvejuose muziejuose Nikosijoje, Kipre. Buvo matuojami tokie parametrai, kaip anglies oksidai, įvairūs LOJ ir skirtingų frakcijų kietosios dalelės. Teršalai atliktuose eksperimentuose buvo matuojami tradiciniais metodais: KD koncentracijoms matuoti naudotas matuoklis „TSP Aerocet“, anglies monoksidui matuoti – „KIMO AQ200“, likusių dujinių teršalų koncentracijoms matuoti buvo naudojamas „DUVAS D1000“. Priešingai nei anksčiau nagrinėtame straipsnyje, šiame darbe aprašomi visiškai skirtingi rezultatai – oro kokybė abejuose muziejuose buvo apibūdinta kaip nepatenkinama (*Zorpas ir Skouroupatis*, 2016 [6]). Kone visų eksperimente tirtų dujinių teršalų, išskyrus CO_2 , koncentracijos viršijo leistinas ribas. KD kiekiai buvo leistinose ribose, tačiau tam tikros jų frakcijos yra labiau pavojingos už kitas, todėl kietosioms dalelėms taip pat reikalingas nuolatinis monitoringas.

Muziejinių patalpų oro kokybė buvo tiriama ir Lenkijoje (*Ferdyn-Grygierek*, 2016 [19]). Buvo vykdomi trijų parametrų matavimai: CO_2 , temperatūros ir drėgmės. Pasirinktas muziejus turėjo tik natūralią ventiliacinę sistemą. Surinkti duomenys parodė, jog dėl gana silpnos ventiliacijos, patalpų dydžio ir didelės išorinių veiksnių įtakos, yra stebimi dideli temperatūros ir drėgmės svyravimai (2.2.5 pav.).



2.2.5 pav. Oro kokybės rodiklių kaita vasario (kairėje) ir liepos (dešinėje) mėnesiais (*Ferdyn-Grygierek*, 2016 [19])

Tačiau, tuo pačiu didelės erdvės patalpos, net ir esant silpnai ventilacijai lėmė patenkinamas CO₂ koncentracijų vertes, kurios beveik niekada neviršijo leistinos 1000ppm ribos.

Biuro patalpose atlikti oro taršos matavimai, aprašyti kelių europos šalių mokslininkų parengtame straipsnyje, buvo skirti nustatyti 5 rūšių teršalų koncentracijas (*Mandin et al.*, 2017 [20]). Tarp matuotų medžiagų buvo ir kietosios dalelės (PM_{2.5}). KD dalelės buvo matuotos gravimetriniu metodu dviem metų laikais biurų pastatuose keliuose europos valstybėse. Iš viso šis teršalas buvo matuojamas 22 – uose pastatuose. Koncentracijos kito nuo 2,7 μg/m³ Suomijoje iki 17 μg/m³ Vengrijoje vasaros laikotarpiu ir nuo 3,4 μg/m³ iki 32 μg/m³ žiemos laikotarpiu atitinkamai.

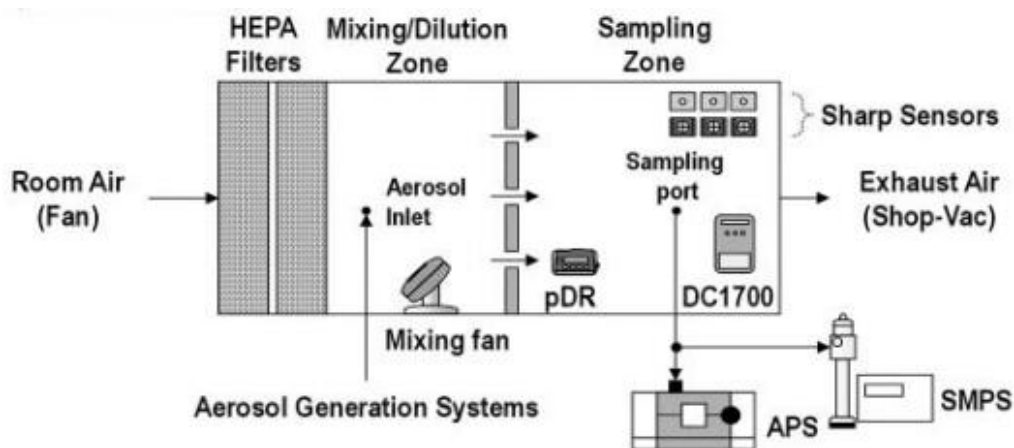
Gana inovatyvų mokslinį darbą pristatė prancūzų mokslininkai, kurie suprojektavo, realizavo ir validavo eksperimentinę patalpą, skirtą studijuoti įvairių LOJ ir anglies dvideginio pasiskirstymą ir įtaką oro kokybei patalpose esant kontroliuojamoms sąlygoms (*Harb, Sivachandiran, Gaudion, Thevenet ir Locoge.*, 2016 [21]). Kambario grintys, lubos ir sienos (įskaitant langus ir duris) buvo padengtos aliuminio folija, įmontuoti LOJ ir CO₂ įpurškimo mechanizmai, bei išdėstyta mėginių paėmimo angos. Temperatūra ir drėgmė patalpoje buvo reguliuojama autonomine oro kondicionavimo sistema. Tiriamos medžiagos – toluenas ir acetonas – buvo įpurškiamos į kambarį 18 ir 24 μl kiekiais atitinkamai, apskaičiavus, kad jos pasiskirstys kambaryje ir pasieks 100 ir 200 ppb koncentracijas. Praėjus 150 sekundžių po įpurškimo, buvo pasiektos maksimalios tolueno ir acetono koncentracijos – 102 ir 170 ppb. Taip pat buvo išmatuotas ir koncentracijų atsistatymo periodas, pakartotinai įpurškus medžiagų. Bandymų patikimumui padidinti, visos koncentracijos buvo matuojamos keliais metodais: SIFT-MS, HPLC – UV, TD – GC ir FID – MS (*Harb et al.*, 2016 [21]).

2.3. Parametrų, nusakančių oro kokybę, matavimo metodų apžvalga

Yra daugybė metodų oro kokybės parametrams išmatuoti, tačiau ne visi yra tinkami visiems teršalams – kaip yra žinoma, konkretus metodas gali būti skirtas tik vienai ar kelioms konkrečioms medžiagoms aptikti. Apžvelgsiu metodus, kurie gali būti naudojami tam tikrų parametrų monitoringui patalpose.

Vienas iš svarbių parametrų, nusakančių oro kokybę yra KD koncentracijos. Joms matuoti dažniausiai yra taikomi gravimetrinis ir fotometrijos metodai. Gravimetrinis metodas yra kone paprasčiausias – dalelių koncentracijos nustatomos pagal nusėdusių ant filtro dalelių svorį. Fotometriniu metodu taip pat yra gana paprasto veikimo principo; daleles tvyrančias ore aptinka išmatuodamas nuo jų atsispindėjusios šviesos intensyvumą. Matuojant koncentracijas fotometriniu metodu dažniausiai yra naudojami komerciniai įrenginiai - matuokliai, tačiau pastaruoju metu išpopuliarėjo mažą kainą turintys kietųjų dalelių sensoriai, kuriuos prijungus prie mikrokontrolerio ir šį suprogramavus, galima turėti pakankamai tikslų ir kokybišką matuoklį. Yra sukurta nemažai skirtingų jutiklių modelių, kurie skiriasi aptinkamų dalelių dydžiu ir tikslumu matuojant koncentracijas. Dar daugiau, priderinus bevielio ryšio modulį galima matavimų rezultatus perduoti nuotoliniu būdu (*Patel et al.*, 2017 [7]; *Ali et al.*, 2016 [22]).

Amerikos mokslininkai atliko mokslinį tyrimą, kurio metu tarpusavyje palygino trijų sensorių galimybes matuojant keturių aerozolių koncentracijas (*Sousan et al.*, 2016 [23]). Tirti prietaisai buvo „Dylos DC1700“, „Sharp GP“ ir „Sharp DN“. Nors skaitomi biudžetinėmis, vieno iš šių modelių („Dylos DC1700“) jutikliai gali kainuoti iki kelių šimtų JAV dolerių. Pastarasis įrenginys išsiskiria iš trijų ir tuo, kad matuoja ne kokybines, o kiekybines dalelių koncentracijas, be to gali atlikti matavimus dvejuose dalelių dydžių diapazonuose. Be to, dar vienas jo jutiklio privalumas – jam nereikalinga valdymo (mikrokontrolerinė) plokštė – tai yra vartoti paruoštas įrenginys. Pigesni „Sharp“ analogai matuoja kokybines dalelių koncentracijas ir tiki viename diapazone. Palyginimui buvo naudojami ir vidutinę bei aukštą kainą turintys jutikliai, kurių savikaina siekia iki 60 tūkst. JAV dolerių. Aprašyto eksperimento eiga nurodyta diagramoje (2.3.1 pav.).



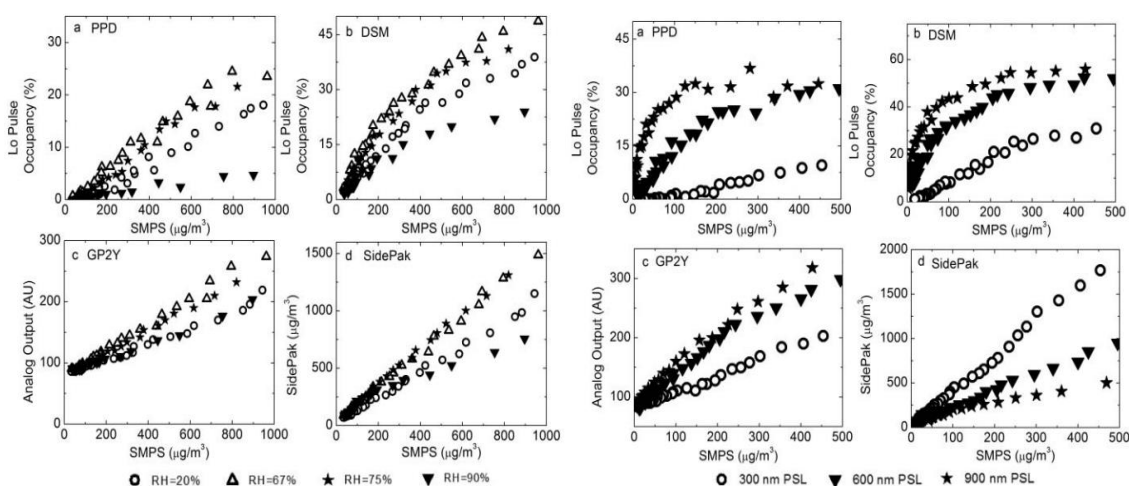
2.3.1 pav. Aprašyto eksperimento eigos diagrama (*Sousan et al.*, 2016 [23])

Generuojamas aerosolis buvo praskiedžiamas su švairiu oru, profiltruotu dvejais HEPA filtrais ir išmaišomas naudojant mažą ventiliatorių. Matavimo zonoje buvo įrengta po tris kiekvienos rūšies sensorius. Nustatyti gautų rezultatų glaudumui buvo apskaičiuotas variacijos koeficientas ir palyginta su EPA rekomenduojamu 10 proc. koeficientu. Taip pat buvo vertinama sensorių tikslumas ir efektyvumas matuojant kokybinę ir kiekybinę koncentracijas. Pirmiausiai rezultatai pateikiami DC1700 jutikliui – nustatomas dalelių kiekybinės koncentracijos matavimo efektyvumas: smulkių dalelių matavimo efektyvumas buvo žemas; dalelės mažesnės už mikrometrą buvo aptinkamos 2% efektyvumu, 1.3 μ m dalelės - 52% efektyvumu, o 5 μ m dalelės 29%. Tuo tarpu stambių dalelių aptikimo efektyvumas šiam įrenginiui siekia iki 82%. Nustatytas šio įrenginio glaudumas yra labai didelis (variacijos koeficientas 2 - 15%), tuo tarpu „Sharp“ sensorių generuojami matavimų duomenys pasižymi dideliu išsibarstymu (variacijos koeficientas - 51%), tačiau tarpusavyje abiejų tipų „Sharp“ sensoriai rodo panašias tendencijas. Vis dėlto, atlikus kalibravimo procedūras sensoriai įgavo pakankamai didelį duomenų glaudumą. Mokslininkai taip pat aptiko, kad visų jutiklių matavimų rezultatams įtakos turi ir aerosolio tipas – didžiausias jautrumas fiksuotas matuojant druskos aerosolius, virinimo metu generuojamus dūmus ir Arizonos pakelių dulkes. Mažiausias jautrumas fiksuotas dyzelino išmetamosioms dujoms (*Sousan et al.*, 2016). Buvo padarytos išvados, kad šiuos jutiklius galima pakankamai sėkmingai panaudoti matuojant gyvenamųjų ir darbo patalpų KD koncentracijas.

Panašius eksperimentus atliko ir JAV bei Kinijos mokslininkų komanda, kuri atliko trijų KD sensorių įvertinimą ir kalibravimą laboratorinėmis sąlygomis (*Wang et al.*, 2015 [24]). Tokio pobūdžio eksperimentas pasirinktas todėl, kad dažnai tokie jutikliai nebūna kruopščiai sukalibruoti, duomenų kokybė nebūna įvertinta ir stokojama dokumentacijos. Buvo pasirinkta tirti šešis jutiklių aspektus: atsako tiesiškumas, matavimų glaudumas, aptikimo limitas, priklausomybė nuo dalelių sandaros, priklausomybė nuo dalelių dydžio ir drėgmės bei temperatūros įtaka. Atlikti bandymams buvo sudaryta kalibravimo platforma; pasirinkti sensoriai buvo „Shinyei PPD42NS“,

„Samyoung DSM501A“ ir „Sharp GP2Y1010AU0F“. Pirmieji du buvo valdomi kompiuterio pagalba pajungus juos per duomenų rinkimo įrenginį, tuo tarpu „Sharp“ sensorius buvo valdomas per mikrokontrolerį. Duomenų palyginimui ir kaip kalibraciniai etalonai buvo pasitelkti trys komerciniai matuokliai. Tiriami prietaisai buvo patalpinti į sandarią akrilinio stiklo kamerą (58 x 58 x 28 cm) į kurią vamzdeliu buvo leidžiamos sugeneruotos dalelės (*Wang et al., 2015 [24]*).

Atsako tiesiškumas buvo vertinamas naudojant tokius metodus kaip mažiausio kvadrato regresija ir RMA regresija atvaizduojant dumenis kartu su TSI Sidepack matuoklio parodymais. Dalelės buvo generuojamos deginant smilkalus. Sensorių duodamų rezultatų glaudumas buvo randamas matuojant tikslumą ir rezultatų pasikartojamumą. Dėl universalios visiems trims sensoriams kalibravimo kreivės trūkumo buvo išvedamos tiesinės koreliacijos, todėl sensorius su mažesnio tiesiškumo charakteristikomis turi mažesnę tikslumą. Aptikimo limitas (LOD) buvo nustatinėjamas naudojant plačiai taikomą Kaizerio – Spekerio metodą. Matavimų tikslumo priklausomybė nuo dalelių sudėties buvo sprendžiama generuojant trijų skirtingų medžiagų daleles: NaCl, sacharozės ir amonio nitrato. Matavimai taip pat atlikti esant skirtingai oro temperatūrai ir drėgmei. Atlikus visus bandymus buvo nustatyta, kad Sharp sensorius parodė didžiausią tiesiškumą. Kita vertus kiti du jutikliai turi žymiai mažesnę aptikimo ribą. Visiems jutikliams buvo nustatytos panašios charakteristikos vertinant dalelių pobūdį, dalelių dydžio įtaką, drėgmės ir temperatūros įtaką. Maksimalios išmatuojamos koncentracijų vertės svyruoja apie 4 – 5 mg/m³. Iš grafikų (2.3.2 pav.) aiškiai matyti kad labai didelę įtaką sensorių parodymams turi santykinė drėgmė ir dalelių dydis (*Wang et al., 2015 [24]*).



2.3.2 pav. Matavimų priklausomybė nuo santykinės drėgmės (kairėje) ir dalelių diametro (dešinėje) (*Wang et al., 2015 [24]*)

Vis dėlto, autorių nuomone visi tirti mažos savikainos jutikliai pademonstravo didelį tiesiškumą ir rezultatų atkartojamumą. Norint dar labiau padidinti jų tikslumą galima įvesti duomenų vidurkinimą. Buvo padarytos išvados kad šie sensoriai yra tinkami taršai matuoti ir vertinti oro kokybės būklę (*Wang et al.*, 2015 [24]).

Kita JAV mokslininkų komanda atliko bandymus tik su vienu jutikliu, tačiau jį įvertino ne tik laboratorijos, bet įprastomis sąlygomis. Bandymai buvo atliekami pasitelkiant „Plantower PMS 1003/3003“ lazerinį dalelių skaitiklį. Šis santykinai pigus jutiklis geba išmatuoti kietąsias daleles aplinkos ore trimis diapazonais KD_1 , $KD_{2.5}$ ir KD_{10} . Eksperimentai vyko sensorių patalpinus tiek vėjo tunelyje, tiek patalpoje, o taip pat ir lauke. Be koncentracijų matavimų buvo atliktas aptikimo limito nustatymas ir koncentracijų pasiskirstymo pagal dalelių dydį (*Kelly et al.*, 2017 [25]).

Serbijos mokslininkai taip pat atliko eksperimentus, kurių metu lygino dviejų metodų KD monitoringui patalpose efektyvumus. Buvo lyginama koncentracijų matavimas „Turnkey OSIRIS“ realaus laiko dalelių matuokliu ir tradiciniu gravimetriniu metodu (*Tasič et al.*, 2012 [26]). Eksperimentų metu buvo matuojama $KD_{2.5}$ ir KD_{10} frakcijų koncentracijos 60 dienų laikotarpyje; bandymai truko 60 dienų, o duomenys buvo pateikiami 24h vidutinėmis reikšmėmis. Atlikus bandymus ir išanalizavus rezultatus, buvo gauta, kad gravimetriniu būdu matuotos koncentracijos variavo $8,8 - 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ir $8,2 - 65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ diapazonuose atitinkamai KD_{10} ir $KD_{2.5}$ frakcijoms. Dalelių matuokliu išmatuotos koncentracijos buvo $6,9 - 65,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ KD_{10} ir $5 - 26,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $KD_{2.5}$. Tyrimo autoriai padarė išvadas, kad nors matuoklis rodė mažesnes koncentracijas nei tos, kurios buvo išmatuotos gravimetriniu metodu, tačiau rezultatai tarpusavyje stipriai koreliavo, todėl prieita sprendimo, kad tirtas matavimo įrenginys yra pakankamai tikslus prietaisas matuoti KD koncentracijas patalpose (*Tasič et al.*, 2012 [26]).

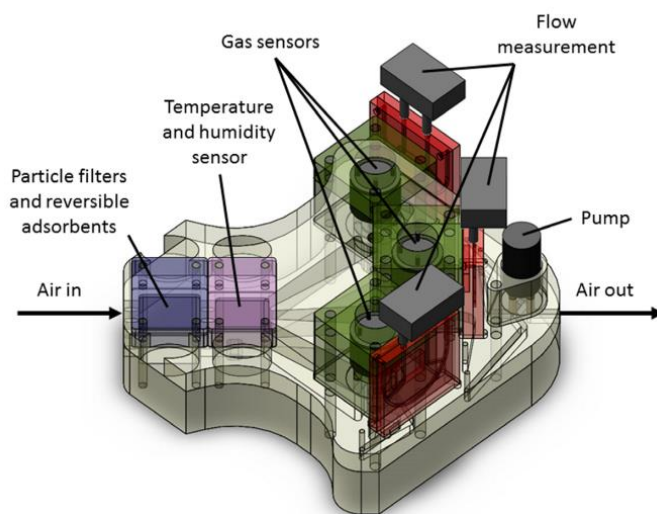
Dujiniams teršalams, tame tarpe ir LOJ, nustatyti dažniausiai naudojamas metodas yra naudojant chromatografines kolonėles ar pasyvius mėginių ėmiklius taip surenkant proporcingus taršai tiriamų medžiagų kiekius, paskui jų tikslas koncentracijas nustatant chromatografiniais metodais. Taip pat dujines medžiagas ir jų koncentracijas galima nustatyti specialiais matuokliais, kurie gali būti skirti pavienėms arba kelioms medžiagoms vienu metu. Kaip ir KD koncentracijų matavimo atveju, buvo sukurti nebrangūs sensoriai dujinių medžiagų matavimams, kurie gali būti taip pat panaudoti kuriant savo sistemą oro kokybės matavimams. Tokie sensoriai buvo panaudoti keliuose moksliniuose projektuose, kur mokslininkai analizavo sistemų su šiais sensoriais pritaikomumą (*Ali et al.*, 2016; *Zhou et al.*, 2015; *Caron et al.*, 2016 [22], [27], [28]). Yra sensorių anglies oksidų, NO_2 , O_3 ir LOJ matavimams.

Jutiklių, skirtų pasirinktų LOJ matavimams, įvertinimas ir koncentracijų matavimai šioms medžiagoms buvo atliekamas Vokietijos ir Portugalijos jungtinės mokslininkų komandos. Eksperimentų pagrindą sudarė metalo oksido puslaidininkinių dujų jutiklių panaudojimas

patalpoje su reguliuojama temperatūra formaldehido, benzeno ir naftaleno koncentracijoms. Jutikliai buvo sujungti į matavimų sistemą, kuri be LOJ, gali matuoti ir oro drėgmę bei temperatūrą. Buvo generuojama kintamos anksčiau minėtų teršalų koncentracijos. Tyrimo rezultatai autoriams leido daryti išvadas, kad jutiklių sistema yra tinkama matuoti žemas LOJ koncentracijas patalpose (dešimčių ppb lygio), tačiau norint išmatuoti žemesnes, sistema reikalauja tobulinimo (*Leidinger et al.*, 2014 [29]).

Pietų Korėjos mokslininkai (*Tran, Dang ir Chang*, 2017 [30]) taip pat suprojektavo įrenginį, galintį matuoti LOJ koncentracijas patalpų ore, kuris taip pat pasižymi galimybe išmatuoti atmosferos slėgį, bei oro drėgmę, be to gali veikti be energijos šaltinio (pasižymi energy harvesting) savybe. Išbandžius prietaisą, buvo išsiaiškinta, kad jis gali išmatuoti LOJ koncentracijas iki 2ppm.

Dar vieną įrenginį, gebantį matuoti temperatūrą, oro drėgmę ir lakius organinius junginius, sukūrė jungtinė mokslininkų komanda iš kelių Europos mokslo institucijų (*Mandayo et al.*, 2015 [31]).



2.3.3 pav. Europos mokslininkų komandos suprojektuotas oro kokybės stebėsenos įrenginys (*Mandayo et al.*, 2015 [31])

Įrenginyje buvo sumontuoti trys atskiri dujinių junginių jutikliai, oro srauto matuokliai ir dalelių filtras. Projekto tikslas buvo sukurti sistemą gebančią efektyviai stebėti patalpų oro kokybę, ir kurią būtų galima integruoti kartu su ventiliacijos sistemomis, siekiant užtikrinti aukštą oro kokybę. Atlikti sistemos badymai parodė, kad jutiklių jautrumas atitinka minimalų OSHA lygį, tačiau buvo nuspręsta, kad sistema bus tobulinama užtikrinti dar didesnę matavimų jautrumą ir tikslumą (*Mandayo et al.*, 2015 [31]).

Kitiems oro kokybės matavimams, tokiems kaip temperatūra, oro drėgmė taip pat yra ne vienas matavimų metodas, kaip ir anksčiau minėtais atvejais.

Galima rasti ir universalių prietaisų – kelių sensorių modulių, kurie gali matuoti CO, CO₂ koncentracijas, temperatūrą ir oro drėgmę vienu metu.

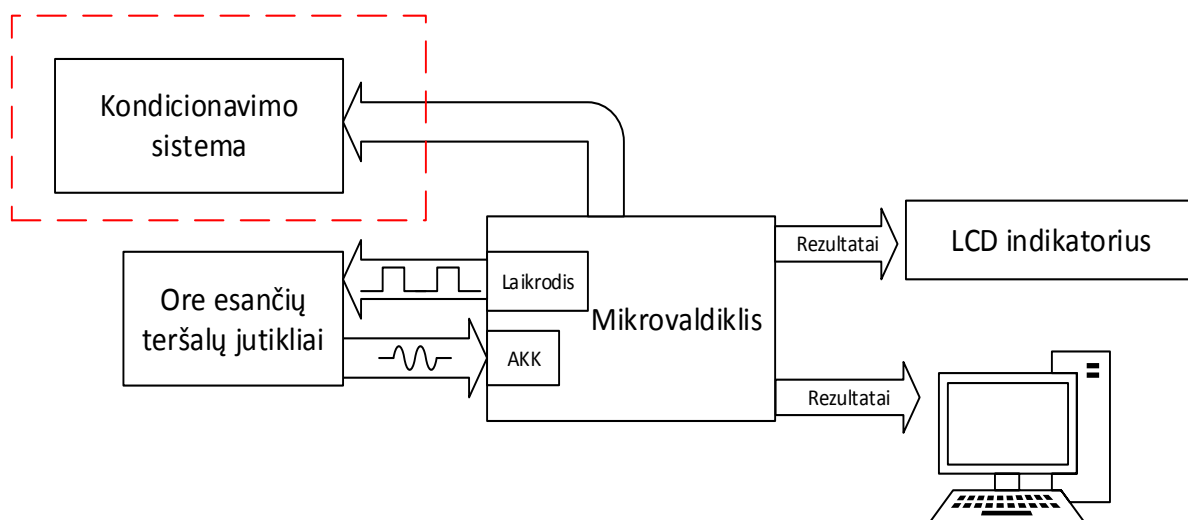
3. Tyrimo metodika

3.1. Eksperimento planas ir metodologija

Remiantis literatūra, galima planuoti darbo struktūrą ir atlikimo eigą. Pirmiausiai buvo parenkami tyrimų objektai, šiuo atveju tai – patalpose esančio oro teršalai. Kadangi yra projektuojama sistema jų nustatymui, reikia pasirinkti junginius kurių koncentracijas ji galės matuoti. Nuo šio parametro priklauso sistemos struktūra, projekto įgyvendinimo sudėtingumas ir, žinoma, galutinė kaina.

Kaip vienas iš matuojamų oro kokybės rodiklių buvo pasirinkta kietųjų dalelių (KD_{2.5}) koncentracija.

Numatoma galutinė sistema (3.1.1 pav.) bus sudaryta iš kelių blokų: duomenų surinkimo (sensoriai), valdymo ir duomenų apdorojimo (mikrokontroleris) ir rezultatų atvaizdavimo bei kaupimo (LCD ekranas ir kompiuteris atitinkamai).



3.1.1 pav. Patalpų oro kokybės stebėsenos sistemos struktūrinė schema

Pavaizduotoje sistemos struktūroje, raudonai apibraukta papildoma funkcija, kurią būtų galima naudoti pasirinktinai esant būtinybei sumažinti oro užterštumą patalpoje. Šio funkcijos veikimo būdas būtų gana paprastas: viršijus tam tikrą (ar visų) teršalų koncentracijas, mikrovaldiklis automatiškai sugeneruotų signalą ir juo įjungtų oro kondicionavimo sistemą. Toks sprendimas gali būti įgyvendinamas kaip išmaniojo namo (*angl.* – smart house) sistemos dalis ir valdomas pagal vartotojo poreikius.

3.2. Sistemos komponentų parinkimas

Sistemos komponentų parinkimas yra gana svarbus etapas projektavimo eigoje – nuo pasirinktų variantų priklausys darbo atlikimo sudėtingumas, pritaikymo galimybės ir kaštai. Kadangi orientuojamasi į mažos kainos įrenginį, prototipui reikia parinkti kuo pigesnius komponentus, tačiau tokius, kurie smarkiai neribotų įrenginio funkcijų. Žemiau išvardinti parinkti sistemos mazgai.

Pagrindinė sistemos dalis – valdymo plokštė – buvo pasirinkta „MSP430 Launchpad“ maketas (3.2.1 pav.), kurios pagrindą sudaro „MSP430 FR6989“ mikrovaldiklis. Šis valdiklis yra gana naujas, tačiau sulaukęs pripažinimo. Jis pasižymi dideliu prievadų skaičiumi, kurie leidžia prijungti daug išorinių įrenginių, dideliu našumu ir didelės raiškos analogas – kodas keitikliais (AKK), kurie leidžia tiksliai nuskaityti sensorių siunčiamus signalus. Taip pat, priešingai nei dauguma šio kainos segmento mikroprocesorinių įrenginių, pavyzdžiui „STM Nucleo“, šis turi LCD ekranėlį rezultatų atvaizdavimui, kurio buvimas yra aktualus jeigu, pavyzdžiui, norima matuoti koncentracijas neprijungus prie kompiuterio arba jei nėra poreikio kaupti matavimų rezultatus, o tiesiog stebėti taršos lygį realiu laiku.



3.2.1 pav. „MSP430 Launchpad“ maketas su „MSP430 FR6989“ mikrovaldikliu (Texas Instruments Incorporated, 2017 [32])

Kaip vienas iš sensorių buvo pasirinkta „Sharp GP2Y10“ optinis kietųjų dalelių jutiklis (3.2.2 pav.), kuris veikia IR fotometrijos metodu – šviesos diodas skleidžia infraraudonųjų spindulių šviesą, kuri susidūrusi su kliūtimi (šiuo atveju dulkėmis ir kitokiomis kietosiomis dalelėmis) atsispindi nuo jos. Foto tranzistorius surenka nuo kliūties atsispindėjusią šviesą ir pagal jos intensyvumą bei atspindžio kampą generuojamas signalas. Tam kad visas šis procesas vyktų, jutiklio šviesos diodui turi būti siunčiami tam tikro dažnio stačiakampiai impulsai. Šis jutiklis didžiausią efektyvumą pasiekia dalelėms esant 1 μm – 2.5 μm diametro ruože.



3.2.2 pav. „Sharp GP2Y10“ kietųjų dalelių sensorius (SparkFun Electronics, 2017 [33])

Savo techninėmis specifikacijomis jis yra panašus visiems analogiškiems KD jutikliams, kainų segmente iki 10 eurų. Tačiau rinkoje galima rasti ir itin preciziškų jutiklių, kurie pasižymi daug platesniu matavimų diapazonu, ir gali išmatuoti ir gerokai smulkesnes daleles, tačiau dauguma jų kainuoja keliolika ar net keliasdešimt kartų daugiau. Pavyzdžiui, japonų kompanija „Shinyei technology“ gamina jutiklius gebančius aptikti dalelių nuo 0.5 μm diametro koncentracijas, tačiau jų kaina yra apytiksliai 70 eurų. Tokie jutikliai šiuo atveju, projektuojant įrenginį kuris turėtų nedidelę kainą, nėra tinkami.

Matavimo duomenų perdavimas į kompiuterį užtikrinamas naudojant signalų keitiklį, jungiant per USB sąsają.

3.3. Įrenginio prototipo projektavimas ir parametrai

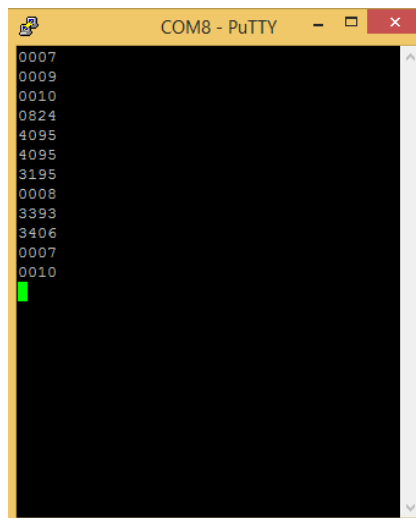
Turint reikiamos sistemos komponentus, jie sujungiami; daviklis prijungiamas prie valdymo plokštės specialiu prievadu, kurie jam bus reikalingi.

Viską sujungus, rašoma programa mikrovaldikliui, kad būtų galima valdyti sistemą. Programavimas atliekamas įterptinėms sistemoms adaptuota C kalba (*angl.* – embedded C – programming language) naudojant „IAR Embedded Workbench“ programavimo aplinką. Ši programavimo kalba pasižymi paprastesniu komandų sarašu ir lengvesne struktūra, nei žemesnio lygio (pvz. „assembler“) programavimo kalbos

Viso buvo surinkta 6 tokie įrenginio prototipai, kad būtų galima atlikti oro kokybės kaitos matavimus ne tik laiko, bet ir erdvės atžvilgiu – įvertinti taršos pasiskirstymą ir koncentracijų pokyčius įvairiuose patalpų taškuose.

Išmatuotų koncentracijų parodymai pateikiami kas 1 sekundę; kadangi vienam matavimui atlikti įrenginys užtrunka ~ 9 ms., buvo įgalintas rezultatų vidurkinimas, kurio pagalba, priklausomai nuo vidurkinimui naudojamų matavimų rezultatų skaičiaus galima reguliuoti duomenų pateikimą. Šiuo atveju yra vidurkinama 110 reikšmių.

Išmatuotos KD koncentracijos pasitelkiant USB sąsają persiunčiamos į kompiuterį, kur būna taip pat atvaizduojamos ekrane, bei kaupiamos į bylą (3.3.1 pav.). Kiek matavimo duomenų galima sukaupti, daugiausiai priklauso nuo kompiuterio, prie kurio įrenginys yra prijungtas – ribojantis faktorius čia yra tik kietojo disko talpa.

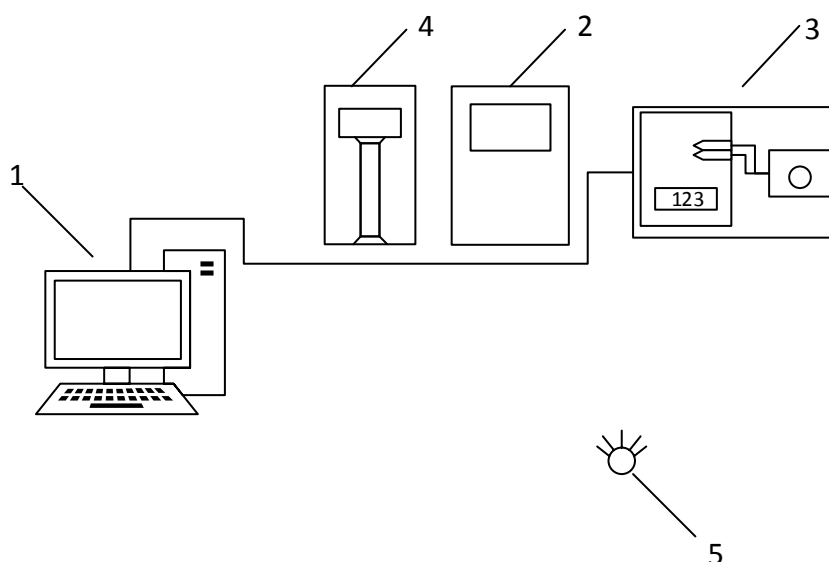


3.3.1 pav. Įgalintas sistemos išmatuotų KD koncentracijų atvaizdavimas kompiuteryje. Paveikslėlyje matyti duomenų surinkimo programos langas.

4. Tyrimų rezultatai ir aptarimas

4.1. Sistemos kalibravimas

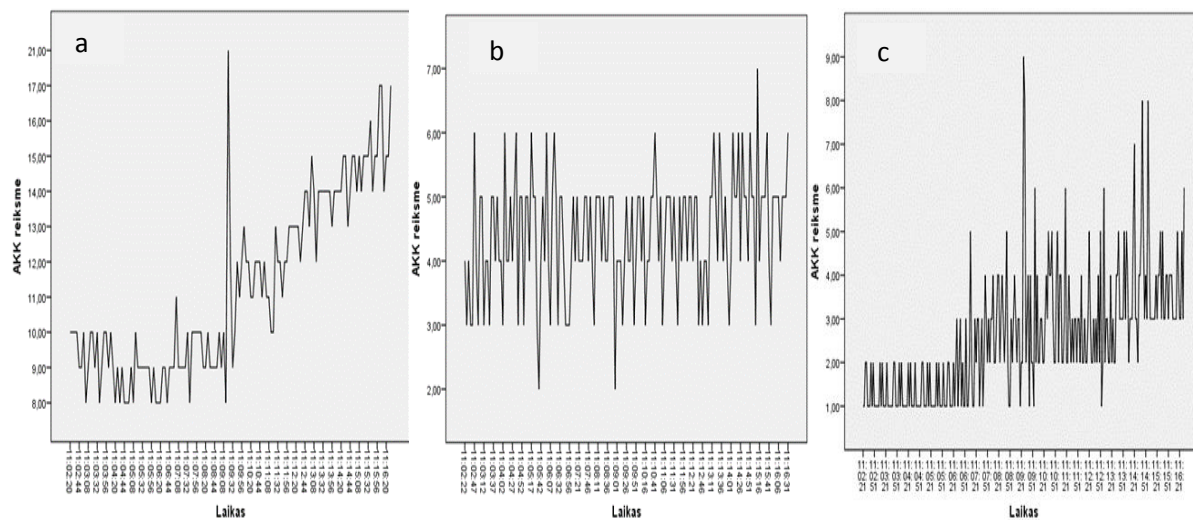
Matavimų metu norint gauti teisingus rezultatus, reikalinga atlikti kalibravimo procedūrą. Suprogramavus įrenginio mikrovaldiklį yra rodoma tiksliai AKK keitiklio sugeneruota reikšmė, kuri proporcinga sensoriaus duodamo atsako signalo lygiui. Pirmasis kalibravimo procesas (4.1.1 pav.) buvo atliekamas sukurtą įrenginį pastačius priešais du skirtingus taršos šaltinius, skleidžiančius įvairių dydžių kietasias daleles. Taršos šaltiniais buvo smilkalai ir smėlio dulkės. Kaip etaloniniai instrumentai čia buvo naudojama nefelometras „Personal DataRAM™ pDR-1000AN“ ir optinis dalelių skaitiklis „Lighthouse HANDHELD 3016-IAQ“.



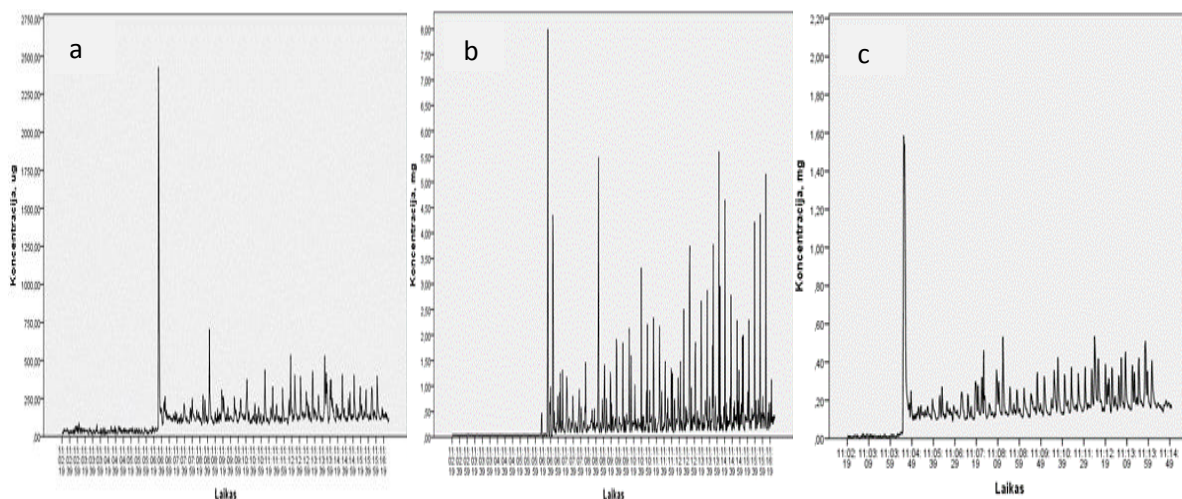
4.1.1 pav. Kietųjų dalelių koncentracijų stebėsenos įrenginio prototipo kalibravimo schema. 1 – Kompiuteris duomenų kaupimui, 2- Nefelometras, 3 – Kalibruojami suprojektuoti įrenginiai, 4 – Optinis dalelių skaitiklis, 5 – Taršos kietosiomis dalelėmis šaltinis

Atlikus matavimus ir turint prietaisų rodmenis, sugretinami rezultatai ir nustatinėjamos esamos tendencijos tarp maketo duodamų reikšmių ir specializuotų įrenginių parodymų. Analizė atlikti buvo naudojama „IBM SPSS Statistics“ programinė įranga. Išanalizavus gautus duomenis, buvo nustatyta, kad projektuoto įrenginio fiksuojami dydžiai yra netikslūs, o kai kuriais atvejais (kai tarša buvo generuojama smilkalais) neturi tokių tendencijų, kaip komercinių įrenginių parodymai (4.1.2 pav. ir 4.1.3 pav.).

Kadangi suprojektuoto įrenginio prototipo ir komercinių prietaisų parodymai nesutampa tarpusavyje, todėl visai natūralu, kad tarp jų beveik nėra koreliacijos: koreliacijos koeficientų dydžiai tesiekia $0.02 \div 0.05$.

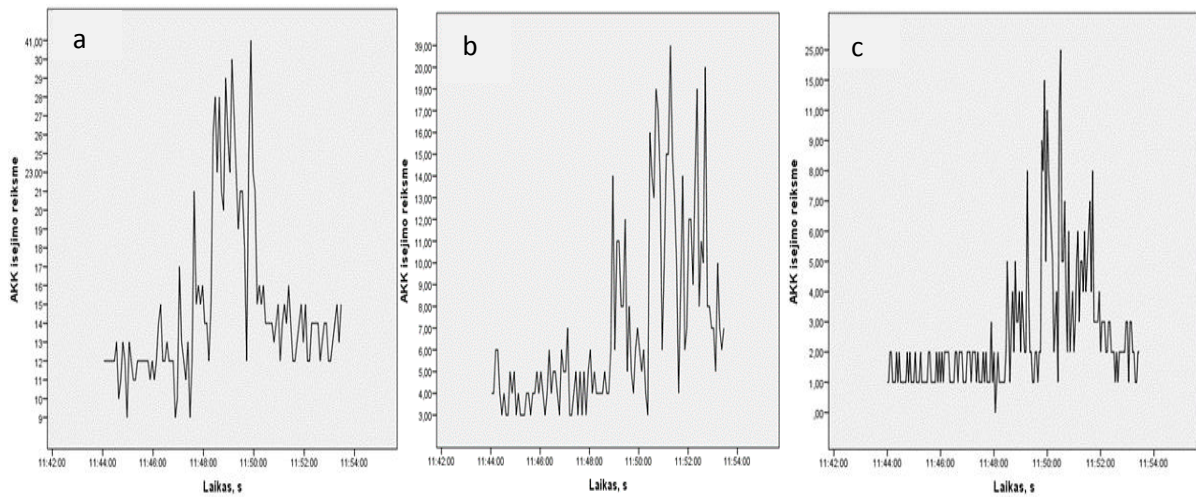


4.1.2 pav. Trijų pasirinktų projektuojamų įrenginių išmatuoti parodymai taršą generuojant smilkalais: a – pirmojo maketo parodymai, b – trečiojo maketo parodymai, c- penktojo maketo parodymai

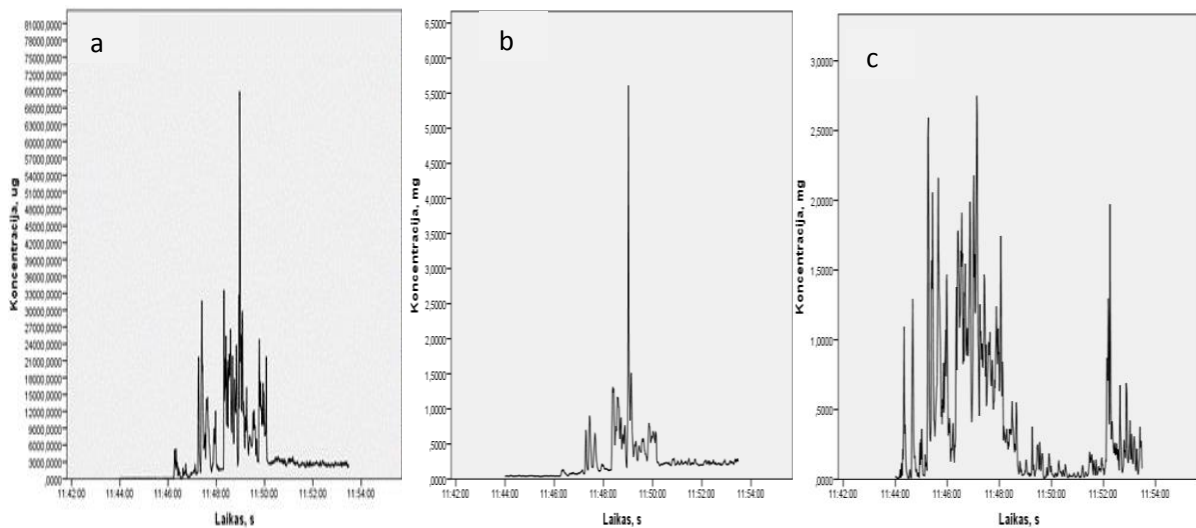


4.1.3 pav. a - Optiniu dalelių skaitikliu (bendra dalelių koncentracija), b - elektroniniu impaktoriumi (KD10) ir c - nefelometru išmatuoti parodymai taršą generuojant smilkalais.

Iš pateiktų grafikų matyti, jog nors komerciniai įrenginiai fiksuoja gana dideles taršos KD koncentracijas, suprojektuoti įrenginiai taršos nefiksuoja. Panašūs rezultatai (4.1.4 pav. ir 4.1.5 pav) buvo gaunami ir tuo atveju kai taršos šaltinis buvo dulkės – nors sukonstruotų matuoklių parodymai tendencijomis šiek tiek panašėjo į išmatuotus komerciniais įrenginiais, - taigi čia koreliacija tarp rezultatų šiek tiek didesnė, - tačiau išmatuotos vertės buvo taip pat neproporcingai žemos.



4.1.4 pav. Trijų pasirinktų projektuojamų įrenginių išmatuoti parodymai taršą generuojant dulkėmis: a – pirmojo maketo parodymai, b – trečiojo maketo parodymai, c- penktojo maketo parodymai

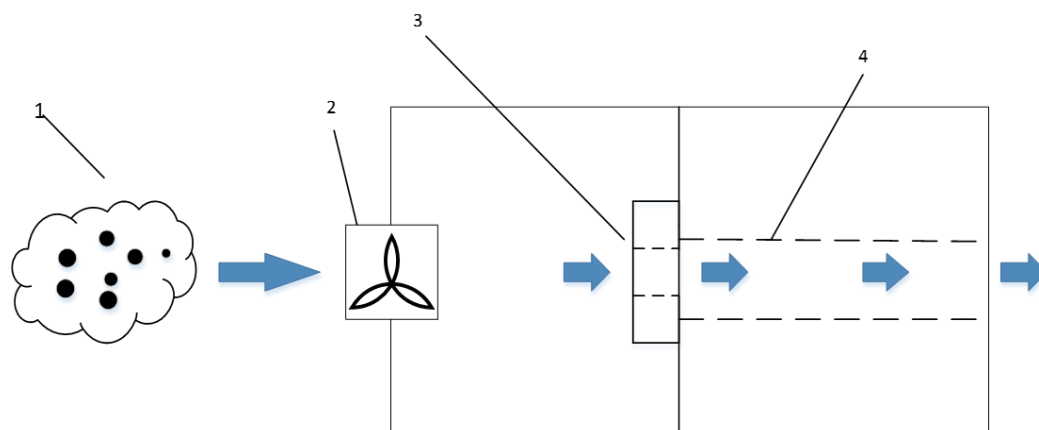


4.1.5 pav. a - Optiniu dalelių skaitikliu (bendra dalelių koncentracija), b - elektroniniu impaktoriumi (KD10) ir c - nefelometru išmatuoti parodymai taršą generuojant dulkėmis.

Nesukalibruoto įrenginio parodymų diapazonas yra $0 \div 4095$ vienetų (4095 atitinka maksimalų jutiklio atsaką matuojant koncentracijas t.y. maksimalią teorinę jutiklio gebamą fiksuoti koncentraciją, kuri pagal dokumentaciją yra $4,5 - 5 \text{ mg/m}^3 \text{ KD}_{2,5}$), tuo tarpu aukščiausia, bet kurio iš maketų išmatuota vertė buvo apytiksliai 50 matavimo vnt., kai visi prietaisai rodė dalelių koncentracijas apie 3 mg/m^3 .

Taigi, šiek tiek paeksperimentavus (nukreipus į jutiklio detekcijos zoną nedidelį ventiliatorių ir priešais jį generuojant taršą), bei nuodugniau panagrinėjus literatūrą, buvo išsiaiškinta, kad naudojamiems jutikliams reikalingas nuolatinis oro srautas, nutaikytas tiesiogiai į juos. Atsižvelgiant į tai, buvo suprojektuotas ir pagamintas korpusas susidedantis iš kelių kamerų; korpusas talpina ne tik jutiklį, bet ir valdymo plokštę bei duomenų perdavimo modulį. KD detekcijos kameroje be jutiklio sumontuotas ventiliatorius pučiantis užterštą orą tiesiogiai per

jutiklio angą (vietą kur atliekama detekcija), taip pat suformuotas specialus kanalas oro išėjimui, užtikrinantis, kad oras nesikaupu korpuso viduje (4.1.6 pav.).



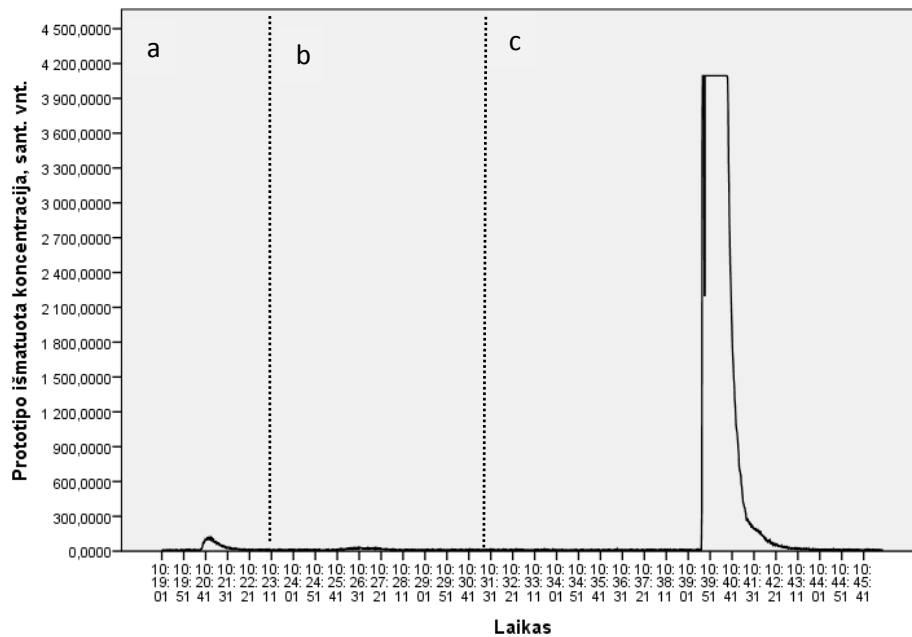
4.1.6 pav. Oro kokybės stebėsenos įrenginio korpuso veikimo principas: 1 - oras, užterštas kietosiomis dalelėmis; 2 – ventilatorius oro traukimui į korpuso vidų; 3 – kietųjų dalelių jutiklis; 4 – kanalas oro išėjimui

Korpusas buvo suprojektuotas naudojant „SolidWorks“ programinę įrangą ir pagamintas naudojantis 3D spausdinimo technologiją (4.1.7 pav.).



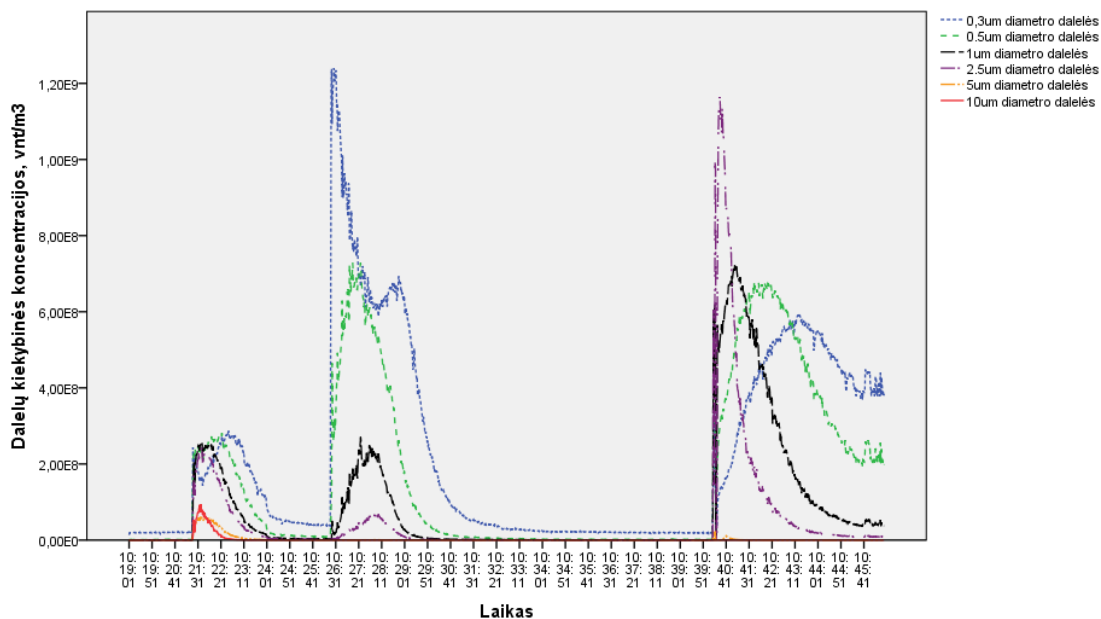
4.1.7 pav. Pagamintas oro kokybės stebėsenos įrenginio korpusas.

Sumontavus įrenginio prototipą į korpusą, eksperimentai, kurių metu atliekamas kalibravimas buvo pakartojami siekiant įvertinti pakeitimų įtaką ir galimą pagerėjimą koncentracijų matavimuose. Šio eksperimento metu tarša buvo generuojama trimis šaltiniais: purškiant plaukų laką (purškiama 4 sekundes), deginant smilkalus ir deginant aliejų (1 ml. aliejaus 470° C temperatūroje). Prieš kiekvieną taršos generavimo etapą, bandymų kamera buvo išvėdinama iki tokio lygio, kad visi naudoti prietaisai rodytų reikšmes kuo artimesnes nuliui.



4.1.8 pav. Modifikuoto įrenginio prototipo parodymai, gauti eksperimento metu: a) purškiant plaukų laką, b) deginant smilkalus, c) deginant aliejų

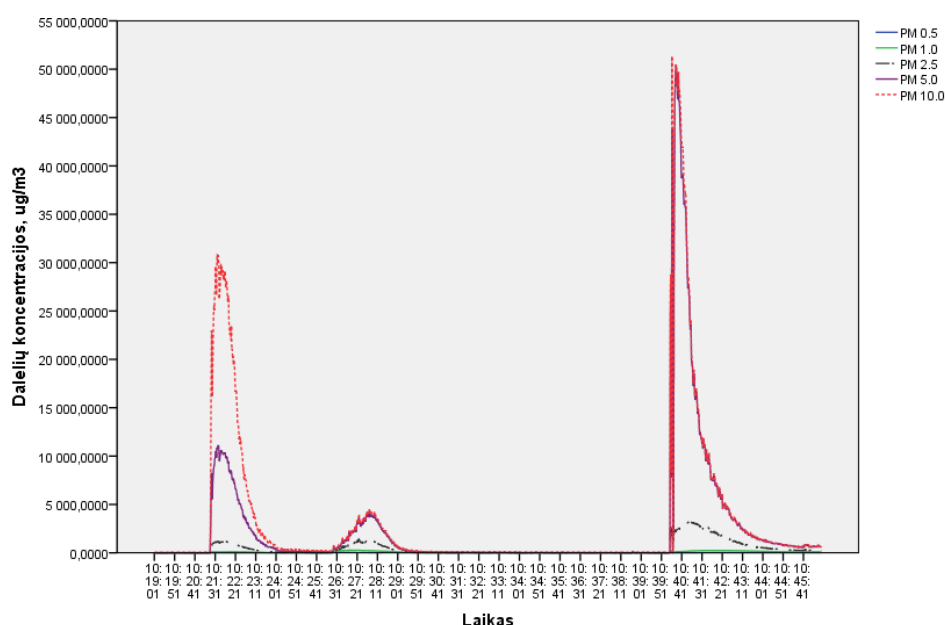
Iš įrenginio parodymų matyti, kad didžiausia KD koncentracija užfiksuota, kai tarša generuojama deginant aliejų, kitais dviem atvejais, įrenginys fiksavo nežymius padidėjimus. Nustatyti priežastį, kodėl įrenginys fiksavo žemas koncentracijas, kai taršos šaltinis buvo plaukų lakas ir smilkalai, buvo nutarta išanalizuoti, kokios dalelės ir jų skaitinės vertės buvo generuojama kiekvienu atveju, kadangi palyginimui naudotas optinis dalelių skaitiklis geba fiksuoti ne tik masės koncentracijas bet ir skaitines koncentracijas.



4.1.9 pav. Optiniu dalelių skaitikliu išmatuotos skaitinės skirtingų diametrų dalelių koncentracijos

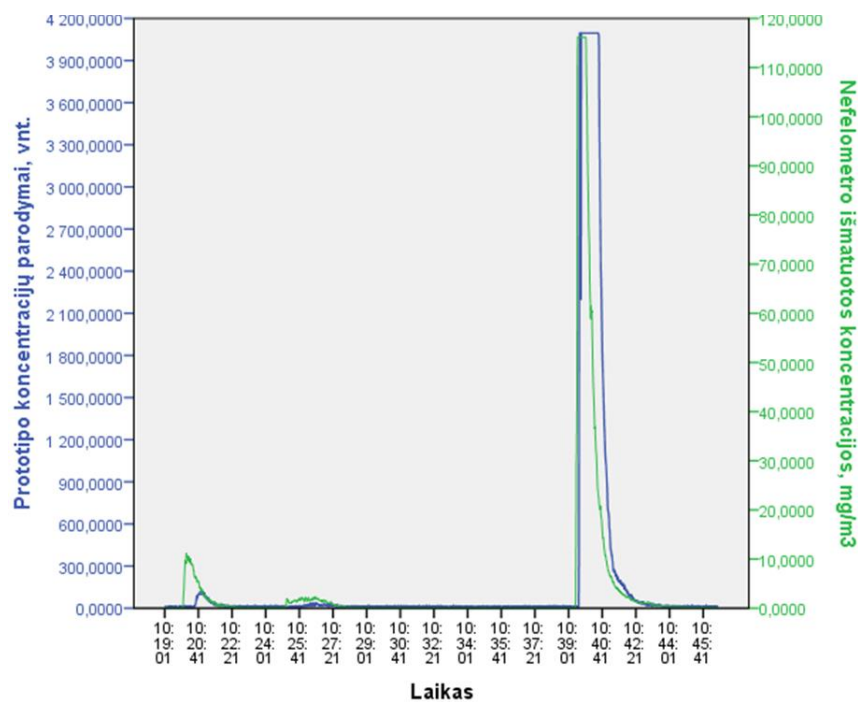
Iš nubrėžto grafiko matyti, jog purškiant plaukų laką ir deginant smilkalus daugiausiai susidarė 0.3µm, 0.5µm ir 1µm dydžio dalelių, tuo tarpu didesnių dalelių skaičius buvo žymiai mažesnis (smilkalų deginimo atveju, skaitinė 0,3 µm dalelių koncentracija buvo 20 kartų didesnė nei 2,5 µm dalelių). Deginant aliejų stebima priešinga situacija – mažesnių dalelių užfiksuojama žymiai mažiau nei didesniųjų. Iš to galima daryti prielaidą, kad įrenginio prototipas efektyviai matavo tik didesnio dydžio dalelių koncentracijas, nes nėra pakankamai tikslus smulkių dalelių koncentracijų matavimams. Be to, kaip metodinėje dalyje buvo minėta, jutiklio dokumentacijoje pažymėta, jog didžiausias jo efektyvumas yra dalelėms esant 1 µm – 2.5µm diametro ruože.

Toliau buvo nagrinėti optinio dalelių skaitiklio ir nefelometro koncentracijų parodymai, siekiant palyginti surinktus duomenis.

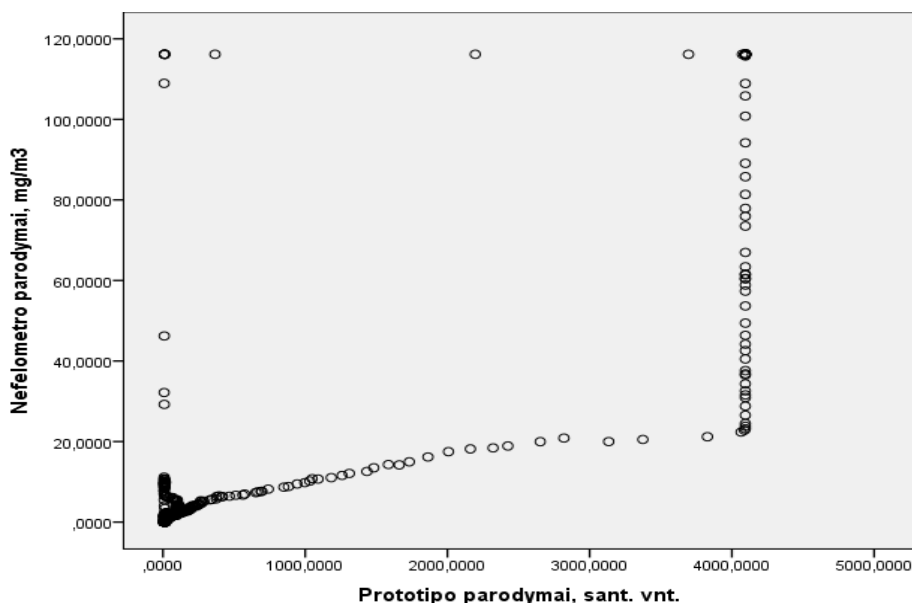


4.1.10 pav. Optiniu dalelių skaitikliu išmatuotos įvairaus diametro kietųjų dalelių koncentracijos

Iš rezultatų, gautų komerciniais prietaisais, galima spręsti, kad nefelometru išmatuotos koncentracijos turi gana artimas tendencijas kaip ir sukonstruoto prototipo, t.y. grafikų formos yra labai panašios (4.1.11 pav.). Tą patvirtina ir aukštas (0,79) koreliacijos koeficientas tarp šių prietaisų parodymų; tokio dydžio koeficientas parodo stiprų ryšį. Tuo tarpu koreliacijos koeficientai tarp įrenginio ir optinio dalelių skaitiklio kinta ribose nuo ~ -0,10 iki ~ 0,35 (žr. 2 priedas) ir tuo pačiu parodo kad vyrauja tik silpnas ryšys. Rezultatų skirtumus, gautus lyginant įrenginio prototipo ir nefelometro, bei įrenginio prototipo ir optinio skaitiklio parodymus galima paaiškinti tuo, kad skirtingų prietaisų veikimas remiasi skirtingais metodais, be to skiriasi ir prietaisų matavimų diapazonas pagal dalelių dydį. Kietųjų dalelių įrenginio prototipo kalibravimui rekomenduojama naudoti nefelometrą.



4.1.11 pav. Įrenginio prototipo ir nefelometro parodymų palyginimas



4.1.12 pav. Įrenginio prototipo ir nefelometro parodymų tarpusavio koreliacijos grafikas

4.2. Rezultatų apibendrinimas

Atlikus pirmuosius įrenginio prototipo bandymus, gauti rezultatai ir įrenginio savybės netenkino lūkesčių, todėl buvo įvesta keletas patobulinimų. Atlikus matavimus, naudojant modifikuotą įrenginį, buvo gauti ir išanalizuoti rezultatai, iš kurių matyti, jog jie yra gana panašūs į tuos gautus matuojant nefelometru. Koncentracijų lygiai, galimi išmatuoti suprojektuotu prototipu, tiesiogiai priklauso nuo vyraujančių dalelių diametro – efektyviausiai matuojamos

koncentracijos, kai dalelių diametras yra didesnis nei $1\mu\text{m}$. Tačiau galima teigti jog sukurtas įrenginys gali būti naudojamas oro kokybės matavimams.

Nors suprojektuotas įrenginys dabartinėje stadijoje nepasižymi labai dideliu funkcionalumu, tačiau jo privalumas, prieš palyginimui naudotus komercinius prietaisus yra palyginti nedidelė kaina. Galutinė savikaina - ~200 eurų (įskaičiuojant specialų korpusą; elektroninės dalies savikaina – 30 eurų); aukštą korpuso kainą lemia tas faktorius, jog jis, kaip vienetinis gaminys buvo gaminamas kol kas brangiu 3D spausdinimo metodu (gaminant masiškai, net ir tuo pačiu metodu vieneto savikaina būtų mažesnė). Palyginimui naudotas nefelometras, priklausomai nuo tiekėjo kainuoja apie 3000 eurų, o optinis dalelių skaitiklis apie 3500 eurų. Tokie matuokliai gali būti per daug brangūs įsigyti asmenims, norintiems išsimatuoti oro taršą namuose, ar įstaigoms, turinčioms mažesnę biudžetą

5. Išvados

1. Atlikus literatūros šaltinių analizę buvo nustatyta, kad dažniausiai teršalų koncentracijos patalpų ore yra matuojamos naudojant komercinius prietaisus, tačiau pastaruoju metu išpopuliarėjo mažą kainą turintys jutikliai, kuriuos prijungus prie mikrokontrolerio ir šį suprogramavus, galima gauti pakankamai tikslius ir kokybiškus duomenis.
2. Atlikus rinkoje prieinamų komponentų analizę sistemos projektavimui buvo pasirinkta valdymo plokštė „MSP430 Launchpad“ ir „Sharp GP2Y10“ optinis kietųjų dalelių jutiklis, kuris didžiausią efektyvumą pasiekia dalelėms esant 1 μm – 2.5 μm diametro ruože. Programavimas buvo atliekamas įterptinėms sistemoms adaptuota C kalba, naudojant „IAR Embedded Workbench“ programavimo aplinką.
3. Kietųjų dalelių koncentracijų stebėsenos įrenginio prototipo kalibravimui buvo naudojamas nefelometras „Personal DataRAM™ pDR-1000AN“ ir optinis dalelių skaitiklis „Lighthouse HANDHELD 3016-IAQ“. Nefelometru išmatuotos koncentracijos turi artimas tendencijas kaip ir sukonstruoto prototipo, tą patvirtina ir aukštas koreliacijos koeficientas (0,79), tuo tarpu optiniu skaitikliu nustatytos koncentracijos gerokai skyrėsi nuo įrenginio prototipo parodymų.
Rezultatų skirtumus, gautus lyginant įrenginio prototipo ir nefelometro, bei įrenginio prototipo ir optinio skaitiklio parodymus galima paaiškinti tuo, kad skirtingų prietaisų veikimas remiasi skirtingais metodais, be to skiriasi ir prietaisų matavimų diapazonas pagal dalelių dydį. Kietųjų dalelių įrenginio prototipo kalibravimui rekomenduojama naudoti nefelometrą.
4. Gautų matavimų rezultatų analizė parodė, kad kietųjų dalelių įrenginio prototipas efektyviausiai matuoja didesnių nei 1 μm dydžio dalelių koncentracijas. Nustatyta, jog sukurtas įrenginys geba išmatuoti KD2.5 koncentracijas siekiančias iki 4,1 mg/m^3 .
5. Įvertinus gautus matavimų rezultatus galime teigti, kad kietųjų dalelių koncentracijų matavimo įrenginio prototipas yra tinkamas matuoti oro kokybę patalpose. Įrenginio prototipas pasižymi plačiomis matuojamų parametrų plėtimo savybėmis, taigi jį galima apjungti į sistemą, gebančią matuoti skirtingų teršalų koncentracijas (KD, LOJ, CO₂ ir kt.)

6. Rekomendacijos tolimesniam įrenginio prototipo tobulinimui

- Padidinti ventiliatoriaus, kuris tiekia užteršto oro srautą jutikliui, sukimosi intensyvumą. Šis patobulinimas leistų užtikrinti didesnę oro srautą per detekcijos zoną, kas leistų išmatuoti koncentracijas tiksliau. Tai pat būtų sumažinta dalelių nusėdimas korpuse (ypač išėjimo kanale). Ventiliatoriaus apsisukimų dydis priklauso nuo jo maitinimo įtampos šiuo atveju jis prijungtas prie valdymo plokštės, kuri gali tiekti tik 3.3 voltų arba 5 voltų (minimali ventiliatoriaus darbui reikalinga vertė) įtampas. Tiekiamą įtampą ventiliatoriui galima padidinti dviem būdais. Pirmasis – naudoti bateriją, kuri tiektų ventiliatoriui reikalingą el. srovę. Tačiau šis metodas – gana neefektyvus ir nepatogus naudoti, nes bateriją reiktų gana dažnai keisti. Kitas variantas – naudoti įtampos aukštinimo keitiklį, kurį būtų galima prijungti tiesiogiai nuo valdymo plokštės.
- Kitas galimas įrenginio modifikavimas – nuo vienos valdymo plokštės valdyti du jutiklius, kuriuos būtų galima sutalpinti į vieną korpusą skirtingose kameroje (arba toje pačioje kameroje vieną už kito), o matuojant koncentracijas išvesti abiejų jutiklių išmatuotų dydžių vidurkius.
- Dar vienas galimas patobulinimas – signalizavimo apie viršytą norminį koncentracijos lygį. Tai galėtų būti indikacija mirksinčiu šviesos diodu ar zirzeklio („buzzer“) tipo garsiakalbiuku.
- Bendram matavimo sistemos funkcijų praplėtimui galima prijungti jutiklį dalelių skaitinei koncentracijai matuoti, pvz.: „Shinyei PPD42NJ“ taip pat galima naudoti LOJ ir (arba) CO, CO₂ jutiklius. Daugumą tokių jutiklių galima įsigyti mažiau nei už 10 eurų, taigi jie visos sistemos savikainos drąstiškai nekeistų.
- Šį KD koncentracijų matavimų įrenginio prototipą būtų galima panaudoti kaip išmaniojo namo (*angl. – smart house*) sudedamąją dalį – pagal taršos lygį namų patalpose valdyti kondicionavimo ir/arba oro valymo įrangą.

7. Naudota literatūra

1. **Kalimeri K.K., Saraga D.E., Lazaridis V.D. et al.** (2016). Indoor air quality investigation of the school environment and estimated health risks: Two-season measurements in primary schools in Kozani, Greece. *Atmospheric Pollution Research*, 7, p. 1128 – 1142
2. **Kotol M., Rode C., Clausen G., Nielsen T.R.** (2014). Indoor environment in bedrooms in 79 Greenlandic households. *Building and Environment*, 81, p. 29 – 36
3. **Li Q., Jiang J., Wang S. et al.** (2017). Impacts of household coal and biomass combustion on indoor and ambient air quality in China: Current status and implication. *Science of the Total Environment*, 576, p. 347 – 361
4. **Kumar P., Pirjola L., Ketzel M., et al.** (2013). Nanoparticle emissions from 11 non-vehicle exhaust sources - A review. *Atmospheric Environment*, 67, p. 252 – 277.
5. **Zhang M., Zhang S., Feng G., et al.** (2017). Indoor airborne particle sources and outdoor haze days effect in urban office areas in Guangzhou. *Environmental Research*, 154, p. 60 – 65.
6. **Zorpas A., Skouroupatis A.** (2016). Indoor air quality evaluation of two museums in a subtropical climate conditions. *Sustainable Cities and Society*, 20, p. 52 – 60.
7. **Patel S., Li J., Pandey A., et al.** (2017). Spatio-temporal measurement of indoor particulate matter concentrations - using a wireless network of low-cost sensors in households using solid fuels. *Environmental Research*, 152, p. 59 – 65.
8. **Salthammer T., Schripp T., Wientzek S., Wensing M.** (2014). Impact of operating wood-burning fireplace ovens on indoor air quality. *Chemosphere*, 103, p. 205 – 211.
9. **Sajani S., Ricciardelli I., Trentini A., et al.** (2015). Spatial and indoor/outdoor gradients in urban concentrations of ultrafine particles and PM_{2.5} mass and chemical components. *Atmospheric Environment*, 103, p. 307 – 320.
10. **Quang T.N., Hue N.T., Thai P., et al.** (2017). Exploratory assessment of indoor and outdoor particle number concentrations in Hanoi households. *Science of the Total Environment*, 599 - 600, p. 284 – 290.
11. **Escobedo L.E., Champion W.M., Li N., Montoya L.D.** (2014). Indoor air quality in Latino homes in Boulder, Colorado. *Atmospheric Environment*, 92, p. 69 – 75.
12. **Tunno B.J., Naumoff - Shields K., Cambal L., et al.** (2015). Indoor air sampling for fine particulate matter and black carbon in industrial communities in Pittsburgh. *Science of the Total Environment*, 536, p. 108 – 115.
13. **Langer S., Boko G., Bloom E., et al.** (2015). Indoor air quality in passive and conventional new houses in Sweden. *Building and Environment*, 93, p. 92 – 100.

14. **McGill G., Oyedele L., McAllister K.** (2015). Case study investigation of indoor air quality in mechanically ventilated and naturally ventilated UK social housing. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4, p. 58 – 77.
15. **Derbez M., Berthineau B., Cochet V., et al.** (2014). Indoor air quality and comfort in seven newly built, energy-efficient houses in France. *Building and Environment*, 72, p. 173 – 187
16. **Jafta N., Barregard L., Jeena P.M., Naidoo R.J.** (2017). Indoor air quality of low and middle income urban households in Durban, South Africa. *Environmental Research*, 156, p. 47 – 56
17. **Yang J., Nam I., Yun H., et al.** (2015). Characteristics of indoor air quality at urban elementary schools in Seoul, Korea: Assessment of effect of surrounding environments. *Atmospheric Pollution Research*, 6, p. 1113 – 1122.
18. **Elbayoumi M., Ramli N.A., Yusof N.F.F.M., Madhoun W.A.** (2013). Spatial and seasonal variation of particulate matter (PM10 and PM2.5) in Middle Eastern classrooms. *Atmospheric Environment*, 80, p. 389 – 397.
19. **Ferdyn-Grygierek J.** (2016). Monitoring of indoor air parameters in large museum exhibition halls with and without air-conditioning systems . *Building and Environment*, 107, p. 113 – 126
20. **Mandin C., Trantallidi M., Cattaneo A., et al.** (2017). Assessment of indoor air quality in office buildings across Europe – The OFFICAIR study. *Science of the Total Environment*, 579, p. 169 – 178.
21. **Harb P., Sivachandiran L., Gaudion V., et al.** (2016). The 40 m³ Innovative experimental Room for INdoor Air studies (IRINA): Development and validations. *Chemical Engineering Journal*, 306, p. 568 – 578
22. **Ali A.S., Zanzinger Z., Debose D., Stephens B.** (2016). Open Source Building Science Sensors (OSBSS): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection. *Building and Environment*, 100, p. 114 – 126
23. **Sousan S., Koehler K., Thomas G. et al.** (2016). Inter-comparison of low-cost sensors for measuring the mass concentration of occupational aerosols. *Aerosol science and technology*, 50, p. 462 – 473
24. **Wang Y., Li J., Jing H. et al.** (2015). Laboratory Evaluation and Calibration of Three Low-Cost Particle Sensors for Particulate Matter Measurement. *Aerosol science and technology*, 49, p. 1063 – 1077
25. **Kelly K.E., Whitaker J., Petty A. et al.** (2017). Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor. *Environmental Pollution*, 221, p. 491 – 500

26. **Tasič V., Jovašević - Stojanović M., Vardoulakis S., et al.** (2012). Comparative assessment of a real-time particle monitor against the reference gravimetric method for PM10 and PM2.5 in indoor air. *Atmospheric Environment*, 54, p. 358 – 364
27. **Zhou P., Huang G., Zhang L., Tsang K.F.** (2015). Wireless sensor network based monitoring system for a large-scale indoor space: data process and supply air allocation optimization. *Energy and Buildings*, 103, p. 365 – 374
28. **Caron A., Redon N., Thevenet F. et al.** (2016). Performances and limitations of electronic gas sensors to investigate an indoor air quality event . *Building and Environment*, 107, p. 19 – 28
29. **Leidinger M., Sauerwald T., Conrad T. et al.** (2014). Selective Detection of Hazardous Indoor VOCs Using Metal Oxide Gas Sensors. *Procedia Engineering*, 87, p. 1449 – 1452
30. **Tran T.V., Dang N.T., Chang W.Y.** (2017). Battery-free smart-sensor system for real-time indoor air quality monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 248, p. 930 – 939
31. **Mandayo G.G., Gonzalez-Chavarri J., Hammes E. et al.** (2015). System to control indoor air quality in energy efficient buildings. *Urban Climate*, 14, p. 475 – 485
32. MSP430FR6989 LaunchPad Development Kit. Peržiūrėta 2017, sausio 20, Texas Instruments Incorporated tinklapyje: <http://www.ti.com/tool/MSP-EXP430FR6989#0>
33. Optical Dust Sensor - GP2Y1010AU0F. Peržiūrėta 2017, sausio 20, SparkFun Electronics tinklapyje: <https://www.sparkfun.com/products/9689>

Programinis kodas sistemos mikrovaldikliui

```

#include <msp430fr6989.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <driverlib.h>
#include <lcd_c.h>
#include <Sensor.h>
#include <LCD1.h>
#include <string.h>
#define LED1 0x01
#define TMR 0x08

long sum;
unsigned int value_calib, value_cal, skaitliukas, value, value1, measurement, d, in, temp;
long result,v;
unsigned char sk1, sk2, sk3, sk4, sk5;

// velinimas
void delay(unsigned int a)
{
    unsigned int i=0;
    for(i=0; i<a*5; i++)
    {
    }
}

// ADC-skaitymo funkcija
void init_ADCch4()
{
    // ADC12 konfiguracija
    ADC12CTL0 = ADC12SHT0_2 | ADC12ON; // nuskaitymo laikas ir daznis, ADC12 ijungimas
    ADC12CTL1 = ADC12SHP + ADC12CONSEQ_2; // kartoti nuskaityma is jutiklio

    ADC12CTL2 = ADC12RES_2 + ADC12DF; // 12 bitu nuskaitymas 0...4095
    ADC12MCTL0 = ADC12INCH_4; // A4 kanalas;
    P8DIR = 0x7F;
    P8SEL0 |= 0x80;
    P8SEL1 |= 0x00;
    ADC12CTL0 |= ADC12ENC + ADC12SC; // igalinti konvertavima
    while (ADC12CTL1 & ADC12BUSY); // vyksta konvertavimas
    __no_operation();
    value = ADC12MEM0 - 0x8000; // nuskaityti rezultata
}

//pertrauktis
#pragma vector = TIMER0_B0_VECTOR
__interrupt void TIMER0_B0_ISR(void)
{
    //P1OUT ^= LED1;
    P3OUT|=TMR;
    delay(7);
    P3OUT = ~TMR;
    delay(14);
    init_ADCch4();
}

```

```

void main( void )
{
  init_LCD();
  clearLCD();

  // Sustabdomas laikmacio "sargis"
  WDTCTL = WDTPW + WDTHOLD;
  PM5CTL0 &= ~LOCKLPM5; // low power mode isjungimas
  P1OUT = ~LED1;
  P1DIR = LED1;
  P3DIR = TMR;
  P2DIR = 0x03;
  P2OUT = 0x01;
  P2SEL0 = 0x03;

  UCA0CTLW0 |= UCSWRST + UCSSEL_2 + UCTXBRK; // UART sasajos programinis
perkrovimas ReSeT
  UCA0BR0 =104; //
  duomenu perdavimo greitis //
  UCA0BR1 = 0; //
  duomenu perdavimo greitis //
  UCA0MCTLW |= UCBRS1_H;
  //
  UCA0STATW = UCLISTEN;
  UCA0CTLW0 &= ~UCSWRST; // Takes UART out of SoftWare ReSeT
  //UCA0IE = UCTXIE;
  //__bis_SR_register(GIE);

  TB0CCTL0=CCIE; // laikmacio pertrauktis
  TB0CTL = CNTL_1 + ID_2 + TBSEL_2 + MC_2; // laikmacio konfigravimas
  __enable_interrupt();
  P1OUT|=LED1;
  delay(20000);
  P1OUT = ~LED1;
  delay(20000);
  P1OUT|=LED1;
  delay(20000);
  P1OUT = ~LED1;
  delay(20000);
  value=5;
  showChar(( value / 1 ) % 10 + '0', pos3);
  delay(10000);
  value=4;
  showChar(( value / 1 ) % 10 + '0', pos3);
  delay(10000);
  value=3;
  showChar(( value / 1 ) % 10 + '0', pos3);
  delay(10000);
  value=2;
  showChar(( value / 1 ) % 10 + '0', pos3);
  delay(10000);
  value=1;
  showChar(( value / 1 ) % 10 + '0', pos3);
  delay(10000);
  clearLCD();

```

```

while(1)
{
for (v=0; v<110; v++)
{
value_cal=(value/16);
result = result + value_cal;
}
result = result/110;

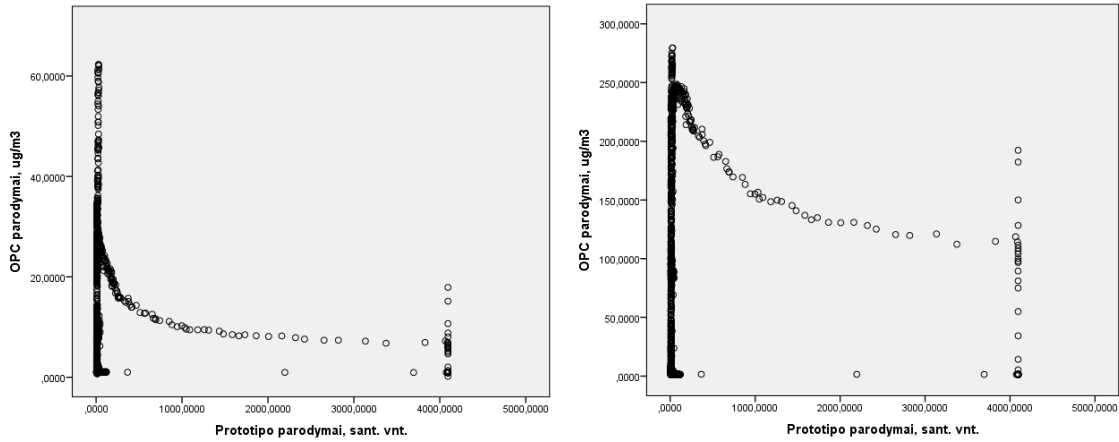
int thousands, hundreds, tens, units, remainder, remainder2, remainder3;
thousands = result/1000;
remainder = result - (thousands * 1000);
hundreds = remainder/100;
remainder2 = remainder - (hundreds * 100);
tens = remainder2/10;
remainder3 = remainder2 - (tens * 10);
units = remainder3;
char value2[6];
sprintf(value2,"%d",thousands);
UCA0TXBUF = *value2; // tukstanciu perdavimas
sprintf(value2,"%d",hundreds);
UCA0TXBUF = *value2; // simtu perdavimas
sprintf(value2,"%d",tens);
UCA0TXBUF = *value2; // desimciu perdavimas
sprintf(value2,"%d", units);
UCA0TXBUF = *value2; // vienetu perdavimas

sprintf(value2, "\n");
UCA0TXBUF = *value2; // perkelimas
sprintf(value2, "%5d\r");
UCA0TXBUF = *value2; // i nauja
sprintf(value2, "\r");
UCA0TXBUF = *value2; // eilute
////////////////////////////////////
//sk1=value_calib/10000;
sk1=(result/1000)% 10;
sk2=(result/100)% 10;
//sk3=(result/10)% 10;
sk4=result% 10;

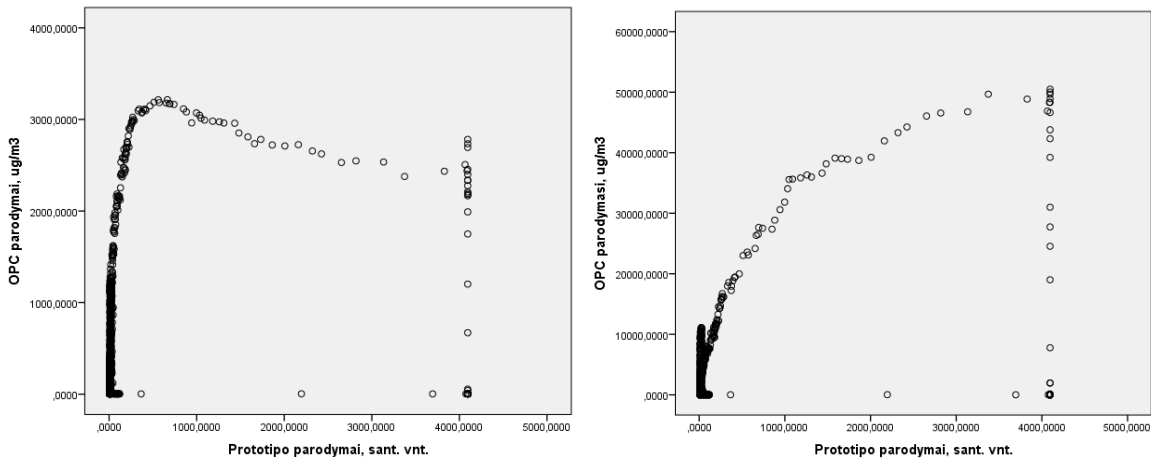
showChar(( sk1 / 1 ) % 10 + '0', pos1);
showChar(( sk2 / 1 ) % 10 + '0', pos2);
showChar(( sk3 / 1 ) % 10 + '0', pos3);
showChar(( sk4 / 1 ) % 10 + '0', pos4);
//showChar('M', pos5);
//showChar('G', pos6);
////////////////////////////////////
delay(10000);
clearLCD();
} //for
} //main

```

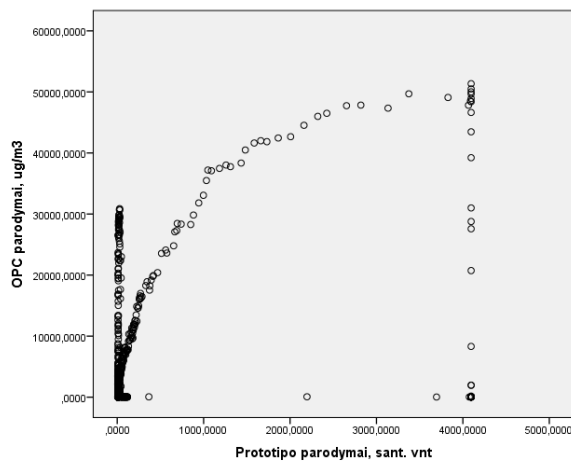
Kiti bandymų metu gauti rezultatai



1 pav. Įrenginio prototipo ir optinio dalelių skaitiklio parodymų tarpusavio koreliacijos grafikai $KD_{0,5}$ (koreliacijos koeficientas -0,12) ir KD_1 (koreliacijos koeficientas -0,02)



2 pav. Įrenginio prototipo ir optinio dalelių skaitiklio parodymų tarpusavio koreliacijos grafikai $KD_{2,5}$ (koreliacijos koeficientas 0,22) ir KD_5 (koreliacijos koeficientas 0,44)



3 pav. Įrenginio prototipo ir optinio dalelių skaitiklio parodymų tarpusavio koreliacijos grafikai KD_{10} (koreliacijos koeficientas 0,36)