



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS

Giedrė Berenytė

**KOMPLEKSINIO ORO VALYMO ĮRENGINIO EFEKTYVUMĄ
LEMIANTYS VEIKSNIAI**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Violeta Kaunelienė

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS

**KOMPLEKSINIO ORO VALYMO ĮRENGINIO EFEKTYVUMĄ
LEMIANTYS VEIKSNIAI**

Baigiamasis magistro projektas

Aplinkosaugos inžinerija (kodas 621H17001)

Konsultantas

Lekt. Edvinas Krugly

Vadovas

Doc. dr. Violeta Kaunelienė

Recenzentas

Doc. dr. Dainius Martuzevičius

Projektą atliko

Giedrė Berenytė

Kaunas, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Cheminės technologijos fakultetas

(Fakultetas)

Giedrė Berenytė

(Studento vardas, pavardė)

Aplinkosaugos inžinerija, 612H17001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Kompleksinio oro valymo įrenginio efektyvumą lemiantys veiksniai“

AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA

2016 m. birželio _____ d.
_____ Kaunas _____

Patvirtinu, kad mano **Giedrės Berenytės** baigiamasis projektas tema „Kompleksinio oro valymo įrenginio efektyvumą lemiantys veiksniai“ 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)

Berenytė, Giedrė. Kompleksinio oro valymo įrenginio efektyvumą lemiantys veiksniai. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Violeta Kaunelienė; Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas.

Mokslų kryptis ir sritis: Bendroji inžinerija, Technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: *patalpų oro tarša, lakūs organiniai junginiai, neterminė plazma, ozonas, valymo efektyvumas.*

Kaunas, 2016. 43 p.

SANTRAUKA

Tyrimo objektu pasirinktas kompleksinis neterminės plazmos įrenginys skirtas lakių organinių junginių valymui iš patalpų oro. Darbo tikslas buvo atlikti įrenginio efektyvumą lemiančių veiksnių – plazmos reaktoriaus galios ir šalinimo metodų derinio tyrimus. Oro valymo efektyvumas buvo tiriamas keičiant energijos tankį įrenginyje (0,96, 1,20, 1,44, 1,96 J/l) ir plazmos reaktoriaus derinius su TiO₂ katalizatoriumi, UV spinduliuote, aktyvuotos anglies sorbentu. Lakaus organinio junginio – tolueno koncentracija (10 mg/m³) ir oro debitas (150 m³/h) buvo pastovūs. Likutinės tolueno ir ozono koncentracijos išmatuotos vidaus patalpų oro kokybės įrenginio AEROQUAL IQM 60 NHMC ir ozono jutikliais.

Vienas pagrindinių veiksnių lemiančių kompleksinio oro valymo įrenginio lakių organinių junginių pašalinimo iš patalpų efektyvumą buvo energijos tankis. Nuo 0,96 iki 1,92 J/l didinant energijos tankį, priklausomai nuo įrenginio komplektacijos, likutinė lakaus organinio junginio koncentracija papildomai sumažėjo 50 – 68 %. Kitas veiksnys nulėmęs įrenginio efektyvumą – valymo metodų derinys. Didžiausias tolueno pašalinimo iš oro efektyvumas buvo pasiektas įrenginio komplektacijose su aktyvuotos anglies sorbentu – O₃+S, O₃+S+K2/2 (pasiektas 72 – 90 % valymo efektyvumas).

Optimalia oro valymo įrenginio komplektacija parinkti (O₃+S) derinys esant 0,96 J/l energijos tankiui (72 % efektyvumas) ir (O₃+S+K2/2) derinys esant 1,44 J/l (83 % efektyvumas).

Išlaidos už oro valymo įrenginio sunaudotą elektros energiją, kartu su rekuperacine sistema sieks 17 – 19 Eur/mėn (apie 136 – 151 kWh/mėn).

Berenytė, Giedrė. *Factors Affecting Effectiveness of the Complex Air Quality Purification System: Master's thesis in Environmental Engineering / supervisor assoc. prof. Violeta Kaunelienė. The Faculty of Chemical Technology, Kaunas University of Technology.*

Research area and field: Environmental Engineering, Technological Sciences.

Key words: *indoor air pollution, volatile organic compounds, non-thermal plasma, ozone, cleaning efficiency.*

Kaunas, 2016. 43 p.

SUMMARY

The aim and object of the study was to analyse factors affecting effectiveness of the complex non-thermal plasma air purification system for volatile organic compounds removal from indoor air. Air cleaning efficiency was measured by different configurations of the system: energy density (0,96, 1,20, 1,44, 1,68, 1,92 J/l) and different non-thermal plasma combinations with TiO₂ catalyst, UV radiation and activated carbon sorbent. During the study 10 mg/m³ concentration of volatile organic compound - toluene and 150 m³/h of air flow were the same. Ozone and residual toluene concentrations were monitored by an Indoor Air Quality Monitor AEROQUAL IQM – 60 device's NHMC and ozone sensors.

One of the main factors affecting effectiveness of complex air purification system was energy density. In case of the highest 1,92 J/l energy density, residual volatile organic compound concentration was reduced by 50 – 60 % , in comparison with the lowest 0,96 J/l energy density.

Another factor affecting the effectiveness of the complex air cleaning system is combination of treatment methods. The highest toluene removal efficiency has been achieved with plasma, activated carbon sorbent and two stages of TiO₂ catalysis complex - O₃+SO₃+S+K2/2 (72 – 90 % efficiency). The best suitable combinations were (O₃ + S) at 0,96 J/l energy density (72% efficiency) and (O₃+S+K2/2) combination at 1,44 J/l (83% efficiency).

Cost of regenerative system together with the air cleaning system for energy consumption will be approximately 17 - 19 Eur/month (about 136-151 kWh/month).

TURINYS

IŽANGA	10
1. LITERATŪROS APŽVALGA.....	11
1.1. Organinių junginių klasifikacija.....	11
1.2. Lakių organinių junginių šaltiniai patalpose	12
1.3. Lakių organinių junginių toksiškumas	13
1.4. Patalpų oro taršos tyrimų metodai.....	15
1.5. Lakių organinių junginių nukenksminimo metodai	17
1.5.1. Sorbcinė filtracija.....	17
1.5.3. Fotokatalitinė oksidacija.....	18
1.5.1. Biofiltracija	18
1.5.4. Ozonavimas	19
1.5.5. Plazma.....	19
1.5.6. Kompleksinės technologijos	22
2. TYRIMŲ METODIKA	23
2.1. Kompleksinio oro valymo įrenginio sandara	23
2.2. Tyrimų planas.....	25
2.3. Instrumentinė analizė	29
2.4. Duomenų apdorojimas	30
3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS	31
3.1. Energijos kiekio plazmos reaktoriuje poveikis susidariusio ozono koncentracijai.....	31
3.2. Valymo metodų derinių poveikis įrenginio efektyvumui	36
3.3. Energijos suvartojimo vertinimas.....	37
IŠVADOS	40
LITERATŪROS SĄRAŠAS	41

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. <i>Pasaulio sveikatos organizacijos</i> sukurta patalpų ore esančių organinių junginių klasifikacija	11
1.2 lentelė. Kai kurių lakių organinių junginių vienkartinės ir paros DLK patalpų ore pagal Lietuvos Higienos normą HN 35:2007	15
1.3 lentelė. Tyrimų plano detalizacija.....	26
3.1 lentelė. Plazmos reaktoriaus energetinės charakteristikos naudotos tyrimo metu.....	31

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. „Nesveiko pastato“ sindromą sukiantys veiksniai	13
1.2 pav. Tolueno ore poveikis sveikatos sutrikimams, esant didžiausioms leistinoms koncentracijoms nesukeliančioms kancerogeninio poveikio	14
1.3 pav. Žematemperatūros dujų išlydžio plazmos dielektrinio barjerinio ir vainikinio reaktorių principinės schemas	21
2.1 pav. Kompleksinio oro valymo įrenginio schema	23
2.2 pav. TiO ₂ katalizatoriaus etapas (A) ir sorbcijos aktyvuota anglimi etapas (B).....	24
2.4 pav. Švirkštinė pompa LSP01-1A	25
2.4 pav. Oro kokybės monitoringo įrenginys AEROQUAL IQM 60.....	29
3.1 pav. Ozono koncentracijos priklausomybė nuo energijos tankio	32
3.2 pav. Likutinės tolueno koncentracijos kitimo priklausomybė nuo ozono koncentracijos	33
3.3 pav. Tolueno pašalinimo iš oro efektyvumo priklausomybė nuo ozono koncentracijos	33
3.4 pav. Energijos kiekio poveikis tolueno pašalinimui	35
3.5 pav. Skirtingų valymo metodų derinių poveikis LOJ valymo efektyvumui.....	36
3.6 pav. Energijos efektyvumo palyginimas tarp optimalių oro valymo metodų derinių	38
3.7 pav. Prognozuojamas energijos suvartojimas ir išlaidos už elektros energiją	39

SANTRUMPOS

BTXS – benzenas, toluenas, ksilenas, stirenas

CAS – (angl. *Chemical Abstracts Service*) Cheminių medžiagų santrumpų tarnyba

DLK – didžiausia leidžiama koncentracija

FLEC – emisijų rinkimo celėse metodas

HEPA – didelio efektyvumo dalelių oro filtras

K – Kelvinai

LOJ – lakūs organiniai junginiai

NMHC – nemetaniniai angliavandeniliai

OH· – hidroksilo radikalas

PID – fotojonizacijos detektorius

ppbv – tūrio dalis milijardui dalių

ppmv – tūrio dalis milijonui dalių

PSO – Pasaulio sveikatos organizacija

IŽANGA

Temos aktualumas. Įvairių tyrimų rezultatai rodo, kad žmonės apie 80–90 % savo laiko leidžia uždaroje patalpose (gyvenamasis būstas, biuro patalpos, mokymo įstaigos ir kt.). Patalpose oro kokybė dažnai yra prasta dėl pastatuose esančių taršos šaltinių gausos, teršalų patekimo iš lauko, ribotos oro cirkuliacijos. Tai ypač aktualu energetiškai efektyviems namams.

Pavojingos cheminės medžiagos randamos patalpų ore dažniausiai yra – lakūs ir pusiau lakūs organiniai junginiai. Priklausomai nuo jų cheminės struktūros bei koncentracijos jie neigiamai veikia žmonių sveikatą, sukelia įvairaus sudėtingumo organizmo funkcijų sutrikimus: alergijas, akių, nosies ir gerklės sudirgimus, galvos skausmą, nuovargį, gebėjimo susikaupti, nervų sistemos, kraujagyslių sutrikimus, kurie neretai vadinami „nesveiko pastato“ sindromu (Marc ir kt., 2012).

Lakių ir pusiau lakių organinių junginių ore kontroliavimui dažniausiai naudojamos junginius ardančios šalinimo technologijos: terminė ar katalizinė oksidacija, biofiltracija ir kt. (Khan, Ghoshal, 2000). Šios pramonės emisijoms kontroliuoti paprastai naudojamos technologijos yra sunkiai valdomos bei pritaikomos norint pašalinti lakių organinių junginių koncentracijas iš gyvenamųjų patalpų oro.

Griežtėjantys teršalų emisijų iš medžiagų ir patalpų oro kokybės normatyvai skatina ieškoti alternatyvių technologijų, kurios būtų efektyvesnės aplinkos, sveikatos apsaugos bei ekonominiu požiūriais. Kadangi pramoninėms išlakoms valyti naudojami metodai nėra tinkami patalpų oro nukenksminimui, įdiegta vienos rūšies technologija dažnai nėra efektyvi. Būtina atlikti tyrimus ir kurti kompleksines technologijas, kurios būtų efektyvios teršalų pašalinimo bei energetinio efektyvumo požiūriais ir gali būti įdiegtos energetiškai efektyviuose pastatuose.

Darbo objektas – kompleksinis patalpų oro valymo įrenginys.

Darbo tikslas – atlikti kompleksinio patalpų oro valymo įrenginio efektyvumo tyrimus.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti literatūros analizę, kurioje būtų apžvelgiami lakių organinių junginių šaltiniai patalpose, poveikis sveikatai ir pagrindiniai šalinimo metodai.
2. Atlikti lakių organinių junginių šalinimo iš oro kompleksiniu įrenginiu – plazma/katalizatorius/UV/sorbentas tyrimus.
3. Parinkti optimalią kompleksinio oro valymo įrenginio komplektaciją bei eksploatacines sąlygas efektyviam lakių organinių junginių pašalinimui.
4. Atlikti siūlomos komplektacijos įrenginio išlaidų už elektros energiją vertinimą.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Organinių junginių klasifikacija

Patalpų ore gausu įvairių organinių junginių, kurie pagal tam tikras savybes skirstomi į klases. Organinių junginių klasifikacijų yra įvairių, kai remiamasi skirtingais grupuojančiais aspektais. Pagal cheminę struktūrą organiniai junginiai skirstomi į alkanus, aromatinius angliavandenilius, aldehidus, ketonus ir kitas klases, pagal daromą poveikį sveikatai (alergenai, neurotoksinai, kancerogenai ir kt.), arba pagal fizikines savybes (virimo tašką, garų slėgį, anglies skaičių ir t. t.) (Molhave ir kt., 1997). *Pasaulio sveikatos organizacija* (PSO) 1989 metais organinius oro junginius suklasifikavo į labai lakius, lakius, pusiau lakius organinius junginius ir kietąsias organines daleles pagal cheminių medžiagų virimo temperatūros tašką (žr. 1.1 lentelė).

1.1 lentelė. *Pasaulio sveikatos organizacijos* (PSO) 1989 m. sukurta patalpų ore esančių organinių junginių klasifikacija (adaptuota pagal Molhave ir kt., 1997)

Klasė	Sutrumpintas klasės pavadinimas	Virimo taško intervalai* °C
Labai lakūs organiniai junginiai	LLOJ	< 0 iki 50–100
Lakūs organiniai junginiai	LOJ	50–100 iki 240–260
Pusiau lakūs organiniai junginiai	PLOJ	240–260 iki 380–400

* poliniai junginiai aukštesnėje intervalo dalyje

Europos sąjungoje organiniai junginiai taip pat skirstomi į klases pagal PSO sukurta virimo taško klasifikaciją. Pagal Thevenet ir kitų mokslininkų (2014) pateiktus duomenis, organiniai junginiai priskiriami lakiems, jei jų virimo temperatūra yra mažesnė nei 250 °C esant normaliam 101,3 kPa atmosferos slėgiui.

Lakių organinių junginių klasei priskiriami junginiai, kurių virimo taškas patenka į intervalą 50 – 260 °C. Vieni iš dažniausiai patalpų ore nustatomų yra: benzenas, toluenas, ksilenas, stirenas – (BTXS), terpenai, karboniliniai junginiai – formaldehidai ir acetaldehidai. Būtent šių junginių vyravimas tarp patalpose esančių teršalų yra nulemtas lakumo charakteristikų, bei plataus naudojimo namų apyvokos daiktų, baldų, dažų, valiklių ir kitų medžiagų gamyboje dėl produktų gerinančių savybių (Sargiannis ir kt., 2011).

1.2. Lakių organinių junginių šaltiniai patalpose

Pavojingų lakių ir pusiau lakių organinių junginių pasyviais šaltiniais patalpų aplinkoje dažniausiai yra statybinės, konstrukcinės, apdailos medžiagos ir buitinė technika: plytos, tinkas, dažai, izoliacinės medžiagos, baldai, grindų plokštės, kiliminės ir kitos grindų dangos, polimerinės medžiagos (PVC), elektroniniai prietaisai (televizoriai, kompiuteriai, monitoriai, spausdinimo ir kopijavimo įrenginiai), sienų apmušalai, klėjai (Marc ir kt., 2012). Žmonių veikla patalpose – rūkymas, dujinių viryklių naudojimas, namų šildymas krosnimis, buitinės chemijos naudojimas ir kita buities veikla prisideda prie LOJ koncentracijų padidėjimo patalpų ore.

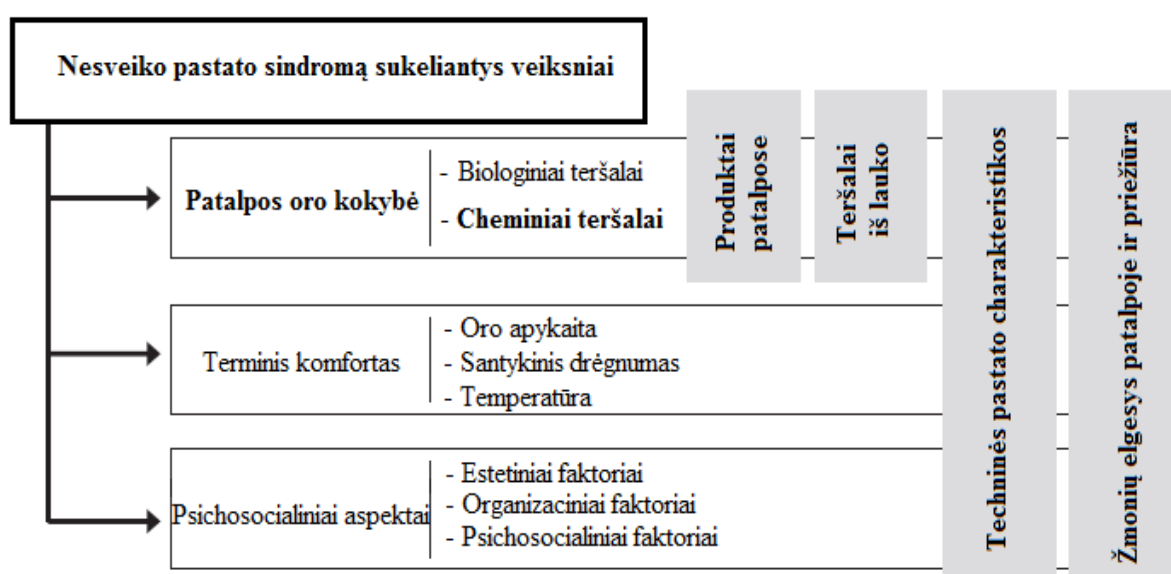
Pasaulyje vis didėjant susirūpinimui patalpų oro kokybe, didelis dėmesys skiriamas vienam iš dažniausiai nustatomų vidaus aplinkos teršalų – formaldehidui. Formaldehido dujos yra stiprus kvėpavimo takų dirgiklis, alergenai ir kancerogenai. Patalpose pagrindiniai pirminiai formaldehido šaltiniai yra medžio gaminiai: faneros plokštės, medienos drožlių plokštės, kurių gamyboje naudojamos šlapalo – formaldehido dervos. Prie formaldehido emisijų šaltinių taip pat priskiriami cigarečių dūmai, dažai, lakai, žvakių ir smilkalų deginimas. Antriniai šaltiniai apima chemines reakcijas tarp junginių, kurių šalutinis produktas yra formaldehidai, pvz., ozono ir terpenų sąveika, kurios metu susidaro formaldehidai. Didelės formaldehido koncentracijos kambarių aplinkoje siejamos su nepakankamu patalpų vėdinimu lauko oru, bei per pastaruosius 12 mėnesių vykdytu patalpų dažymu, grindų ir kitų paviršių lakavimu, įsigijus naujus baldus iš medienos ar melamino (plastiko tipo derva sudėtyje turinti formaldehido, dažniausiai naudojama kaip viršutinis iš medienos drožlių gaminamų baldų sluoksnis) (Mendes ir Teixeira, 2014).

Patalpų ore lakių organinių junginių koncentracijos gali stipriai skirtis, priklausomai nuo: patalpos dydžio (talpos), emisijos šaltinių skaičiaus, teršalų emisijos ir pasišalinimo greičio, patalpos oro mainų su lauko oru greičio, LOJ koncentracijos lauke (Thevenet ir kt., 2014). Zabiegala ir kt., (2012) atliko tyrimą, kurio metu matuotos tolueno koncentracijos Korėjoje naujai pastatytų statinių skirtinguose aukštuose. Pirmame pastato aukšte išmatuota $63,03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vidutinė tolueno koncentracija, antrame – $66,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$, trečiame – $27,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Lauke išmatuota $11,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vidutinė tolueno koncentracija. Autorių nuomone, ženklus koncentracijų skirtumas tarp pirmo antro ir trečio aukšto galėjo būti dėl aktyvesnės ventiliacijos poveikio emisijų padidėjimui iš taršos šaltinių viršutiniuose aukštuose.

1.3. Lakių organinių junginių toksiškumas

Daugelio tyrimų duomenimis žmonės patalpose, įskaitant darbovietes, mokymosi, gydymo įstaigas, praleidžia 80 – 90 % savo laiko (Mendes, Texeira, 2014).

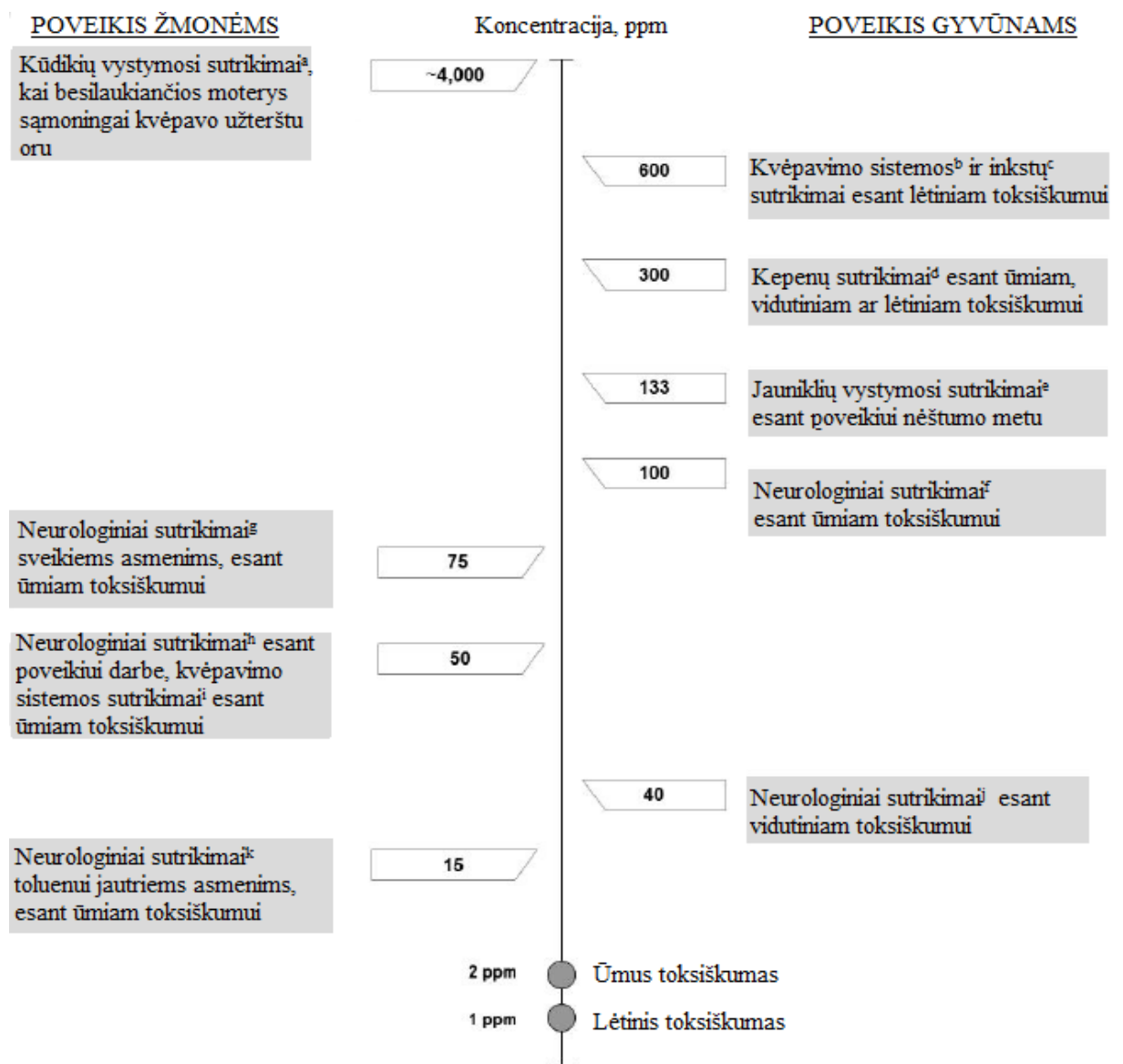
Praėjusio amžiaus devintojo dešimtmečio pradžioje *Pasaulio sveikatos organizacija* (PSO) medicininę – ekologinę problemą siejamą su neigiamu įvairiapusiu patalpų poveikiu žmogaus sveikatai apibrėžė „nesveiko pastato“ sindromu bei ataskaitoje nusakė būdingas sveikatos problemas sukeliančias priežastis (žr. 1.1 paveikslas). „Nesveiko pastato“ sindromas paprastai pasireiškia nespecifiniais simptomais atsirandančiais būnant patalpose, ypač neseniai renovuotų pastatų.



1.1 pav. „Nesveiko pastato“ sindromą sukeliantys veiksniai (adaptuota pagal Mendes ir Teixeira, 2014)

Patalpos oro kokybę nulemiantiems cheminiams teršalams priskiriami lakūs ir pusiau lakūs organiniai junginiai yra glaudžiai susiję su „nesveiko pastato“ sindromu ir darbuotojų produktyvumu darbovietėse.

Įkvepiamų lakių organinių junginių keliamos sveikatos problemos apima ūmius dirginančius pojūčius, kurie išnyksta išėjus iš patalpos, arba rimtesnius susirgimus tokius kaip kvėpavimo takų ligos ar net gyvybei pavojingus lėtiniai organizmo sutrikimai (žr. 1.2 paveikslas).



1.2 pav. Tolueno ore poveikis sveikatos sutrikimams, esant didžiausioms leistinoms koncentracijoms nesukeliantioms kancerogeninio poveikio, kai a – apsigimimai panašūs į vaisiaus alkoholinį sindromą, b – nosies pažeidimai, c – nefropatija, d – padidėjusios kepenys, citochromo P450 fermentų pagausėjimas, išaugęs serumo kiekis kepenų fermentuose, e – mažo svorio vaisius ir uždelstas skeleto kaulėjimas, f – suaktyvėjusi motorika, g – psichomotorikos sutrikimas, h – regos ir klausos suprastėjimas, i – nosies ir gerklės sudirgimas, j – elgesio sutrikimai, k – neuropsichologiniai sutrikimai (Adaptuota pagal *Agency for Toxic Substances and Disease Registry*, 2015)

Pagal Lietuvos Higienos normą HN 35:2007 „Didžiausia leidžiama cheminių medžiagų (teršalų) koncentracija gyvenamosios aplinkos ore“, didžiausia leidžiama koncentracija (DLK), vienkartinė/paros: toluenas 0,6/0,6 mg/m³, formaldehidas 0,1/0,01 mg/m³ (žr. 1.2 lentelė).

1.2 lentelė. Kai kurių lakių organinių junginių vienkartinės ir paros DLK patalpų ore pagal Lietuvos Higienos normą HN 35:2007

Cheminės medžiagos pavadinimas	CAS nr.	Didžiausia leidžiama koncentracija (DLK), mg/m ³	
		Vienkartinė	Paros
Acetaldehidas	75-07-0	0,01	0,01
Acetonas (dimetilketonas)	67-64-1	0,35	0,35
Benzenas	71-43-2	1,5	0,1
Etilacetatas	141-78-6	0,1	0,1
Formaldehidas (skruzdžių aldehydas)	50-00-0	0,1	0,01
Izopropanolis (izopropilo alkoholis)	67-63-0	0,6	0,6
Stirenas	100-42-5	0,040	0,002
Toluenas	108-88-3	0,6	0,6
Ksilenas (dimetilbenzenas)	1330-20-7	0,2	0,2

Iki 2019 metų naujai statomi visuomeniniai pastatai ir nuo 2021 metų kitų paskirčių nauji pastatai turėtų būti energetiškai efektyvūs. Tokio tipo namų konstrukcija nuo įprastų skiriasi aukštu termoizoliacijos lygiu, vėdinimo sistema ir mažesnėmis šildymo išlaidomis. Vienas iš būdų pasiekti aukštą termoizoliacijos lygį pastatuose – sumažinti natūralios ventiliacijos tikimybę per sienas, langus, konstrukcijos sandūros vietas bei plyšius taip išvengiant šilumos patekimo į lauką, bei šalčio patekimo į pastato vidų. Siektina, kad energetiškai efektyvių pastatų ventiliacijos sistema būtų efektyvi ne tik energetiniu ir ekonominiu požiūriais bet ir nuosekliai stebima ir gerinama patalpų oro kokybe.

1.4. Patalpų oro taršos tyrimų metodai

Patalpų oro tarša lakiais ir pusiau lakiais organiniais dažniausiai vertinama vykdant teršalų monitoringą: tiriant teršalų emisijas iš medžiagų ir matuojant teršalų koncentracijas patalpų ore (Marc ir kt., 2012).

Pasak Blondel ir kt., (2010), dažniausiai naudojami LOJ emisijų iš medžiagų tyrimų metodai: emisijų tyrimai bandymo kameroje, emisijų rinkimo celėse (FLEC) metodas, pasyviųjų kaupiklių metodas ir kitos alternatyvos.

Įmonėse užsiimančiose statybinių, pramoninių, instaliacijos ir apdailos medžiagų gamyba vis plačiau atliekami gaminamų produktų monitoringo tyrimai bandymo kameroje, siekiant

nustatyti kokiomis sąlygomis ir kokie kiekiai lakių ir pusiau lakių organinių junginių iš gaminių patenka į patalpų aplinką. Tiriant teršalų emisijas iš medžiagų, pagrindiniai parametrai yra aplinkos temperatūra, santykinis drėgnumas, oro mainų santykis, oro greitis, apkrovos koeficientas (Salthammer ir kt., 2010).

LOJ, PLOJ emisijų iš potencialių taršos šaltinių bandymo kamerose metodu, lakių ir pusiau lakių organinių teršalų emisijos, surenkamos sorbuojančiu vamzdžiu su adsorbentu, pvz. Poli (2,6-difenil-p-fenileno oksidu). Adsorbuotos analitės desorbuojamos termodesorbcijos metodu, junginiai nustatomi dujų chromatografu su atitinkamų analizių detektoriumi. Aldehidai ir ketonai surenkami ant filtro padengto 2,4-dinitrofenil-hidrazinu. Surinktos analitės ekstrahuojamos tinkamu solventu, pvz. acetonitrilu, eliuentas analizuojamas didelės raiškos skysčių chromatografu su UV-VIS spektrofotometru (Marc ir kt., 2012).

Kitas dažnai naudojamas metodas – teršalų iš taršos šaltinio surinkimas celėmis. Šiuo metodu oro mėginiai imami mobilių ėmiklį padėjus ant patalpą teršiančio objekto paviršiaus. Ėmiklis paprastai sudarytas iš dviejų 150 mm skersmes nerudijančio plieno lėkštelių, su prijungtais plieniniais vamzdeliais – įeinančioms ir išeinančioms dujoms. Sensoriais reguliuojamas švaraus oro tiekimas, kad būtų palaikoma reikiama temperatūra ir drėgnumas. Oras įsiurbiamas dviem vamzdeliais esančiais skirtinguose lėkštelės kraštuose, išleidžiamas per vamzdelį lėkštelės centre. Pastarasis išleidimo vamzdis tiesiogiai sujungtas su sorbuojančiu vamzdeliu užpildytu 2,6-difenil-p-fenileno oksido sorbentu lakių organinių junginių surinkimui, arba 2,4-dinitrofenil-hidrazinu aldehydų adsorbacijai. Praėjus pakankamai laiko aldehidai, dažniausiai formaldehidai, analizuojami didelės raiškos chromatografu su UV-VIS spektrofotometru, lakūs ir pusiau lakūs junginiai – dujų chromatografu su integruotu detektoriumi, prieš tai atlikus terminę desorbciją. Ėmiklio tūris 35 ml, maksimalus tiriamo paviršiaus plotas 177 cm² (Marc ir kt., 2012).

Pasyvieji mėginių kaupikliai – dar vienas metodas organinių teršalų patenkančių į patalpų orą nustatymui. Pasyvių kaupiklių veikimas pagrįstas savaimine oro cirkuliacija ant sorbento paviršiaus be papildomo oro traukimo siurbliu, dažniausiai naudojamas nustatyti formaldehido emisijoms. Oro mėginiai renkami patalpose nekeičiant esamų aplinkos sąlygų, padėjus kaupiklį ant tiriamos, potencialiai aplinką teršiančios medžiagos. Kaupiklio Petri lėkštelė pagaminta iš stiklo arba teflono, vidinis diametras apie 15–35 mm, aukštis 5–60 mm, į lėkštelės dugną įdedamas filtrinis popierius impregnuotas 2,4 dinitrofenihidrazinu (Blondel ir kt., 2010). Praėjus pasirinktam ekspozicijos laikui filtras išimamas iš kaupiklio, vykdoma medžiagų desorbcija mikrobangomis, ekstrahuojama tinkamu solventu (acetonu, acetonitrilu ar toluenu). Medžiagos

identifikuojamos dujų chromatografu arba didelės raiškos skysčių chromatografu su detektoriumi (Blondel ir kt., 2010, Marc ir kt., 2012).

1.5. Lakių organinių junginių nukenksminimo metodai

Pramonėje, į aplinkos orą išsiskiriančių lakių organinių teršalų nukenksminimo metodai klasifikuojami į destruktinius (skaidymo) ir rekuperacinius. Rekuperaciniai metodai: absorbcija, adsorbcija, kondensacija, membraninis atskyrimas, teršalams nukenksminti taikomi tik tada, kai LOJ koncentracijos yra didelės ir iš išlakų galima atgauti pradines medžiagas nepatiriant ekonominių nuostolių. Vidaus patalpų ore, lakių organinių junginių koncentracijos lyginant su pramoninėmis emisijomis, yra žymiai mažesnės, dėl to rekuperaciniai metodai paprastai nėra taikomi. Siekiant išvalyti patalpų orą arba esant nedidelėms pramoninėms LOJ išlakoms, tikslinga naudoti LOJ skaidančius metodus – biofiltraciją ir oksidaciją, paverčiančius žmonėms ir aplinkai kenksmingus junginius nekenksmingais (Khan, Ghoshal, 2000, Urbutis, 2014).

1.5.1. Sorbcinė filtracija

Sorbcinė filtracija arba adsorbcija, naudojama lakių organinių junginių surinkimui ant aktyvuotos anglies, zeolito, silikagelio, aktyvuoto aliuminio, mineralinio molio ar kai kurių polimerų paviršiaus. Lakūs organiniai junginiai veikiant Van der Valso jėgoms ir vandeniliniam ryšiui, adsorbuojasi ant sorbento paviršiaus ir porose. Dėl didelio paviršiaus ploto ir aukštos adsorbcinės talpos plačiausiai naudojami hidrofobinių zeolitų bei aktyvuotos anglies sorbentai (Luengas ir kt., 2015).

Aktyvuotos anglies sorbentai labiausiai tinkami neselektyviai 40 – 150 molekulinės masės ir 38 – 260 °C virimo taško lakių organinių junginių adsorbcijai iš oro, esant kambario temperatūrai. Oro drėgnumas yra vienas iš pagrindinių parametrų lemiančių adsorbcijos proceso efektyvumą, kadangi vandens garai konkuruoja su lakiais organiniais junginiais dėl adsorbento paviršiaus. Didžiausias LOJ adsorbcijos aktyvuota anglimi efektyvumas pasiekiamas esant ne didesniai nei 60 % santykiniam oro drėgnumui (Khan, Ghoshal, 2000).

Sidheswaran ir kiti mokslininkai (2012) tyrė lakių organinių junginių adsorbcijos aktyvuota anglimi efektyvumą. Ištirta, kad tolueno, benzeno, o-ksileno, 1-butanolio, formaldehido, esančių 20–30 ppbv koncentracijos intervale, adsorbcijos aktyvuota anglimi efektyvumas siekia 70–80 %. Jo ir Yang (2009) tyrimai parodė, kad benzeno, tolueno, etilbenzeno ir ksilenų adsorbcija aktyvuota anglimi gali siekti 90 % ir daugiau, kai teršalų

koncentracijos 0,1–1 ppmv intervale (apie 0,0002–0,002 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). 1 ppm tolueno (ore, 25 °C) = 3,76 mg/m^3 , 1 $\text{mg}/\text{m}^3 = 0,266$ ppm.

Šio metodo minusas – lakūs organiniai junginiai nėra suardomi, tačiau tik pereina iš vienos fazės į kitą. Taip pat, adsorbentai tampa kenksmingi dėl ant jų paviršiaus adsorbuotų lakių organinių junginių ir būtinas tinkamas sorbuojančio filtro regeneravimas pašalinant adsorbata, kad filtras netaptų taršos šaltiniu (Luengas ir kt., 2015).

1.5.3. Fotokatalitinė oksidacija

Fotokatalizė skatina ore esančių organinių teršalų degradacijos procesus naudojant puslaidininkinį katalizatorių ir ultravioletinę spinduliuotę.

Titano dioksidas yra vienas plačiausiai naudojamų katalizatorių organinių medžiagų skaidymui dėl aukšto fotojautrumo, fotocheminio stabilumo, stiprios oksidacinės galios, netoksiškos prigimties ir nedidelės kainos (Ivanova ir kt., 2014, Castellote, Bengtsson, 2011). Oksidacija vyksta kai puslaidininkį katalizatorių apšvietus UV spinduliuote su didesne energija nei draustinė juosta, jame atsiranda sužadintų laisvųjų elektronų ir skylių (Luengas ir kt., 2015). Skylės, tai vietos iš kurių yra išmušti elektronai, yra teigiamai įkrautos ir veikia kaip elektronų akceptorai. Fotokatalizė yra ekonomiškesnė alternatyva termininei oksidacijai, kadangi pastarosios veikimui reikia pasiekti aukštą temperatūrą (200–1200 °C), o fotokatalizė gali vykti kambario temperatūroje (Shiraishi, Ishimatsu, 2009).

1.5.1. Biofiltracija

Biologinis lakių organinių junginių šalinimas iš oro pagrįstas mikroorganizmų gebėjimu fermentais skaidyti teršalų molekules ir jas naudoti kaip anglies, maistinių medžiagų, bei energijos šaltinį metaboliniuose procesuose. Organinių junginių bioskaidumas paprastai priklauso nuo junginio hidrofobiškumo, mikroorganizmų populiacijos specifiškumo, teršalų toksiškumo (Guieysse ir kt., 2008).

Patalpų oro valymui dažniausiai naudojami bioskruberiai, lašeliniai biofiltrai. Pagrindinis biologinių oro valymo įrenginių elementas yra filtravimo įkrova. Įkrova suaktyvinama biogeninių elementų prisotintu vandeniniu tirpalu ir lėtai leidžiamas lakiais organiniais junginiais užterštas oras (Zagorskis, Spiečiūtė, 2011). Įkrovoje esantys mikroorganizmai pirmiausia absorbuoja su oru patekusius organinius teršalus, kurie vėliau mikroorganizmų susintetintų fermentų suskaidomi iki CO_2 , ir H_2O , bei susidaro neorganiniai produktai ir biomasė (Khan, Ghoshal, 2000).

1.5.4. Ozonavimas

Lakius organinius junginius oksiduojantis agentas ozonas (O_3) gaunamas iš oro reaktoriuose vadinamuose ozonatoriais, kuriuose deguonies molekulės veikiamos vainikiniu išlydžiu arba UV spinduliuote. Mokslinių tyrimų duomenimis, net sugeneravus vidutinę reikalingą oksidavimui ozono koncentraciją esančią 50–100 ppbv (apie 100–200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) intervale, nėra užtikrinamas efektyvus lakių organinių junginių nukenksminimas (Luengas ir kt., 2015). Blogai ventiliuojamų patalpų ore susidaręs perteklinis ozonas gali viršyti leistinas normas ir sukelti ūmius sveikatos sutrikimus. Pagal Lietuvos Higienos normą HN 35:2007, didžiausia leidžiama ozono koncentracija (DLK) gyvenamosios aplinkos ore: vienkartinė – 0,03, paros – 0,16 mg/m^3 .

1.5.5. Plazma

Normaliomis sąlygomis dujos yra neutralios, tačiau įvykus jonizacijos, disociacijos, sužadavimo procesams, dujose esančios neutralios dalelės padalijamos į skirtingo krūvio įelektrintas daleles. Plazma – dažnai vadinama ketvirtąja medžiagų agregatine būseną, yra iš dalies arba visiškai jonizuotos dujos, kurias sudaro neutralios dalelės (radikalai, molekulės, atomai), jonai, elektronai ir fotonai. Jonizacijos proceso pradžia reikalingas pirminis elektronas, gaunamas naudojant pakankamą elektrinio ar magnetinio lauko energiją. Elektronams susidūrus su foninėmis dujomis, sužadintų dujų molekulių (pvz. N_2 , O_2) energija išleidžiama fotonų ar šilumos pavidalu. Sužadinti elektronai susidaužia su dujų molekulėmis ir dėl išskirtos energijos susiformuoja laisvieji radikalai, reaktyvūs jonai. Laisvieji radikalai $OH\cdot$, $O\cdot$ ir O_3 yra esminiai aplinkos teršalų oksidatoriai, tame tarpe ir lakių organinių junginių. Teršalai procese su oksidatoriais idealiu atveju suskaidomi iki CO_2 ir H_2O , arba gali susidaryti tarpiniai skilimo produktai (Thevenet ir kt., 2014).

Atskiros dalelių grupės sudarančios plazmą turi skirtingas temperatūras (kinetinę energiją). Plazma laikoma elektriškai kvazineutralia, kadangi susidūrimo metu bendra sąveikaujančių dalelių sistemos kinetinė energija nepakinta, tačiau tik persiskirsto tarp dalelių (Grigonis, Galdikas, 2006).

Pagal jonų temperatūrą plazma yra skirstoma į aukštatemperatūrę ir žematemperatūrę. Jonų temperatūrai plazmoje esant $\leq 10^5$ K ji laikoma žematemperatūre, jei jonų temperatūra $\geq 10^6$ K plazma – aukštatemperatūre (Bahri, 2014, Vandenbroucke, 2011).

Aukštatemperatūrė arba termodinaminiu požiūriu pusiausvyroji plazma – susidaro esant aukštam dujų slėgiui, plazmą sudarančių dalelių temperatūra yra vienoda. Plazmą sudarančios dalelės yra termodinaminėje pusiausvyroje, jų vidutinė kinetinė energija ir temperatūra yra vienoda (Rutkūnienė, Grigonis, 2002).

$$T_e \sim T_j \sim T_0$$

(Temperatūrų pasiskirstymas tarp dalelių aukštatemperatūroje plazmoje)

Kai T_e – elektronų, T_j – jonų, T_0 – neutralių dalelių temperatūra.

Lakių organinių junginių šalinimui iš patalpų oro pusiausvyroji plazma nėra naudojama, kadangi jos generavimas nebūtų ekonomiškas dėl didelių elektros energijos sąnaudų ir praktiškai neįmanomo integravimo į namo ventiliavimo sistemą dėl susidarantios didelės dujų temperatūros.

Žematemperatūrė plazma – mažos masės elektronai išlydžio zonoje išvysto didelį greitį ir taip sukuriama aukšta jų temperatūra, kuri siekia 10000–250000 K, o sunkesni jonai energijos mainų metu susiduriant su foninėmis dujomis išlieka santykinai šalti (Kim, 2004, Vandenbroucke ir kt., 2011).

$$T_e \gg T_j > T_0$$

(Temperatūrų pasiskirstymas tarp dalelių žematemperatūroje plazmoje)

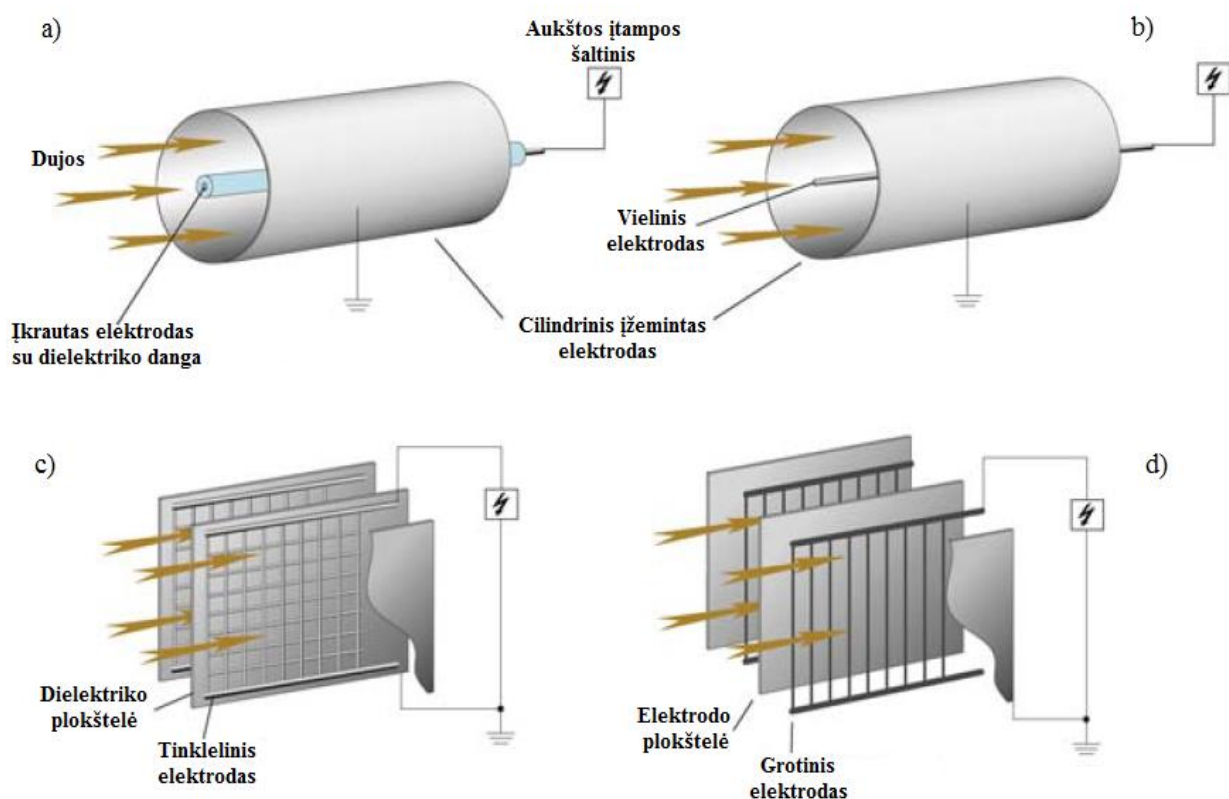
Kai: T_e – elektronų, T_j – jonų, T_0 – neutralių dalelių temperatūra.

Tokia skirtingų dalelių temperatūrų plazma dar vadinama nepusiausvyraja. Pastaroji neterminės plazmos savybė nulemia jos pritaikomumą teršalų šalinimui iš patalpų oro.

Dujų išlydžio plazmoje išlydis dujose prasideda elektrinio lauko stipriui pasiekus tam tikrą vertę. Dujų išlydžiu vadinamas elektros srovės tekėjimas dujose. Elektrinio lauko įgreitinta elektringoji dalelė nuolat susiduria su neutraliosiomis dalelėmis ir smūgio metu perduoda savo kinetinę energiją atomams, molekulėms ar radikalams taip padidindama jų kinetinę ar vidinę energiją. Nors technologiniuose procesuose naudojamoje plazmoje esantys krūvininkai (jonai, elektronai) sudaro tik mažą procentinę dalį bendro dujų kiekio, tačiau jų sąveika su neutraliomis dalelėmis yra lemianti (Grigonis, Galdikas, 2006).

Žematemperatūrė plazma, esant normaliam 101,3 kPa atmosferos slėgiui dujų sraute, dažniausiai generuojama: didelės energijos elektronų išlydžiu (elektrinio išlydžio plazma), aukšta įtampa tarp elektrodų (dujų išlydžio plazma). Dujų išlydžio plazma dažniau taikoma mažiems ar vidutiniams dujų srautams. Teršalų šalinimui iš oro naudojama žematemperatūrė

plazma dažniausiai sukuriama naudojant dielektrinio barjerinio ir vainikinio išlydžio reaktorius (žr. 1.3 paveikslas) (Brandenburg ir kt., 2011).



1.3 pav. Žematemperatūrės dujų išlydžio plazmos dielektrinio barjerinio (a, c) ir vainikinio (b, d) reaktorių principinės schemos: a) cilindrinis – barjerinis išlydis, b) cilindrinis – vainikinis išlydis, c) plokščias – barjerinis išlydis, d) plokščias – vainikinis išlydis (adaptuota pagal Brandenburg ir kt., 2011)

Kaip savarankiški įrenginiai, neterminės plazmos reaktoriai nėra pakankamai efektyvūs, siekiant visiškai suskaidyti lakiuos organinius junginius. Nepaisant to, kad reaktorius teoriškai gali sugeneruoti pakankamą kiekį oksiduojančių junginių, teršalų suskaidymas nėra efektyvus dėl per trumpo reakcijoms įvykti reikalingo laiko. Kiti žematemperatūrės plazmos minusai: prastas efektyvumas lakių organinių junginių mažų koncentracijų šalinimui, neišvengiamai susiformuoja šalutiniai produktai NO_x ir O_3 , bei aerozolio dalelės.

1.5.6. Kompleksinės technologijos

Kompleksinėse oro valymo technologijose į vieną sistemą apjungiami keli skirtingi teršalų šalinimo metodai, kadangi daugelio tyrimo duomenimis, pavieniai oro valymo metodai nėra pakankamai efektyvūs pašalinti santykinai nedideles teršalų koncentracijas iš patalpų oro arba esant geram efektyvumui, sudėtinga įrenginio eksploatacija ir pritaikomumas gyvenamųjų patalpų oro valymui.

Pagrindiniai uždaviniai tenkantys mokslininkams ir tyrėjams siekiantiems sukurti efektyvias kompleksines technologijas teršalų šalinimui iš patalpų oro: kompleksinė technologija turi efektyviai pašalinti platų spektrą teršalų esant mažoms jų koncentracijoms ore, įrenginys turi efektyviai valyti kenksmingus junginius kambario temperatūroje ir drėgnume, įrenginys turėtų būti nesudėtingai integruojamas į pastatų ventiliacijos sistemą, reikalinga nesudėtinga eksploatacija, tylus veikimas, nedidelės elektros energijos sąnaudos, atliekų ir šalutinių skilimo produktų nesusidarymas.

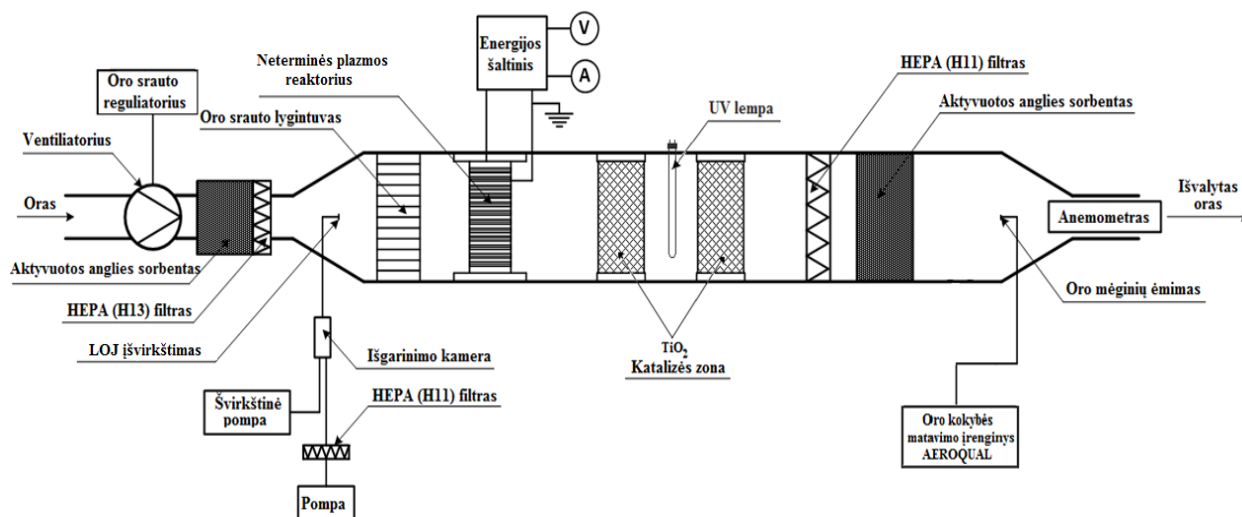
Norint pagerinti įrenginio teršalų šalinimo efektyvumą plazmos reaktoriaus sugeneruotu ozonu, įrenginio struktūra papildyta TiO_2 katalizės etapais, UV spinduliuotės šaltiniu ir aktyvuotos anglies sorbentu.

2. TYRIMŲ METODIKA

2.1. Kompleksinio oro valymo įrenginio sandara

Suprojektuotas kompleksinis neterminės plazmos ir katalizatoriaus, UV spinduliuotės ir sorbento etapus turintis įrenginys, skirtas lakių organinių teršalų valymui iš patalpų oro, planuojant ateityje jį integruoti į ventiliacijos sistemą energetiškai efektyviuose pastatuose.

Ankstesnių eksperimentų metu parinkus nekinančius veiksnius – 150 m³/h oro debitą ir 10 mg/m³ lakaus organinio junginio pradinę koncentraciją, šiame oro valymo įrenginio tyrimų etape atlikti įrenginio efektyvumą lemiančių veiksnių – neterminės plazmos reaktoriaus galios ir skirtingų valymo metodų kombinacijų (plazmos reaktoriaus (O₃) su TiO₂ katalizatoriaus, UV spinduliuote, aktyvuotos anglies sorbentu) tyrimai. Įrenginio efektyvumą lemiančių veiksnių eksperimentai atlikti 2015 metais, Kauno technologijos universiteto oro taršos tyrimų laboratorijoje.



2.1 pav. Kompleksinio oro valymo įrenginio schema (adaptuota pagal “Air Quality Management in Low Energy Homes (IAQSmart)” projekto ataskaitą, 2014)

Dėl nedidelės kainos ir sąlyginai mažo toksiškumo, lakius organinius junginius reprezentuojančiu junginiu pasirinktas toluenas.

Žematemperatūre dujų išlydžio plazma gauta modifikuotame vainikinio išlydžio reaktoriuje. Išlydžio elektrodai sudaryti iš plieninio tinklelio (0,001 m; 0,001×0,001 m) veikiančio kaip pagrindinis elektrodas ir 15-os pjūklinio tipo išlydžio elektrodų. Reakcijos zonos

plotas buvo $0,1 \text{ m}^3$, reaktoriaus ilgis $0,15 \text{ m}$, skerspjūvio plotas $0,063 \text{ m}^2$. Naudotas aukštos įtampos nuolatinės srovės energijos šaltinis, kuriuo gaunama iki 30 kV įtampa ir 150 W galia.

Antras etapas įrenginyje – katalizė. Šio etapo tikslas palengvinti organinių junginių skaidymą naudojant TiO_2 daleles (80 % anatazo ir 20 % rutilo fazės), kuriomis elektroforezės metodu buvo padengtos nerūdijančio plieno juostelės. Vieną katalizės etapą sudarė į rėmą sudėtos katalizatoriumi padengtos nerūdijančio plieno juostelės, iš kurių kas antra buvo plisuota siekiant užtikrinti gerą oro pralaidumą (žr. 2.2 paveikslas). Pilnai sukomplektuotame įrenginyje įrengti du katalizės etapai, $0,1 \text{ m}$ atstumu vienas nuo kito.

UV spinduliuotė naudota katalizinio sluoksnio suaktyvinimui (Hg lempa; 256 nm ; 20 W).

Teršalų dalelės iš įeinančio oro srauto, kartu su dalelėmis susiformavusiomis plazmos etape, buvo surenkamos 11 klasės HEPA filtru (95 % efektyvumas šalinant $0,3 \mu\text{m}$ daleles). Filtravimo etapas būtinas siekiant išvengti sorbento porų užsikimšimo sorbcijos etape.

Paskutinis oro valymo etapas – sorbcija. LOJ adsorbicijai naudota mažą poringumą turinti antracito anglis. Aktyvuotos anglies granulės (diametras $0,003 \text{ m}$; ilgis – $0,01 \text{ m}$) patalpintos į rėmą (plotis $0,03 \text{ m}$) su plieniniu tinkleliu (žr. 2.2 paveikslas).



2.2 pav. TiO_2 katalizatoriaus etapas (A) ir sorbcijos aktyvuota anglimi etapas (B)

Oras tyrimui buvo tiekiamas iš bendros laboratorijos pastato oro tiekimo sistemos. Tiekiamo oro santykinė drėgmė buvo 40–45 %, temperatūra – $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Tiekiamo oro charakteristikos praktiškai nekito viso eksperimento metu.

Siekiant sukurti oro užterštumą lakiais organiniais junginiais, į oro srautą prieš valymo etapus tiekamas toluenas (dujų chromatografijos tirpalas, SigmaAldrich, Vokietija). Tolueno įvedimui į sistemą naudota švirkštinė pompa (LongerPump LSP01-1A, Kinija) (žr. 2.4 paveikslas) ir išgarinimo kamera.



2.4 pav. Švirkštinė pompa LSP01-1A

Tolueno tirpalas plieniniu kapiliaru įvestas į išgarinimo vamzdelio vidurį (debitas – 1,724 ml/h). Į sistemą įvedamo tirpalo išgarinimo kamera sudaryta iš kvarcinio stiklo vamzdelio (diametras – 0,005 m; ilgis – 0,1 m) užpildyto kvarcine vata ir susukto į nichromo vielą, kad būtų sukuriamas pastovi, išgarinimui reikalinga 100 °C temperatūra. Siekiant užtikrinti vientisą tolueno dalelių pasiskirstymą oro sraute, įrenginio pradžioje, prieš plazmos zoną įrengtas srautą paskirstantis plieninis tinklelis.

2.2. Tyrimų planas

Kompleksinio oro valymo įrenginio efektyvumą lemiančių veiksnių tyrime pagrindiniais kintamais proceso parametrais pasirinkus neterminės plazmos reaktoriaus galią ir skirtingų valymo metodų derinį, suplanuotas ir atliktas 50-ies bandymų eksperimentas (žr. 1.3 lentelė). Oro debitas ir pradinė lakių organinių teršalų (tolueno) koncentracija, oro drėgnumas, foninės LOJ ir aerolių koncentracijos buvo pastovios. Tolueno koncentracija išmatuota AEROQUAL įrenginio NMHC jutikliu, ozono koncentracija išmatuota ozono jutikliu.

1.3 lentelė. Tyrimų plano detalizacija

Bandymo Nr.	Teršalų šalinimo metodų derinys	Raktoriaus galia, W	Pradinė tolueno koncentracija, mg/m ³	Oro debitas, m ³ /h
1.	O ₃	40	10	150
2.	O ₃	50	10	150
3.	O ₃	60	10	150
4.	O ₃	70	10	150
5.	O ₃	80	10	150
6.	O ₃ +UV	40	10	150
7.	O ₃ +UV	50	10	150
8.	O ₃ +UV	60	10	150
9.	O ₃ +UV	70	10	150
10.	O ₃ +UV	80	10	150
11.	O ₃ +K1/2	40	10	150
12.	O ₃ +K1/2	50	10	150
13.	O ₃ +K1/2	60	10	150
14.	O ₃ +K1/2	70	10	150
15.	O ₃ +K1/2	80	10	150
16.	O ₃ +K1/2+UV	40	10	150
17.	O ₃ +K1/2+UV	50	10	150
18.	O ₃ +K1/2+UV	60	10	150
19.	O ₃ +K1/2+UV	70	10	150
20.	O ₃ +K1/2+UV	80	10	150
21.	O ₃ + K2/2	40	10	150
22.	O ₃ + K2/2	50	10	150
23.	O ₃ + K2/2	60	10	150
24.	O ₃ + K2/2	70	10	150
25.	O ₃ + K2/2	80	10	150
26.	O ₃ +K2/2+UV	40	10	150
27.	O ₃ +K2/2+UV	50	10	150
28.	O ₃ +K2/2+UV	60	10	150
29.	O ₃ +K2/2+UV	70	10	150
30.	O ₃ +K2/2+UV	80	10	150
31.	O ₃ +S+K2/2+UV	40	10	150
32.	O ₃ +S+K2/2+UV	50	10	150

33.	O ₃ +S+K2/2+UV	60	10	150
34.	O ₃ +S+K2/2+UV	70	10	150
35.	O ₃ +S+K2/2+UV	80	10	150
36.	O ₃ +S+K2/2	40	10	150
37.	O ₃ +S+K2/2	50	10	150
38.	O ₃ +S+K2/2	60	10	150
39.	O ₃ +S+K2/2	70	10	150
40.	O ₃ +S+K2/2	80	10	150
41.	O ₃ +S	40	10	150
42.	O ₃ +S	50	10	150
43.	O ₃ +S	60	10	150
44.	O ₃ +S	70	10	150
45.	O ₃ +S	80	10	150
46.	O ₃ +S+UV	40	10	150
47.	O ₃ +S+UV	50	10	150
48.	O ₃ +S+UV	60	10	150
49.	O ₃ +S+UV	70	10	150
50.	O ₃ +S+UV	80	10	150

Tyrimai atlikti esant pastoviam 150 m³/h oro debitui ir pastoviai pradinei 10 mg/m³ tolueno koncentracijai. Plazmos reaktoriaus galia buvo keičiama į 40, 50, 60, 70, 80 W bei keičiamas teršalų šalinimo metodų derinys: O₃ – tik ozonas, O₃+UV – ozonas ir UV, O₃+K1/2 – ozonas ir vienas katalizatoriaus etapas (iš dviejų galimų), O₃+K1/2+UV – ozonas, vienas katalizatoriaus etapas ir UV, O₃+ K2/2 – ozonas ir du katalizatoriaus etapai (iš dviejų galimų), O₃+K2/2+UV – ozonas, abu katalizatoriaus etapai ir UV, O₃+S+K2/2+UV – ozonas, sorbentas, abu katalizatoriaus etapai ir UV, O₃+S+K2/2 – ozonas, sorbentas ir abu katalizatoriaus etapai, O₃+S – ozonas ir sorbentas, O₃+S+UV – ozonas, sorbentas ir UV.

Kompleksinio oro valymo įrenginio efektyvumui poveikį turinčių veiksnių: energijos kiekio (ozono koncentracijos) ir LOJ valymo metodų derinio vertinimas atliktas pagal ozono ir likutinio LOJ matavimų rezultatus. Norint įvertinti optimalios komplektacijos įrenginio pritaikomumą gyvenamuosiuose namuose, įvertintas jo ekonomiškumas apytiksliai apskaičiuavus mėnesio išlaidas už sistemos suvartojamą elektros energiją.

Elektros energijos tankis apskaičiuotas pagal lygtį:

$$SEI = \frac{3600 \times U \times I}{Q}, J/l \quad (1)$$

čia:

Q – Oro debitas, l/h;

I – Plazmos reaktoriaus elektros srovės stipris, A;

U – Plazmos reaktoriaus elektros įtampa, V.

Teršalų valymo efektyvumas apskaičiuotas pagal lygtį:

$$E = \frac{(C_0 - C_i)}{C_0} \times 100, \% \quad (2)$$

čia:

C₀ – Pradinė junginio koncentracija, mg/m³;

C_i – Likutinė junginio koncentracija, mg/m³.

Energijos efektyvumas apskaičiuotas pagal lygtį:

$$EE_i = \frac{C_d}{EE_i}, g/kWh \quad (3)$$

čia:

C_d – Suskaidyto junginio koncentracija, mg/m³;

EE_i – Energijos tankis, J/m³.

Atlikus tyrimus ir įvertinus kokios komplektacijos oro valymo įrenginys atitinka siektinus lakių organinių teršalų pašalinimo iš patalpų oro efektyvumo kriterijus (aukštas įrenginio efektyvumas esant nedideliame energijos tankiui, šalutinio produkto – aerozolio susiformavimo vengimas). Energijos suvartojimas apskaičiuotas optimalios komplektacijos įrenginiui bei energetiškai efektyvaus namo vėdinimo sistemai, sudarytai iš kompleksinio oro valymo įrenginio ir rekuperacinės ventiliavimo sistemos.

Rekuperatoriaus energijos suvartojimas apskaičiuotas pagal lygtį:

$$En_{rekup.} = (Q \times \Delta t \times 0,34 \times (1 - \text{Efekt}_{rekup}) \times 30 \times T) / 1000, \text{ kWh/m\acute{e}n} \quad (4)$$

čia:

Q – Oro debitas, m³/h;

Δt – įeinančio ir išėinančio oro temperatūrų skirtumas, °C;

0,34 – pastovi dedamoji;

Efekt_{rekup} – rekuperatoriaus energijos grąžinimo efektyvumas;

d – sistemos veikimo laikas dienomis;

T – sistemos veikimo laikas valandomis per parą.

2.3. Instrumentinė analizė

Oro mėginių paėmimui įrenginyje buvo įrengti du 6 mm diametro nerūdijančio plieno vamzdeliai lenktais galais. Lenkti vamzdelių galai buvo nukreipti prieš oro srautą. Oro mėginių paėmimo vamzdeliai buvo naudojami norint išmatuoti esamas sąlygas įrenginyje, visais tyrimo etapais. Mėginių paėmimo vamzdeliai įrengti oro valymo įrenginio gale, skerspūvio centre, prieš anemometrą ir išvalyto oro išėjimo angą (žr. 2.1 paveikslas). Likutinės teršalų koncentracijos, sugeneruotas O₃, išmatuotos realaus laiko, NMHC jutikliniu matuokliu AEROQUAL IQM 60 (Aeroqual Limited, Naujoji Zelandija) (žr. 2.4 paveikslas). Matavimų duomenys registruojami atminties kortelėje arba prijungtame kompiuteryje.



2.4 pav. Oro kokybės monitoringo įrenginys AEROQUAL IQM 60

2.4. Duomenų apdorojimas

Duomenų analizei atlikti ir grafiniam rezultatų pateikimui naudoti IBM SPSS Statistics 22.0 ir Microsoft Excel 2010 programiniai paketai.

3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

3.1. Energijos kiekio plazmos reaktoriuje poveikis susidariusio ozono koncentracijai

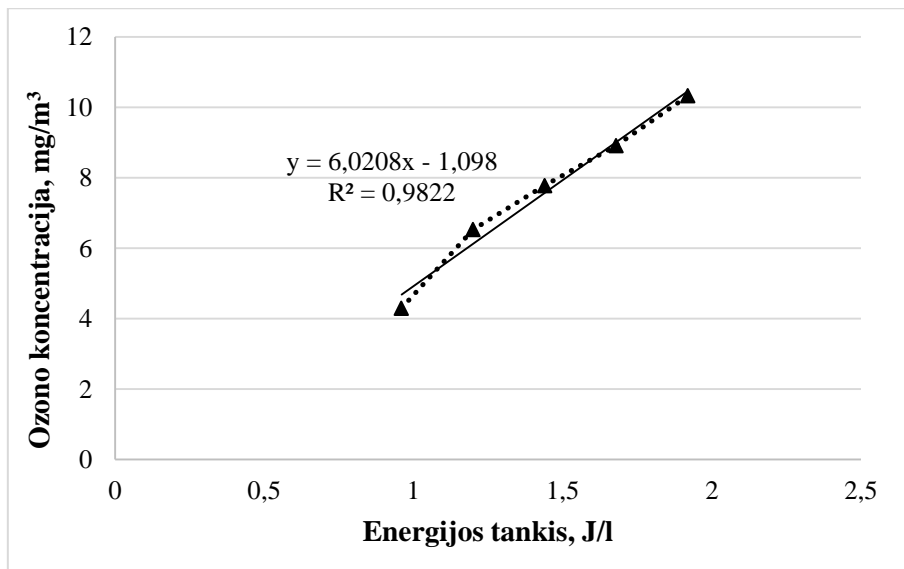
Reaktingųjų dalelių formavimasis išlydžio zonoje priklauso nuo energijos kiekio (Kim ir kt., 2002). Norint įvertinti įeinančios energijos kiekio poveikį pagrindinio LOJ oksiduojančio agento – ozono susidarymui vainikinio išlydžio zonoje, pirmame eksperimento etape buvo atliktas kalibracinis ozono koncentracijos matavimas, į sistemą neįvedus lakaus organinio junginio ir veikiant tik plazmos reaktoriui. Plazmos reaktoriaus galia buvo keičiama tokia pat intervale (40 - 80 W), kokiame numatyta atlikti visą efektyvumą lemiančių veiksnių tyrimą.

Galios reikšmės buvo perskaičiuotos (1 lygtis) į atitinkamas energijos tankio vertes, parodančias kinetinės energijos kiekį tenkantį tūrio vienetui oro (žr. 3.1 lentelė).

3.1 lentelė. Plazmos reaktoriaus energetinės charakteristikos naudotos tyrimo metu

Plazmos reaktoriaus elektros srovės stipris, mA;	Plazmos reaktoriaus elektros įtampa, kV	Plazmos reaktoriaus galia, W	Energijos tankis, J/l
22	1,8	40	0,96
22	2,3	50	1,20
22	2,7	60	1,44
22	3,2	70	1,68
22	3,6	80	1,92

Ozono koncentracijos priklausomybės nuo energijos tankio kalibracinio matavimo rezultatai pateikti 3.1 paveiksle. Pagal duomenų išsidėstymą matoma, kad ozono koncentracija buvo stipriai priklausoma nuo didėjančio energijos tankio. Nuo 0,96 iki 1,92 J/l didinant energijos tankį, išlydžio zonoje susiformavusio ozono koncentracija apytikriai išaugo nuo 4 iki 11 mg/m³.

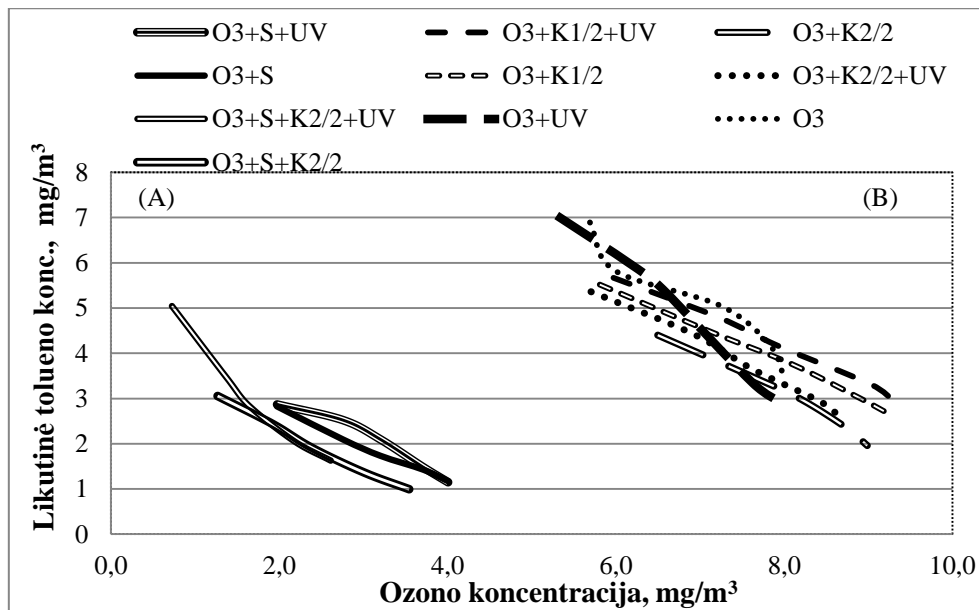


3.1 pav. Ozono koncentracijos priklausomybė nuo energijos tankio

Eksperto antrojo etapo pradžioje, plazmos reaktoriuje susidarancio ozono koncentracija taip pat buvo išmatuota į sistemą neįvedus lakaus organinio junginio, tačiau neterminės plazmos oro valymo įrenginio sandarą papildžius TiO_2 katalizatoriaus, UV spinduliuotės bei aktyvuotos anglies sorbento deriniais. Tais atvejais, kai buvo naudojamas aktyvuotos anglies sorbentas, dėl adsorbcijos ant sorbento paviršiaus, susidariusio ozono koncentracija buvo mažesnė, lyginant su valymo metodų deriniais be sorbento.

3.2. Ozono koncentracijos įtaka teršalų pašalinimui iš oro

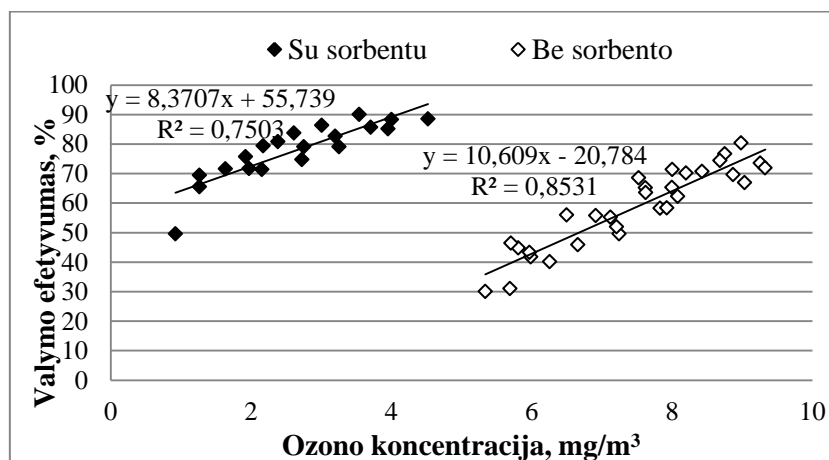
Ozonas – pagrindinis teršalus oksiduojantis agentas, susidarantis plazmos reaktoriuje. Šio oksidatoriaus koncentracijos poveikis reprezentatyvaus lakaus organinio junginio – tolueno pašalinimui iš oro pavaizduotas 3.2 paveiksle. Oro kokybės monitoringo įrenginiu išmatavus likutines tolueno koncentracijas, pagal gautus duomenis nubrėžtos linijinės diagramos parodančios ozono koncentracijos įtaką tolueno koncentracijos sumažėjimui atlikus oro valymą kompleksiniu įrenginiu. Pagal paveiksle pateiktus rezultatus, matomas duomenų pasiskirstymas į dvi grupes pagal ozono koncentraciją reikalingą maksimaliam LOJ kiekio sumažinimui.



3.2 pav. Likutinės tolueno koncentracijos kitimo priklausomybė nuo ozono koncentracijos

Įrenginio komplektacijos su sorbentu atvejais (žr. 3.2 paveikslo (A) dalis), dvigubai mažesnės likutinio tolueno koncentracijos pasiektos su perpus mažesne ozono koncentracija, nei su oro valymo metodų deriniais be sorbento (žr. 3.2 paveikslo (B) dalis). Abiejų metodų pasiskirstymo į grupes atvejais, matoma bendra tendencija – didėjant ozono koncentracijai, likutinė tolueno koncentracija mažėjo.

Likutinė tolueno koncentracijos matavimų rezultatai perskaičiuoti į tolueno pašalinimo efektyvumą (2 lygtis). Vertinant didėjančios ozono koncentracijos poveikį tolueno skaidymo efektyvumui, iš 3.3 paveiksle pateiktų duomenų matyti aiški tendencija – didėjant ozono koncentracijai, valymo efektyvumas taip pat didėjo.



3.3 pav. Tolueno pašalinimo iš oro efektyvumo priklausomybė nuo ozono koncentracijos

Pagal duomenų išsidėstymo tendencijas (žr. 3.3 paveikslas) matoma, jog neterminės plazmos oro valymo įrenginyje naudojant derinius su sorbentu, aukštam efektyvumui (65 - 90 %) pasiekti užteko 1,3 – 4,5 mg/m³ ozono, tuo tarpu, įrenginio komplektacijose be sorbento, su 5,3 – 9,3 mg/m³ ozono koncentracijomis pasiektas 30 - 80 % teršalų pašalinimo efektyvumas. Tai leidžia daryti išvadą, kad įrenginyje naudojant LOJ šalinimo derinius su sorbentu, aukštas valymo efektyvumas pasiekiamas su dvigubai mažesnėmis ozono koncentracijomis, nei įrenginio komplektacijose be sorbento. Pagal ozono priklausomybę nuo energijos tankio, tai parodo, kad derinių su sorbentu atvejais, aukštam efektyvumui pasiekti turėtų užtekti mažesnio energijos kiekio lyginant su deriniais be sorbento.

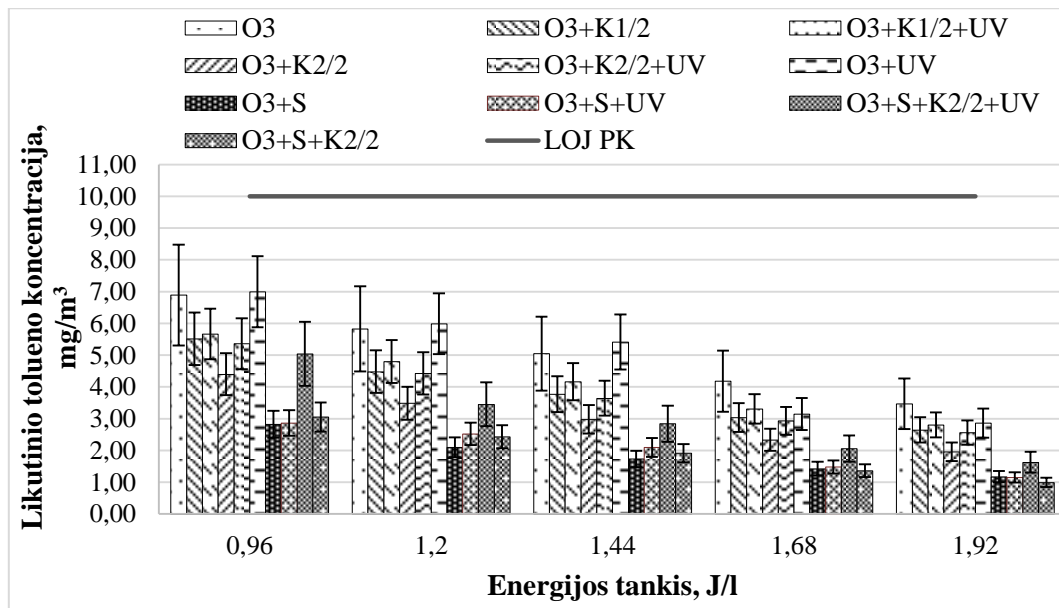
3.3 Energijos kiekio plazmos reaktoriuje poveikis teršalų pašalinimui

Pagal 3.4 paveiksle pateiktus likutinio tolueno koncentracijų rezultatus, matoma tendencija, kad didinant energijos tankį sąlygojantį didesnę kiekį sugeneruoto ozono, nepašalinto tolueno koncentracija mažėjo visais LOJ šalinimo metodų derinių atvejais, lyginant su mažiausio 0,96 J/l energijos kiekio nulemtais likutinio tolueno koncentracijos rezultatais.

Esant mažiausiam energijos tankiui (0,96 J/l), pradinė 10 mg/m³ tolueno koncentracija buvo sumažinta iki 7 – 2,9 mg/m³, priklausomai nuo valymo metodų derinių be sorbento ir su sorbentu.

Atlikus tyrimus nustatyta, kad nuo 0,96 iki 1,2 J/l padidinus energijos tankį, reikšmingo poveikio likutinėms tolueno koncentracijoms nebuvo.

Energijos kiekio padidininimas nuo 0,96 J/l iki 1,44 ir 1,68 J/l buvo reikšmingas tolueno koncentracijų sumažėjimui įrenginio komplektacijų su sorbentu atvejais (O₃+S, O₃+S+UV, O₃+S+K2/2+UV, O₃+S+K2/2) – likutinio tolueno koncentracijos buvo papildomai sumažintos vidutiniškai 2 ir 2,2 karto. Reikšmingo poveikio tolueno pašalinimui tarp 1,44 ir 1,68 J/l energijos tankių, esant deriniams su sorbentu nebuvo.



3.4 pav. Energijos kiekio poveikis tolueno pašalinimui

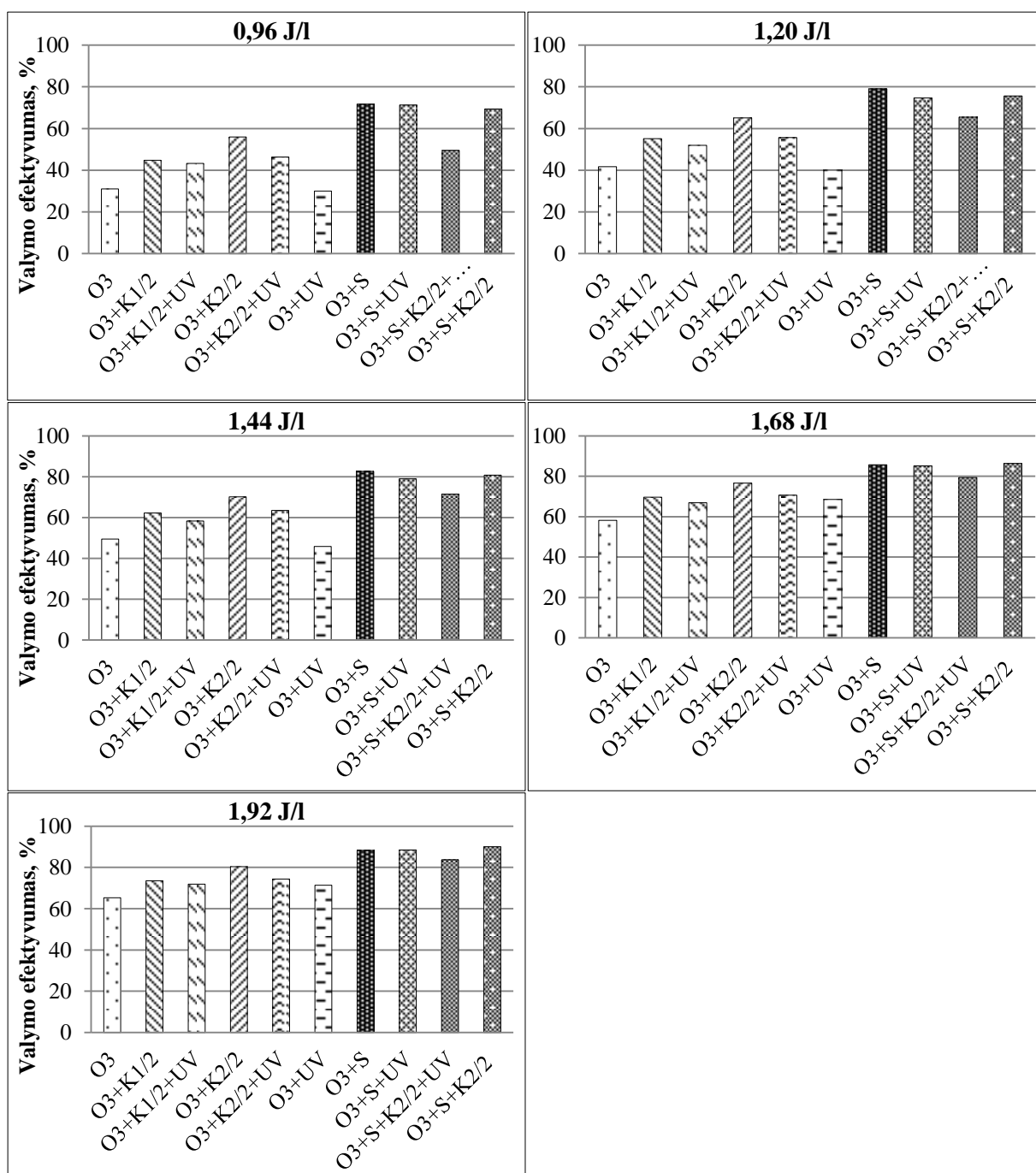
Pagal 3.4 paveiksle pateiktus likutinio tolueno matavimo rezultatus taip pat matoma, kad įrenginio komplektacijos su katalizatoriumi ir ultravioletine spinduliuote atvejais, tolueno koncentracijos sumažinimui reikėjo didesnio energijos kiekio – reikšmingą poveikį darė tik 1,68 ir 1,92 J/l energijos tankiai, kuriuos lyginant tarpusavyje, reikšmingo poveikio tolueno pašalinimui nenustatyta.

Padidinus energijos kiekį nuo mažiausio tyrime naudoto 0,96 J/l iki didžiausio – 1,92 J/l, visais skaidymo metodų derinių atvejais, papildomai buvo pašalinta $\geq 50\%$ tolueno: 1,92 J/l energijos tankio atveju, plazmos reaktoriuje sugeneruotas didesnis kiekis ozono (O_3), tolueno koncentraciją papildomai sumažino 50 % lyginant su 0,96 J/l energijos tankio rezultatu, ozono ir vieno etapo TiO_2 katalizatoriaus derinio atveju ($O_3+K1/2$) – 52 %, ozono, vieno etapo TiO_2 katalizatoriaus ir UV ($O_3+K1/2+UV$) – 50 %, ozono ir abiejų etapų TiO_2 katalizatoriaus ($O_3+K2/2$) – 55 %, ozono, abiejų etapų TiO_2 katalizatoriaus ir UV ($O_3+K2/2 + UV$) – 52 %, ozono ir UV (O_3+UV) – 59 %, ozono ir sorbento (O_3+S) – 59 %, ozono, sorbento ir UV (O_3+S+UV) – 60 %, ozono, sorbento, abiejų etapų TiO_2 katalizatoriaus ir UV ($O_3+S+K2/2+UV$) – 68 %, ozono, sorbento ir abiejų etapų TiO_2 katalizatoriaus ($O_3+S+K2/2$) – 67 %.

Apibendrinant skirtingų energijos kiekio poveikio tolueno pašalinimui rezultatus galima daryti išvadą, kad neįskaitant tyrime naudoto didžiausio energijos tankio (1,92 J/l), valymo metodų derinių su sorbentu atveju, geriausiam LOJ pašalinimui pasiekti pakanka mažesnio kiekio energijos (1,44 J/l), nei derinių be sorbento atveju (1,68 J/l).

3.2. Valymo metodų derinių poveikis įrenginio efektyvumui

Skirtingų valymo metodų derinių įtaka LOJ pašalinimo iš oro efektyvumui pateikta 3.5 paveiksle.



3.5 pav. Skirtingų valymo metodų derinių poveikis LOJ valymo efektyvumui

Pagal išmatuotas likutines ir pradinę tolueno koncentracijas atlikti įrenginio LOJ valymo efektyvumo skaičiavimai (2 lygtis), kurių rezultatai pateikti 3.5 paveiksle.

Paveiksle pateikti rezultatai rodo, kad visais energijos tankio įrenginyje atvejais, didžiausias lakaus organinio junginio pašalinimo iš oro efektyvumas buvo pasiektas įrenginio komplektacijose su aktyvuotos anglies sorbentu: O_3+S , O_3+S+UV , $O_3+S+K2/2$.

Minėtaisiais valymo metodų derinių atvejais – ozono, sorbento (O_3+S), ozono, sorbento, UV (O_3+S+UV) ir ozono, sorbento ir abiejų katalizatoriaus etapų $O_3+S+K2/2$ derinių atvejais teršalų šalinimo iš oro efektyvumas beveik nesiskyrė. UV spinduliuotė reikšmingo poveikio tolueno šalinimo efektyvumui neturėjo nė vienu tyrime atlikto derinio atveju.

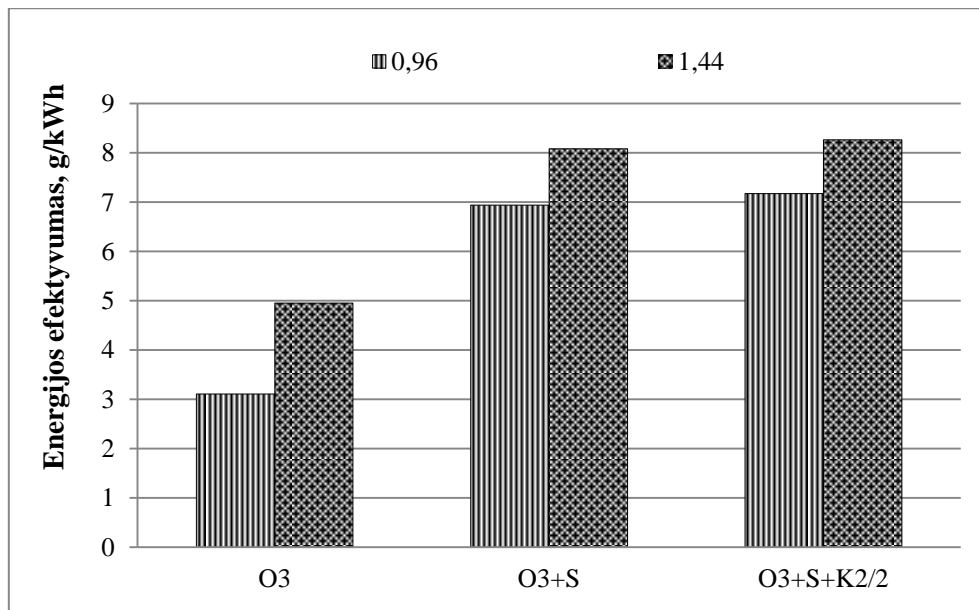
Atlikus 3.5 paveiksle pateiktų rezultatų palyginimą matoma, kad aktyvuotos anglies sorbentas turėjo didžiausią teigiamą poveikį LOJ šalinimo efektyvumui įrenginyje. Didžiausią efektyvumą sukuriantį plazmos ir aktyvuotos anglies sorbento derinį lyginant su plazmos etapu (O_3), apskaičiuota, kad plazmos etapą papildžius sorbentu, tolueno skaidymo efektyvumas išaugo 34,66 %. Kompleksinio plazmos ir sorbento (O_3+S) įrenginio efektyvumas, esant 0,96 J/l energijos tankiui siekė 72 %, 1,20 J/l – 79 %, 1,44 J/l – 83 %, 1,68 J/l – 86 %, 1,92 J/l – 88 %.

Nors abiejų katalizatoriaus etapų komplektavimas su ozono ir sorbento deriniais reikšmingos įtakos LOJ šalinimui neturėjo ir teršalų šalinimo efektyvumas buvo beveik toks pats, parenkant optimalią oro valymo įrenginio komplektaciją, atsižvelgta į tai, kad lakių organinių junginių reakcijų su ozonu metu, priklausomai nuo plazmos reaktoriaus galios susidaro tam tikras kiekis organinio aerozolio dalelių (didinant energijos kiekį plazmos reaktoriuje, daugiau aerozolio susiformuoja), kurių pašalinimui TiO_2 katalizatoriaus etapas gali būti reikalingas.

3.3. Energijos suvartojimo vertinimas

Efektyvias teršalų valymo technologijas yra svarbu ne tik sukurti, tačiau būtina įvertinti ir jų realaus pritaikomumo galimybes. Dažnu atveju, aukšto efektyvumo įrenginiai reikalauja daug išlaidų už elektros energijos suvartojimą. Dėl šios priežasties, nuspręsta įvertinti optimalios komplektacijos – plazmos reaktoriaus ir aktyvuotos anglies sorbento (O_3+S) komplektacijos ir ozono, sorbento ir TiO_2 katalizatorių ($O_3+S+K2/2$, eksploatuojamo 0,96 ir 1,44 J/l energijos tankių intervale, energijos suvartojimo ir išlaidų už jas vertinimą.

Žinant likutines teršalų koncentracijas ir energijos tankį, apskaičiuotas energijos efektyvumas (3 lygtis), parodantis kiek gramų LOJ suskaidoma 1 kWh energijos (žr. 3.6 paveikslas).



3.6 pav. Energijos efektyvumo palyginimas tarp optimalių oro valymo metodų derinių

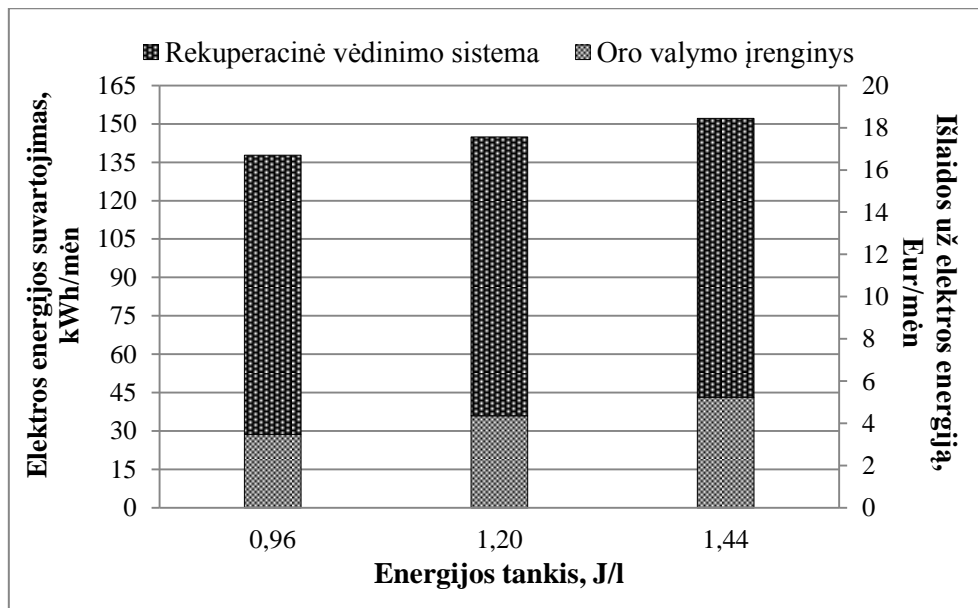
Iš grafike pateiktų rezultatų matoma, kad energijos efektyvumas priklausė nuo plazmos reaktoriaus energijos tankio.

Esant įrenginio efektyvumo atžvilgiu optimaliems 0,96 J/l ir 1,44 J/l energijos tankiams (70 ir 83 % lakių organinių junginių išvalymo efektyvumas), energijos efektyvumas atitinkamai yra 7 ir 8 g/kWh.

Ozono ir sorbento (O₃+S) komplektacija yra optimali siekiant lakių organinių junginių koncentraciją ore sumažinti iki 72 % naudojant nedidelį – 0,96 energijos tankį, taip sumažinant sąlygas aerozolio formavimuisi.

Ozono, sorbento ir dviejų TiO₂ katalizatoriaus etapų (O₃+S+K₂/2) derinys siūlomas norint pasiekti 83 % lakių organinių junginių šalinimo efektyvumą (1,44 J/l energijos tankis), katalizatoriumi mažinant aerozolių formavimąsi.

Norint sukurti pilnai energetiškai ir ekonomiškai efektyvią patalpų ventiliavimo sistemą, parinktos sandaros kompleksinis oro valymo įrenginys prijungiamas prie rekuperacinės namo vėdinimo sistemos. Lietuvos klimatinėmis sąlygomis, žiemą temperatūrai nukrintant ženkliai žemiau nulio, oro valymo įrenginys turi būti prijungiamas prie rotacinio tipo rekuperatoriaus rekuperatoriaus. Norint įvertinti optimalios skaidymo metodų komplektacijos prognozuojamas įrenginio elektros energijos išlaidas, apskaičiuotas suminis oro valymo sistemos elektros energijos suvartojimas (žr. 3.7 paveikslas).



3.7 pav. Prognozuojamas energijos suvartojimas ir išlaidos už elektros energiją

Planuojamos išlaidos už sistemos sunaudotą elektros energiją apskaičiuotos pagal 0,127 Eur/kWh elektros energijos apmokestinimo tarifą su PVM, kai elektros energija gaunama iš žemosios įtampos elektros tinklų, esant vienos laiko zonos dedamajai.

Apskaičiuota, kad į patalpas norint tiekti iki 20 °C pašildytą orą, priklausomai nuo optimalios įrenginio komplektacijos (ozono ir aktyvuotos anglies sorbento derinys – 0,96 J/l energijos tankio atvejis; ozono, aktyvuotos anglies sorbento ir dviejų TiO₂ katalizatorių derinys – 1,44 J/l) išlaidos už sunaudotą elektros energiją, kartu su rekuperacine sistema būtų apie 17 – 19 Eur/mėn (apie 136 – 151 kWh/mėn), sistemai veikiant 24 valandas per parą. Šiais apytiksliais skaičiavimais, išlaidos už oro valymo įrenginio sunaudotą elektros energiją sudarytų apie 20 - 28 % sumos už visą rekuperacinę oro vėdinimo – valymo – šildymo – sistemą.

IŠVADOS

1. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad „nesveiko pastato sindromą“ sukeliančių lakių organinių junginių šalinimui dažniausiai naudojamos vienos rūšies oro valymo technologijos, tokios kaip sorbcinė filtracija, katalitinė oksidacija, ozonavimas, nėra pakankamai efektyvios arba yra sunkiai integruojamos į pastatų ventiliacijos sistemą. Kaip savarankiški įrenginiai, neterminės plazmos reaktoriai taip pat nėra pakankamai efektyvūs siekiant visiškai suskaidyti lakius organinius junginius, susiformuoja šalutiniai produktai, tarp kurių viena didžiausių problemų – organinis aerolis.

2.1. Vienas pagrindinių veiksnių, nulėmusių kompleksinio oro valymo įrenginio lakių organinių junginių pašalinimo iš patalpų oro efektyvumą, yra energijos tankis. Nuo 0,96 iki 1,92 J/l didinant energijos tankį, priklausomai nuo įrenginio komplektacijos, likutinė tolueno koncentracija sumažėjo 50 – 68 %. Nustatyta, kad nuo 0,96 iki 1,2 J/l padidinus energijos tankį, reikšmingo poveikio tolueno sumažėjimui nebuvo.

2.2. Kitas kompleksinio oro valymo įrenginio efektyvumą nulėmęs veiksnys – lakių organinių junginių valymo metodų derinys. Visais energijos tankio atvejais, didžiausias lakaus organinio junginio pašalinimo iš oro efektyvumas buvo pasiektas įrenginio komplektacijose su aktyvuotos anglies sorbentu ir dviem katalizatoriaus etapais – O_3+S , $O_3+S+K_2/2$ (pasiektas 72 – 90 % valymo efektyvumas). UV spinduliuotė reikšmingos įtakos efektyvumui neturėjo nė vieno valymo metodų derinio atveju. Efektyviam teršalų pašalinimui pasiekti, esant deriniams su sorbentu, užteko mažesnio kiekio energijos ir ozono, nei derinių be sorbento atveju.

3. Atsižvelgiant į lakių organinių junginių pašalinimo efektyvumo rezultatus, reikalingą energijos kiekį ir kuo mažesnes galimybes antrinio teršalo aerolio susiformavimui, optimaliomis oro valymo įrenginio komplektacijomis siūlomi: 72 % teršalų šalinimo efektyvumo neterminės plazmos reaktoriaus ir aktyvuotos anglies sorbento (O_3+S) derinys esant 0,96 J/l energijos tankiui, ir 83 % valymo efektyvumo plazmos reaktoriaus, aktyvuotos anglies sorbento ir abiejų TiO_2 katalizatoriaus etapų derinys ($O_3+S+K_2/2$) derinys esant 1,44 J/l energijos tankiui.

4. Optimalių įrenginio komplektacijų atveju, išlaidos už sunaudotą elektros energiją, kartu su rekuperacine sistema būtų apie 17 – 19 Eur/mėn (apie 136 – 151 kWh/mėn). Išlaidos už oro valymo įrenginio sunaudotą elektros energiją sudarytų apie 20 – 28 % sumos išleidžiamos už elektros energiją visai rekuperacinei oro vėdinimo – valymo – šildymo – sistemai.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. *Agency for Toxic Substances and Disease Registry: Toxicological Profile for Toluene. Draft for Public Comment* [interaktyvus], 2015 [žiūrėta 2016 02 03]. Prieiga per internetą: <http://www.atsdr.cdc.gov/substances/toxsubstance.asp?toxid=29>.
2. “Air Quality Management in Low Energy Homes (IAQSmart)”. 2014: No. VP1-3.1-SMM-07-K-02-075. Projekto ataskaita.
3. Blondel A., Plaisance H. (2010). Validation of a passive flux sampler for on-site measurement of formaldehyde emission rates from building and furnishing materials. *Analytical Methods*, 2, p. 2032-2038.
4. Brandenburg R., Barankova H., Bardos L., Chmielewski A.G., Dors M., Grosch H., Holub M., Jogi I., Laan M., Mizeraczyk J., Pawelec A., Stamate E. (2011). Plasma-Based Depollution of Exhausts: Principles, State of the Art and Future Prospects. *Monitoring, Control and Effects of Air Pollution*, p. 229-254.
5. Castellote M., Bengtsson N. (2011). Principles of TiO₂ Photocatalysis. In *Application of Titanium Dioxide Photocatalysis to Construction Materials*. Netherlands: Springer, 5, p. 5–10.
6. Chorria J., Jaroniec M., Kloske M. (2007). Ordered siliceous and carbonaceous nanomaterials in environmental protection. *Ochrona Srodowiska*, 29, p. 3–12.
7. Grigonis A., Galdikas A. (2006). *Plazminiai ir plazmocheminiai procesai*. Vadovėlis aukštosios mokykloms. Kaunas: Vitae Litera, 186 p.
8. Guieysse B., Hort C., Platel V., Munoz R., Ondarts M., Revah S. (2008). Biological treatment of indoor air for VOC removal: Potential and challenges. *Biotechnology Advances*, 26, p. 398-410.
9. *Indoor Air Quality: Organic Pollutants*. (1989). World Health Organization: Berlin.
10. Ivanova T.V., Hoder T., Kääriäinen M. L., Komlev A. Brandenburg R., Cameron D. C. (2014). Enhancement of Atmospheric Plasma Decomposition of Toluene Using Porous Dielectric Conformally Coated with Titanium Dioxide by Atomic Layer Deposition. *Science of Advanced Materials*, 6, p. 1-8.
11. Jo W. K., Yang C.H. (2009). Granular-activated carbon adsorption followed by annular-type photocatalytic system for control of indoor aromatic compounds. *Separation and Purification Technology*, 66(3), p. 430-442.
12. Khan F. I., Ghoshal A. K. (2000). Removal of Volatile Organic Compounds from polluted air: a review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 13, p. 527-545.

13. Kim H. H., Prieto G., Takashima K., Katsura S., Mizuno A. (2002). Performance evaluation of discharge plasma process for gaseous pollutant removal. *Journal of Electrostatics*, 55(1), p. 25-41.
14. Krugly E., Čiužas D., Kaunelienė V., Šeduikytė L. 2014. Management of Indoor Air Quality by In – Room Air Cleaners and Ventilation. Conference paper. 6 p.
15. Lietuvos higienos norma HN 35:2007 „Didžiausia leidžiama cheminių medžiagų (teršalų) koncentracija gyvenamosios aplinkos ore“. (2007). Vilnius: LR sveikatos apsaugos ministerija.
16. Luengas A., Barona A., Hort C., Gallastegui G., Platel V., Elias A. (2015). A review of indoor air treatment technologies. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 14(1), p. 1-24.
17. Marc M., Zabiegala B., Namiesnik J. (2012). Testing and sampling devices for monitoring volatile and semi-volatile organic compounds in indoor air. *Trends in Analytical Chemistry*, 32, p. 76-86.
18. Mendes A., Teixeira J. P. (2014). Sick Building Syndrome. *Encyclopedia of Toxicology*, 4, p. 256–260.
19. Molhave L., Clausen G., Berglund B., De Ceaurriz J., Kettrup A., Lindvall T., Maroni M., Pickering A., Risse U., Rothweiler H., Seifert B., Younes M. (1997). European Collaborative Action "Indoor Air Quality and its Impact on Man". Report No. 19. Total Volatile Organic Compounds (TVOC) in Indoor Air Quality Investigations. *Indoor Air*, 7, p. 225-240.
20. Salthammer T., Mentese S., Marutzky R. (2010). Formaldehyde in the Indoor Environment. *Chemical Reviews*, 110 (4), p. 2536–2572.
21. Sargiannis D. A., Karakitsios S. P., Gotti A., Liakos I. L., Katsoyiannis A. (2011). Exposure to major volatile organic compounds and carbonyls in European indoor environments and associated health risk. *Environment International*, 37 (4), p. 743–765.
22. Shiraishi F., Ishimatsu T. (2009). Toluene removal from indoor air using a miniaturized photocatalytic air purifier including a preceding adsorption/desorption unit. *Chemical Engineering Science*, 64, p. 2466-2472.
23. Sidheswaran M. A., Destailats H., Sullivan D.P., Cohn S., Fisk W. J. (2012). Energy efficient indoor VOC air cleaning with activated carbon fiber (ACF) filters. *Building and Environment*, 47, p. 357–367.
24. Thevenet F., Sivachandiran L., Guaitella O, Barakat C., Rousseau A. (2014). Plasma–catalyst coupling for volatile organic compound removal and indoor air treatment: a review. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 47, p. 1–14.

25. Urbutis A. Katalizatorių CuO-(CeO₂, La₂O₃)/nešiklis sintezė, savybės ir taikymas lakiųjų aromatinių junginių šalinimo technologijose: daktaro disertacija. 2014: Kaunas. p. 106.
26. Vandenbroucke A. M., Morent R., De Geyter N., Leys C. (2011). Non-thermal plasmas for non-catalytic and catalytic VOC abatement. *Journal of Hazardous Materials*, 195, p. 30–54.
27. Zagorskis A., Spiečiūtė R. (2011). Lašelinio biofiltro aerodinaminio pasipriešinimo tyrimai. *Science – Future of Lithuania*, 3(5), p. 64-69.