



**Kauno technologijos universitetas**

Cheminės technologijos fakultetas

**Kvapą sukeliančių lakiųjų organinių junginių šalinimas  
taikant pažangiosios oksidacijos metodus**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Gabrielė Bružaitė**

Projekto autorė

**Dr. Tadas Prasauskas**

Vadovas

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**

Cheminės technologijos fakultetas

# **Kvapą sukeliančių lakiųjų organinių junginių šalinimas taikant pažangiosios oksidacijos metodus**

Baigiamasis magistro projektas

Aplinkosaugos inžinerija (6211EX003)

---

**Gabrielė Bružaitė**

Projekto autorė

**Dr. Tadas Prasauskas**

Vadovas

**Prof. Gintaras Denafas**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**

Cheminės technologijos fakultetas

Gabrielė Bružaitė

## **Kvapą sukeliančių lakiųjų organinių junginių šalinimas taikant pažangiosios oksidacijos metodus**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Gabrielės Bružaitės, baigiamasis projektas tema „Kvapą sukeliančių lakiųjų organinių junginių šalinimas taikant pažangiosios oksidacijos metodus“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)

Gabrielė Bružaitė. Kvapą sukeliančių lakiųjų organinių junginių šalinimas taikant pažangiosios oksidacijos metodus. Magistro baigiamasis projektas / vadovas dr. Tadas Prasauskas; Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: lakūs organiniai junginiai; terpenai; ne terminė plazma; šalinimo efektyvumas.

Kaunas, 2020. 55 p.

## Santrauka

Lakieji organiniai junginiai, tai ore esančios dujų fazės teršalai, kurie skleidžia nemalonų kvapą ir daro neigiamą poveikį aplinkos kokybei ir žmonių sveikatai, todėl būtina kontroliuoti jų išmetimą. Daugelis šių junginių yra reaktyvios medžiagos, galinčios reaguoti į aplinkos oksidatorius ir sudaryti naujus teršalus. Dažniausiai lakieji organiniai junginiai yra išmetami įvairiose pramonės šakose ar žmogaus veiklos procesuose.

Magistro baigiamojo projekto tikslas ištirti pažangiosios oksidacijos principais paremtą lakiųjų organinių junginių šalinimo technologiją. Oro valymo sistemos technologija buvo pagrįsta daugiapakope konfigūracija, įskaitant ozonolizę, fotolizę, aerozolių aglomeraciją bei dalelių nusodinimo elektrostatiiniame lauke. Tokia seka lemia lakiųjų organinių junginių pašalinimą paverčiant juos iš dujinės būsenos į aerozolio daleles. Technologijos bandymui kaip tikslinis teršalas buvo pasirinktas terpenas, kuriame gausu junginių:  $\alpha$ -pineno,  $\beta$ -pineno ir  $\alpha$ -terpineolio. Šio tirpalo pradinė koncentracija buvo  $4,1 \pm 0,3 \text{ mg} / \text{m}^3$ .

Tyrimas atliktas remiantis eksperimentiniu planu, kuris buvo padalytas į dvi dalis (naudojant ne terminės plazmos moduli ir ozonatoriaus moduli). Sistema buvo išbandyta atsižvelgiant į eksperimentiniame plane nurodytus kintančius parametrus, tokiu kaip ne terminės plazmos modulio galią (nuo 5 iki 25 W), ozonatoriaus modulio galią (nuo 28 iki 52 W), taip pat kintantį oro srautą (nuo 25 iki 200 m<sup>3</sup>/h), kiti sistemos parametrai buvo palaikomi pastovūs.

Atlikus eksperimentą pasiektas lakiųjų organinių junginių šalinimo efektyvumas 92,80 proc. (esant 25 W galiai ir 25 m<sup>3</sup>/h oro srautui) naudojant ne terminės plazmos modulį, bei 74,44 proc. (esant 25 W galiai ir 25 m<sup>3</sup>/h oro srautui) naudojant ozonatoriaus modulį. Taip pat nustatytas terpeno junginių šalinimo efektyvumas:  $\alpha$ -Terpineolio šalinimo efektyvumas pasiektas 99,50 proc. (su ne terminė plazma 25 W, 25 m<sup>3</sup>);  $\alpha$ -pineno 99,90 proc. (su ne terminė plazma 20 – 25 W, 25 m<sup>3</sup>/h ir ozonatoriumi 41 – 52 W, 25 m<sup>3</sup>/h);  $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumas pasiektas 99,90 proc. (su ne terminė plazma 15 – 25 W, 25 m<sup>3</sup>/h ir 25 W ir 50 m<sup>3</sup>/h ir ozonatoriumi 41 W, 25 m<sup>3</sup>/h eksperimento sąlygomis). Specifinės energijos suvartojimo vertės naudojant ne terminės modulį buvo 2,8 karto mažesnės nei naudojant ozonatoriaus modulį. Ne terminės plazmos technologija laikoma konkurencinga dėl užterštame ore esančių lakiųjų organinių junginių pašalinimo efektyvumo ir mažo energijos suvartojimo.

Bružaitė, Gabrielė. Application of Advanced Oxidation Methods for Removal of Odour-Causing Volatile Organic Compounds. Master's Final Degree Project / supervisor dr. Tadas Prasauskas; The Faculty of Chemical Technology, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering sciences (E), Environmental Engineering (E03)

Keywords: volatile organic compounds; terpenes; non-thermal plasma; removal efficiency.

Kaunas, 2020. 55 p.

### Summary

Volatile organic compounds are airborne gas phase pollutants that emit unpleasant odours and have negative impact on the quality of the environment and human health; therefore, it is necessary to control their emissions. Many of these compounds are reactive substances that can react with environmental oxidants to form new contaminants. Volatile organic compounds are most commonly emitted in various industries or human activity processes.

The master's thesis presents a volatile organic compounds air purification system based on a multi-stage configuration, including ozonolysis, photolysis, agglomeration of aerosols, and precipitation of aerosols in electrostatic field. This sequence results volatile organic compounds removal by converting them from the gaseous state to aerosol particles. As the target pollutant, for the technology test, was chosen terpene rich compounds:  $\alpha$ -pinene,  $\beta$ -pinene and  $\alpha$ -terpineol. The initial concentration of this solution was  $4,1 \pm 0.3 \text{ mg/m}^3$ .

Research was performed based on an experimental plan, which was divided into two parts (using the non-thermal plasma module and the ozone generator module). The system was tested according to the selected variable parameters, such as non-thermal plasma module power (5 to 25 W), ozone generator module power (28 to 52 W), and air flow rate (25 to 200  $\text{m}^3/\text{h}$ ), other parameters were kept constant.

After the experiment, the removal efficiency of volatile organic compounds was 92,80 percent (at 25 W power and 25  $\text{m}^3/\text{h}$  airflow rate) using a non-thermal plasma module and 74,44 percent (at 25 W and 25  $\text{m}^3/\text{h}$  air flow rate) using the ozonator module. The removal efficiency of separate terpene compounds was also determined:  $\alpha$ -Terpineol achieved 99,50 percent (with non-thermal plasma 25 W power and 25  $\text{m}^3/\text{h}$  air flow rate);  $\alpha$ -pinene 99.90 percent (with non-thermal plasma at 20 – 25 W, 25  $\text{m}^3/\text{h}$  and ozonator at 41 – 52 W, 25  $\text{m}^3/\text{h}$ );  $\beta$ -pinene 99.90 percent (with non-thermal plasma at 15–25 W, 25  $\text{m}^3/\text{h}$  and 25 W and 50  $\text{m}^3/\text{h}$ ; with ozonator module at 41 W, 25  $\text{m}^3/\text{h}$  experimental conditions). Specific energy consumption values using the non-thermal module were 2.8 times lower than using the ozonator module. Non-thermal plasma technology is considered competitive due to the removal efficiency of volatile organic compounds in polluted air and relatively low energy consumption.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Santrumpų sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>10</b>
<b>1. Literatūros apžvalga .....</b>	<b>11</b>
1.1. Kvapą sukeltantys junginiai ir jų šaltiniai .....	11
1.1.1. Medienos pramonėje kvapą sukeliančios medžiagos .....	13
1.2. Lakiųjų organinių junginių poveikis žmogaus sveikatai ir aplinkai.....	14
1.3. Terpeno grupės junginiai .....	15
1.4. Pagrindinės į aplinką išsiskiriančių lakiųjų organinių junginių šalinimo technologijos .....	16
1.4.1. Lakiųjų organinių junginių šalinimas naudojant biofiltracijos technologiją.....	17
1.4.2. Lakiųjų organinių junginių šalinimas naudojant adsorbcijos technologiją .....	20
1.4.3. Lakiųjų organinių junginių šalinimas naudojant kondensacijos technologiją.....	21
1.4.4. Lakiųjų organinių junginių šalinimas naudojant kompleksines oro valymo sistemas .....	22
1.4.5. Lakiųjų organinių junginių šalinimas naudojant ne terminės plazmos technologiją .....	24
1.5. Lakiųjų organinių junginių šalinimui naudojamų technologijų palyginimas.....	27
1.6. Literatūros apžvalgos apibendrinimas .....	29
<b>2. Tyrimo metodika .....</b>	<b>31</b>
2.1. Eksperimento įrangos aprašymas .....	31
2.2. Eksperimentinis planas .....	32
2.3. LOJ ėminių ėmimo metodai .....	33
2.4. Mėginių paruošimas chromatografijos analizei.....	34
2.5. Chromatografijos analizei naudojamų metodų sąlygos.....	35
2.6. Duomenų analizės metodai.....	35
<b>3. Tyrimų rezultatai.....</b>	<b>36</b>
3.1. Lakiųjų organinių junginių šalinimo efektyvumas .....	36
3.2. Terpenų šalinimo efektyvumas.....	40
3.2.1. $\alpha$ -Terpineolio šalinimo efektyvumas .....	41
3.2.2. $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumas .....	43
3.2.3. $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumas .....	45
3.2.4. Terpeno junginių šalinimo efektyvumo palyginimas .....	47
<b>Išvados .....</b>	<b>50</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>51</b>

## Lentelių sąrašas

1 lentelė. Kvapą sukeltantys junginiai [20].	13
2 lentelė. Lakiųjų organinių junginių šalinimo technologijų palyginimai [47].	27
3 lentelė. Tyrimo planas naudojant NTP.	32
4 lentelė. Tyrimo planas naudojant ozonatorių.	33
5 lentelė. Kalibracinės kreivės duomenys	34
6 lentelė. LOJ šalinimo efektyvumo rezultatai esant skirtingoms sąlygoms, naudojant NTP.	36
7 lentelė. LOJ šalinimo efektyvumo rezultatai esant skirtingoms sąlygoms, naudojant ozonatorių.	37
8 lentelė. Pagal I ir II eksperimento planus gauti šalinimo efektyvumo ir SES rezultatai.	39
9 lentelė. $\alpha$ -Terpineolio šalinimo efektyvumo rezultatai esant skirtingoms sąlygoms, naudojant NTP.	41
10 lentelė. $\alpha$ -Terpineolio šalinimo efektyvumo rezultatai esant skirtingoms sąlygoms, naudojant ozonatorių.	42
11 lentelė. $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumo rezultatai esant skirtingoms sąlygoms, naudojant NTP.	43
12 lentelė. $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumo rezultatai esant skirtingoms sąlygoms, naudojant ozonatorių.	44
13 lentelė. $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumo rezultatai esant skirtingoms sąlygoms, naudojant NTP.	45
14 lentelė. $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumo rezultatai esant skirtingoms sąlygoms, naudojant ozonatorių.	46
15 lentelė. $\alpha$ -Terpineolio, $\alpha$ -pineno ir $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumo rezultatai esant 25 m <sup>3</sup> /h oro srautui naudojant NTP ir ozonatorių.	47

## Paveikslų sąrašas

1 pav. Visi mobilūs, stacionarūs, teritoriniai ir natūralūs šaltiniai skleidžiantys taršą [10].	11
2 pav. LOJ išskyrimas ir poveikis žmogaus sveikatai [23].	15
3 pav. LOJ emisijų mažinimo būdai [29].	17
4 pav. Tipiškas biofiltravimo įrenginio scheminis brėžinys [33].	18
5 pav. Adsorbcijos sistema LOJ šalinimui [39].	20
6 pav. Kondensatoriaus principinė sistema [41].	21
7 pav. DFPO proceso schema [43].	23
8 pav. NTP pavyzdžio demonstracija [4].	25
9 pav. Plazmos reaktoriaus schema [52].	26
10 pav. LOJ užteršto oro apdorojimo įrenginys	31
11 pav. LOJ ėminių ėmimui skirtas sorbcinis vamzdelis.	33
12 pav. Ryšys tarp LOJ šalinimo efektyvumo ir NTP galios esant skirtingiems oro srautams (25 – 200 m <sup>3</sup> /h).	36
13 pav. Ryšys tarp LOJ šalinimo efektyvumo ir ozonatoriaus galios esant skirtingiems oro srautams (25 – 200 m <sup>3</sup> /h).	38
14 pav. LOJ šalinimo efektyvumo palyginimas su NTP ir ozonatoriaus galiomis esant įvairioms SES vertėms.	40
15 pav. Ryšys tarp $\alpha$ -Terpineolio šalinimo efektyvumo ir NTP galios, esant skirtingiems oro srautams (25 – 200 m <sup>3</sup> /h).	41
16 pav. Ryšys tarp $\alpha$ -Terpineolio šalinimo efektyvumo ir ozonatoriaus galios, esant skirtingiems oro srautams (25 – 200 m <sup>3</sup> /h).	42
17 pav. Ryšys tarp $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumo ir NTP galios, esant skirtingiems oro srautams (25 – 200 m <sup>3</sup> /h).	43
18 pav. Ryšys tarp $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumo ir ozonatoriaus galios, esant skirtingiems oro srautams (25 – 200 m <sup>3</sup> /h).	44
19 pav. Ryšys tarp $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumo ir ozonatoriaus galios, esant skirtingiems oro srautams (25 – 200 m <sup>3</sup> /h).	45
20 pav. Ryšys tarp $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumo ir ozonatoriaus galios, esant skirtingiems oro srautams (25 – 200 m <sup>3</sup> /h).	46
21 pav. Ryšys tarp $\alpha$ -terpineolio, $\alpha$ -pineno ir $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumo ir NTP galios, esant 25 m <sup>3</sup> /h oro srautui.	48
22 pav. Ryšys tarp $\alpha$ -terpineolio, $\alpha$ -pineno ir $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumo ir ozonatoriaus galios, esant 25 m <sup>3</sup> /h oro srautui.	48



## Santrumpų sąrašas

AOA – antrinis organinis aerosolis

DBD – dielektrinio barjero iškrova

DFPO – dujų fazės pažangioji oksidacija

FID – liepsnos jonizacijos detektorius

GC – dujų chromatografija

LOJ – lakūs organiniai junginiai

NTP – ne terminė plazma

PTFE – politetrafluoretilenas

SES – savitosios energijos suvartojimas

UV – ultravioletiniai spinduliai

## Įvadas

Vystantis pramonei vis labiau didėja aplinkos tarša. Į atmosferą išmetami kvapą sukeliantys teršalai laikomi svarbia aplinkos užterštumo problema [1]. Lakiųjų organiniai junginiai (LOJ), tai ore esančios dujų fazės, toksiški atmosferos teršalai, kurie skleidžią nemalonų kvapą ir gali sukelti neigiamą poveikį aplinkos kokybei ir žmogaus sveikatai [2]. Tiesioginis šių junginių poveikis gali neigiamai paveikti kvėpavimo, kraujotakos bei nervinę sistemą, įskaitant alergiją, astmą ir net leukemiją [3].

Dažniausiai LOJ yra išmetami įvairiose pramonės šakose ar žmogaus veiklos procesuose [4]. Pramonėje LOJ išmetami iš stacionarių pramonės šaltinių, paprastai susijusių su medienos pramone, transporto priemonių gamyba, elektronine gamyba ir kt. [3]. Pramoninio proceso metu išmetamo oro ar dujų valymas yra viena iš perspektyviausių galimybių sumažinti išmetamų teršalų kiekį ir pagerinti aplinkos kokybę [4].

Mediena yra viena iš svarbiausių gamtos išteklių, kuri plačiai naudojama pramonėje, todėl pastaruoju metu medienos perdirbimas tapo aktualus aplinkosauginiu atžvilgiu [5]. Standartinių medžio drožlių ar plokščių gamybos metu į aplinką patenka LOJ, iš kurių daugelis pasižymi kvapniosiomis savybėmis [6]. Terpenai yra natūraliai minkštoje medienoje esantys LOJ, daugiausia išsiskiriantys gamybos procesu metu. Viena didžiausių terpenus skleidžiančių medienos rūšių yra pušis, kurioje aptinkami tokie junginiai kaip  $\alpha$ -pinenas,  $\beta$ -pinenas, linolenas,  $\alpha$ -terpineolis ir kt. [7].

Vienas iš metodų oro taršos kontrolei vykdyti yra ne terminės plazmos (NTP) technologijos naudojimas. Šis metodas yra veiksmingas siekiant pašalinti LOJ iš dujų srauto. NTP technologija pasižymi konkurencinga technologijos įrengimo ir eksploatacijos kaina. Šios technologijos trūkumai, kad naudojant ją yra tikimybė susidaryti nepageidaujamiems šalutiniams produktams ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  ir  $\text{O}_3$ ), taip pat yra mažas energijos efektyvumas bei prastesnis produktų selektyvumas. Tačiau NTP technologija turi didelį potencialą pramoniniuose procesuose, kuriuose šilumą naudoti nėra patogu [8].

Mano magistriniame baigiamajame projekte yra pritaikyta daugiapakopė dujų ir dalelių konvertavimo sistema LOJ šalinimui iš medienos apdorojimo operacijų. Sistema sudaryta iš kelių pakopų: ozonolizę, fotolizę, aerozolių aglomeraciją bei dalelių nusodinimo elektrostatiniame lauke. Tokios sistemos taikymas gali turėti didelį LOJ šalinimo efektyvumą esant santykinai mažoms energijos sąnaudoms.

**Darbo tikslas** – ištirti pažangiosios oksidacijos principais paremtą lakiųjų organinių junginių šalinimo technologiją.

**Darbo objektas** – pažangiosios oksidacijos lakiųjų organinių junginių šalinimo technologija

**Darbo uždaviniai:**

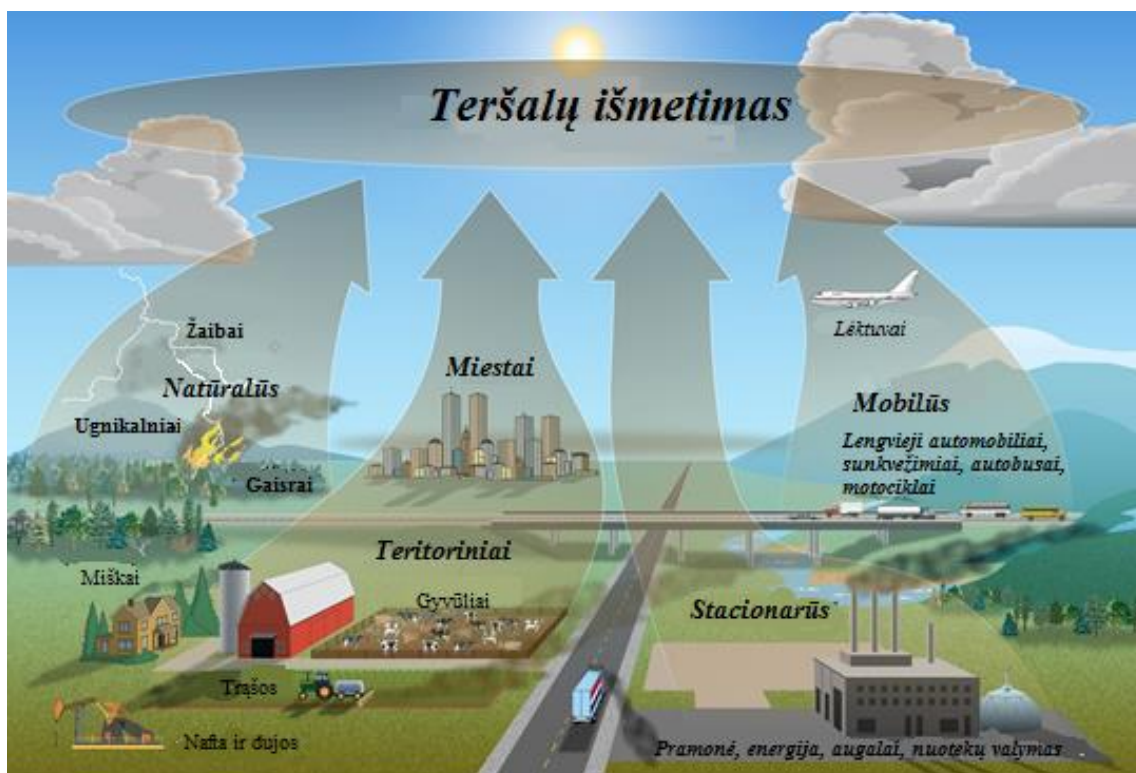
1. Kvapą sukeliančių lakiųjų organinių junginių ir jų šalinimo technologijų apžvalga;
2. Parengti lakiųjų organinių junginių ėminių ėmimo metodiką ir sudaryti tyrimo planą;
3. Įvertinti lakiųjų organinių junginių šalinimo efektyvumą taikant ne terminės plazmos ir ozonatoriaus modulius;
4. Nustatyti tiriamajame tirpale esančių terpeno grupės junginių šalinimo efektyvumo priklausomybę nuo proceso parametrų.

## 1. Literatūros apžvalga

Kvapas, susijęs su nemaloniais pojūčiais, laikomas svarbia aplinkos taršos problema. Didesnis industrializavimasis ir žmonių supratimas apie švarią aplinką atkreipė dėmesį į kvapą kaip į aplinką. Todėl norint išlaikyti aplinkos kokybę, būtina stengtis sumažinti kvapų problemas. Taigi šios problemos supratimas ir kvapų kilmė bei pasklidimas, jų mažinimo ir nustatymo metodai yra labai svarbūs kvapo taršos aplinkoje aspektai [9].

### 1.1. Kvapą sukeliantys junginiai ir jų šaltiniai

Yra įvairių taršos šaltinių, kurie prisideda prie kvapo skleidimo aplinkoje, kuriuos galima matyti 1 paveikslėlyje. Vienas iš dažniausiai aplinkoje sutinkamų šaltinių – mobilūs, kuriems priklauso lėktuvai, lengvieji automobiliai, sunkvežimiai, autobusai bei kitos transporto priemonės. Kita grupė – stacionarūs šaltiniai, kuriems priklauso pramonė, energija, augalai, nuotekų valymas. Teritoriniai šaltiniai, tai miestai bei gyvenamosios ūkinės teritorijos, o prie natūralių taršos šaltinių prisideda žaibai, ugnikalniai bei gaisrai.



1 pav. Visi mobilūs, stacionarūs, teritoriniai ir natūralūs šaltiniai skleidžiantys taršą [10].

Kvapai aplinkos ir gyvenamosios aplinkos ore atsiranda dėl tam tikros ūkinės komercinės veiklos (pramonės įmonių, žemės ūkio veiklos, atliekų tvarkymo, automobilių transporto išmetamųjų dujų, maisto gamybos, cheminių medžiagų naudojimo ir kt.), skleidžiančios į aplinką chemines medžiagas ar medžiagų mišinius, kuriems būdingi kvapai [10].

Dujiniai šaltiniai daro didelę įtaką atmosferos sudėties kitimui. Pagrindiniai antropogeniniai šaltiniai yra mobilūs ir stacionarūs degimo procesai. Dominuojanti junginių klasė, kur degant degalams, o ypač vykstant degimo procesams energijos gamybai ir kelių transportui, yra pagrindinis išmetamųjų teršalų šaltinis, vadinami lakiaisiais organiniais junginiais (LOJ) [11]. Juos galima rasti daugybėje produktų – dažuose, lakuose, dangų medžiagose, įvairiuose dezodorantuose, valymo skysčiuose. Taip

pat LOJ išsiskiria ir tam tikroje veikloje: maisto, alkoholio, baldų, popieriaus gamybos, farmacijos, tabako pramonėse bei dažymo procesuose. LOJ į aplinką išsiskiria, kai pramonėje naudojami įvairūs tirpikliai, skiedikliai, kvapieji ir aromatiniai priedai bei kiti preparatai [12].

Daugeliu atveju kvapų atsiradimo priežastimi aplinkoje tampa nepakankamas pažangių technologijų taikymas ūkinėje veikloje, išmetamo oro valymo įrenginių nebuvimas ar jų nenaudojimas, inžinerinių įrenginių nesandarios konstrukcijos, naudojimas ne pagal paskirtį, netinkamas statinių inžinerinių sistemų įrengimas (pvz. vėdinimo sistemų), taip pat įgaliotų institucijų nustatytų veiklų sąlygų nevykdymas [10]. Tam kad galėtume valdyti ir suvokti kvapų sudėtingumą, būtina žinoti, kokios komercinės, pramoninės veiklos sąlygoja nemalonių kvapų susidarymą.

Kvapai susidaro arba gali susidaryti cheminių, fizikinių, biologinių arba mikrobiologinių procesų metu dėl kelių pagrindinių veiklų:

- praktikuojamos gyvulininkystės;
- komunalinių įrenginių (sąvartynų, nuotekų valyklų) naudojimo;
- pramonės bei energetikos (ypatingai dėl nekvalifikuoto maisto pramonės ir verslo atliekų tvarkymo);
- medienos gamybos pramonės [13].

Laikantis aplinkosauginių reikalavimų, sąlygos plėtoti gyvulininkystę Lietuvoje yra palankios. Tačiau negalima pamiršti, kad gyvulininkystė yra svarbus aplinkos oro taršos šaltinis [14]. Svarbiausi oro teršalai yra kvapai, dujos, kietosios dalelės, mikroorganizmai ir endotoksinai, dar vadinami bioaeroliais, kurie išmetami į aplinką mėšlo laikymo, tvarkymo, šalinimo bei ganymo metu.

Įvairių rūšių gyvulių tvartuose kaupiasi amoniakas ( $\text{NH}_3$ ), anglies dvideginis ( $\text{CO}_2$ ), sieros vandenilis ( $\text{H}_2\text{S}$ ), metanas ( $\text{CH}_4$ ) ir dar daugiau kaip 130 skirtingų dujinių junginių, turinčių poveikį tvartuose gyvenančių gyvūnų kvėpavimo takams, bei juose dirbančių žmonių kvėpavimo takams [15].

Azotas, patenkantis į gyvulininkystės gamybos ciklą, yra dalinai fiksuojamas gyvuliniuose ir augaliniuose produktuose. Likutis patenka į aplinką daugiausia nitratų ( $\text{NO}_3^-$ ) ir amoniako ( $\text{NH}_3$ ), taip pat azoto ( $\text{N}_2$ ) ir jo suboksido ( $\text{N}_2\text{O}$ ) dujų pavidalu. Aplinkosauginiai reikalavimai verčia diegti ūkininkavimo sistemas, kuriose būtų laikomasi maisto medžiagų balanso t. y. minimalaus maisto medžiagų (N, P, K) patekimo į aplinką [16].

Taip pat vienas iš pagrindinių vaidmenų žmogaus gyvenime yra atliekų tvarkymas. Sąvartynas yra vienas iš svarbiausių kietų komunalinių atliekų šalinimo metodų. Nors jo aplinkoje LOJ kiekis yra mažas, dauguma LOJ yra kvapūs ir sukelia nemalonų poveikį aplinkai. Iš sąvartynų sklindančių kvapiųjų dujų pasiskirstymas aplinkoje, daro didelę įtaką aplinkinių gyventojų gyvenimo kokybei [17,18].

Nuotekų surinkimo ir valymo sistemos dažnai skleidžia nemalonus kvapus, kurie plinta į apylinkes ir sukelia žmonėms daug nepatogumų. Į nuotekų valymo įrenginius nuotekos keliauja iš gyvenamųjų vietų, komercinių bei pramoninių vietovių. Kvapai įprastai pasireiškia valymo metu po anaerobinio skilimo. Didžioji dalis išsiskiriančių ir nemalonų kvapą sukeliančių medžiagų yra sieros junginiai, dažniausiai vandenilio sulfidas ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Kiti sieros junginiai, kurių koncentracija yra šiek tiek mažesnė, taip pat gali sukelti nemalonų kvapą, tačiau jie aptinkami rečiau. Šie junginiai priklauso redukuotos sieros junginių šeimai, į kurią patenka metilo merkaptanas, dimetilsulfidas, dimetildisulfidas, anglies

disulfidas ir karbonilo sulfidas. Be sieros turinčių kvapiųjų junginių, kvapai gali būti aptinkami ir azoto pagrindu susidariusiais junginiais (amoniaku, amino junginių šeima, lakiais organiniais junginiais) [19].

Ryškiausia stacionarių išmetamųjų teršalų šaltiniai yra energijos gamybos ir gamybos pramonė [20].

**1 lentelė.** Kvapą sukeliantys junginiai [20].

<b>Pramonės šakos</b>	<b>Kvapą sukeliantys junginiai arba junginių grupė</b>
Teršalų valymo įmonės	Vandenilio sulfidas, sieros dioksidas, amoniakas, organinės rūgštys, angliavandeniliai, aldehydai
Neorganinės cheminės medžiagos (trašos, fosfatų gamyba ir kt.)	Amoniakas, aldehydai, vandenilio sulfidas, sieros dioksidas
Organinės chemijos pramonė (dažų pramonė, plastikai, muilas, plovikliai, tekstilė ir kt.)	Amoniakas, aldehydai, sieros organiniai dioksidai
Farmacijos pramonė	Aromatiniai aldehydai, fenolis, amoniakas ir kt.
Gumos, plastiko, stiklo pramonė	Azoto junginiai (aminai, oksidai), sieros oksidai, tirpikliai, aldehydai, ketonai, fenolis, alkoholiai ir kt.
Kompostavimo procesas	Amoniakas, kuriame yra sieros junginiai, terpenas, alkoholiai, aldehydai, esteris, ketonai, lakiosios riebalų rūgštys
Gyvūnų pašarų gamybos pramonė	Amoniakas, vandenilio sulfidas, alkoholis, aldehydai
Medienos pramonė	LOJ, Terpenų šiluminio skilimo produktai, Aldehydai, terpenai, acto ir skruzdžių rūgštys.

Didžioji dalis pramonės įmonių išskiria didžiulius kiekius kenksmingų, nemalonų kvapą sukeliančių junginių, kurie pateikti 1 lentelėje. Pavyzdžiui teršalų valymo įmonės išskiria vandenilio sulfidą, amoniaką, organines rūgštis bei aldehydus ir t.t. Dažų pramonė išskiria amoniaką bei aldehydus, farmacijos pramonė išskiria aromatinius aldehydus, bei fenolius. Viena iš pramonės sričių, kaip gyvūnų pašarų gamyba, pasižymi taip pat specifinį kvapą išskiriančiomis medžiagomis kaip amoniakas, vandenilio sulfidas, alkoholis bei aldehydai. Taip pat labai svarbi ir LOJ išskirianti pramonės sritis, tai medienos pramonė, kuri detaliau aptarta sekančiame poskyryje [20].

### **1.1.1. Medienos pramonėje kvapą sukeliančios medžiagos**

Medienos gamybos pramonė taip pat yra neatsiejamas oro taršos šaltinis. Medis yra vienas svarbiausių gamtos išteklių. Pasaulyje sunaudojama apie 1700 milijonų kubinių metrų medienos pramoniniam naudojimui. Komerciniams tikslams naudojama apie 1 000 skirtingų rūšių medienos, kurios pasižymi skirtingomis savybėmis, bei išskiria į aplinką skirtingas kvapą sukeliančias medžiagas. Standartinių medžio drožlių plokščių gamybos metu į aplinką patenka kietosios dalelės, kurios savyje turi lakiųjų organinių junginių, iš kurių daugelis pasižymi kvapiosiomis savybėmis. Dažniausiai gamybos procesas prasideda nuo žievės pašalinimo ir medienos smulkinimo iki reikiamo dydžio, o vėliau yra patalpinamos į būgnų džiovyklą, kad drėgmės kiekis sumažėtų iki norimo lygio. Kiekvienas etapas išskiria skirtingą kiekį kietųjų dalelių su LOJ. Didžioji dalis LOJ išskiria dėl medžio džiovinimo bei presavimo. Gerai žinoma, kad LOJ, susidarančių medienos džiovinimo metu, sudėtis priklauso nuo:

- apdorojamos medienos rūšies;
- džiovinimo tipo;
- džiovinimo temperatūros;
- sezono.

Džiovinimo metu LOJ sąrašą sudaro natūralios medienoje esančios organinės molekulės, tokios kaip terpenai, acto ir skruzdžių rūgštys, bei kiti įvairūs terpenų šiluminio skilimo produktai [21,22].

Mediena ir medienos kompozitai išskiria LOJ, kurie yra apibūdinami kaip junginiai, turintys virimo temperatūrą nuo 50 °C iki 260 °C. Tai yra gerai žinomi LOJ šaltiniai, kurie skiriasi teršalų kiekiu ir sudėtimi, priklausomai nuo medienos rūšies ir atitinkamo gamybos proceso. Pušies mediena yra vienas iš pagrindinių aldehido ir terpenų išmetimo šaltinių. Aldehydai yra antriniai LOJ ir atsiranda dėl nesočiųjų riebiųjų rūgščių oksidacijos, o terpenai yra natūralių minkštųjų medžių komponentai ir kilę iš medienos dervos. Gamybos procesai, tokie kaip medienos kompozitų džiovinimas ir presavimas, sukelia ir padidina LOJ (aldehidų ir terpenų) susidarymą medienos apdirbimo pramonėje [7,22].

## **1.2. Lakiųjų organinių junginių poveikis žmogaus sveikatai ir aplinkai**

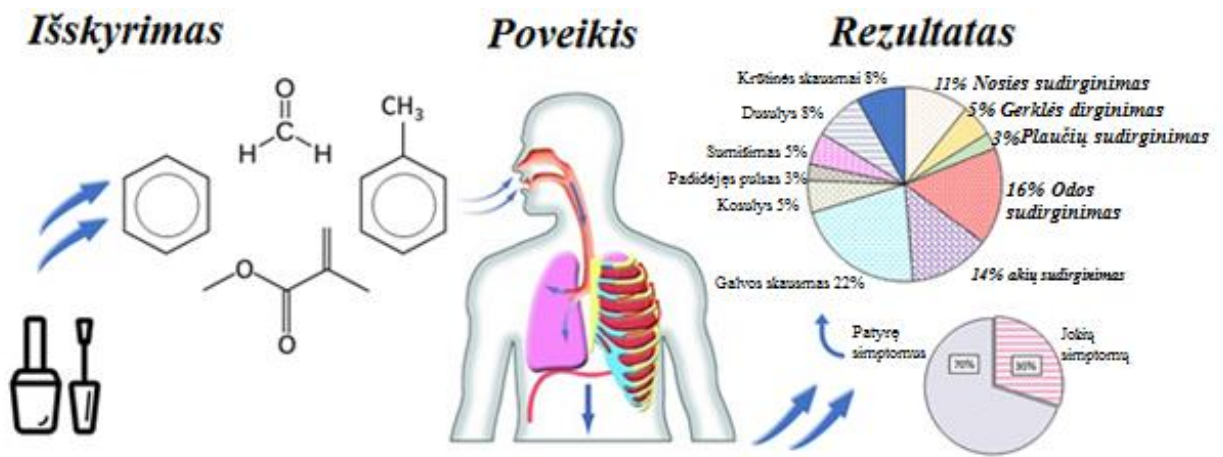
Nors nemažai fizinės veiklos rūšių į aplinką gali išmesti skirtingus teršalus, antropogeninė veikla yra pagrindinė aplinkos priežastis oro taršai. Pavojingos cheminės medžiagos gali į aplinką patekti atsitiktinai, tačiau daugiausia oro teršalų išsiskiria dėl pramoninių objektų bei kitos ūkinės veiklos, kuri gali sukelti neigiamą poveikį žmonių sveikatai ir aplinkai. Oro teršalai gali būti suskirstyti į keturias pagrindines kategorijas:

1. dujiniai teršalai (pvz., SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, ozonas, LOJ);
2. patvarūs organiniai teršalai (pvz., Dioksinai);
3. sunkieji metalai (pvz., Švinas, gyvsidabris);
4. kietosios (aerolio) dalelės [11].

LOJ sudaro svarbią cheminių medžiagų grupę, kurie kambario temperatūroje lengvai išgaruoja ir yra lakūs. Kai kurie iš jų gali sukelti trumpalaikį ir ilgalaikį neigiamą poveikį sveikatai. Įrodyta, kad kai kurie LOJ sukelia vėžį gyvūnams, o kai kurie iš jų (benzenas, toluenas) įtariami ar žinomi sukeliantys vėžį žmonėms, net esant labai mažai koncentracijai [23].

Nuolatinis kvėpavimas užterštu oru yra pagrindinis veiksnys, kuris sutrikdo plaučių audinių ir imuninės sistemos veiklą. Dažniausiai pasireiškiantis neigiamas poveikis žmonių sveikatai:

- akių, nosies ir gerklės sudirginimas;
- dusulys, astmos priepuoliai;
- plaučių vėžys;
- vystymosi sutrikimai;
- galvos skausmas;
- alerginė odos reakcija;
- pykinimas, nuovargis ir išsekimas;
- vidaus organų (inkstų, kepenų) ir centrinės nervų sistemos pažeidimas;
- pykinimas, vėmimas.



2 pav. LOJ išskyrimas ir poveikis žmogaus sveikatai [23].

Žmonės gali būti paveikti teršalų įkvėpus, nurijus arba per lytėjimą. LOJ išskyrimo, poveikio ir rezultatų kelias žmogaus sveikatai pateiktas 2 paveikslėlyje. Net 70 proc. žmonių patiria LOJ poveikį sveikatai, kur pagal tyrimus įrodyta, jog 22 proc. LOJ išsiskyrimo sukelia galvos skausmą, taip pat didelė dalis sukelia akių (14 proc.) bei odos (16 proc.) sudirginimą ar jautrumą [12,23].

LOJ ir juos išskiriančių šaltinių yra labai daug, todėl nėra ištirtas jų visų poveikis žmogaus organizmui. Daugelis tyrimų daryta tiriant pavienių LOJ poveikį žmogaus organizmui. Mažiau žinoma apie kombinacinių cheminių medžiagų pavojų. Dažniausiai serga: vaikai ar pagyvenusio amžiaus žmonės, kūdikiai, taip pat žmonės, kurie turi su kvėpavimo organais susijusių problemų ar tie, kurie yra jautresni cheminėms medžiagoms. Geriausios priemonės apsaugoti nuo LOJ užteršto oro:

- labiau riboti produktų naudojimą, kurie į aplinką išskiria šiuos junginius;
- naudoti oro valymo įrenginius;
- naudoti kvėpavimo takų apsaugines priemones [24].

Šie į aplinką išsiskiriantys junginiai yra vienas iš veiksnių, prisidedančių prie epizodinio ozono susidarymo. Ozonas aukštesniuose sluoksniuose naudingas, nes padeda žmonėms apsaugoti nuo pavojingų ultravioletinių saulės spindulių, tačiau žemiau esantis ozonas laikomas oro teršalu, kuris gali sukelti didelį diskomfortą. Ozono teršalus sudėtinga sukontroliuoti, kadangi nėra išmetami kaip kiti teršalai, o faktiškai susidaro atmosferoje dėl fotocheminių procesų. Fotocheminių procesų metu LOJ reaguoja su azoto oksidais ir saulės šviesa, dėl šios priežasties susidaro požeminis ozonas. Kvėpuojant tokiu oru kai jo koncentracija yra didesnė nei leistina susiduriama su įvairiomis kvėpavimo ligomis [12].

### 1.3. Terpeno grupės junginiai

Terpenai yra didžiausia augalų antrinių metabolitų junginių grupė, priskiriami LOJ. Šiai antrinių metabolitų grupei priklauso apie 30000 – 40000 būdingų cheminę struktūrą turinčių junginių, dažnai aptinkamų pramonės srityse [7].

Terpenai, kaip pagrindinis LOJ taršos šaltinis yra medienos apdirbimo pramonėje, kurie randami natūraliai, minkštoje medienoje. Medienos pramonėje dažniausiai aptinkami terpenai yra  $\alpha$ -pinenas,  $\beta$ -pinenas,  $\alpha$ -terpineolis, 3-karcas, linonenas [7,22].

Vienas pagrindinių medienoje aptinkamų terpenų yra  $\alpha$ -pinenas, kuris sudaro 20 – 90 proc. [7].  $\alpha$ -pinenas yra organinis terpeno klasės junginys, alkenas, kuriame yra reaktyvūs keturių narių žiedai. Atmosferoje,  $\alpha$ -pinenas reaguoja su ozonu, hidroksilo radikalu arba NO<sub>3</sub> radikalu, dėl kurio susidaro mažo lakumo rūšys, kurios iš dalies kondensuojasi ir taip sukuria antrinius organinius junginius [25].

Terpenai ir yra vieni iš tipišku lakiųjų teršalų, dažniausiai atsirandantys džiovinimo ar presavimo metu medienos pramonėje. Didžiausias terpenų teršalų kiekis tikėtinas gaminant greitus produktus, kaip lentas [7]. Iš spygliuočių medienos labiausiai paplitę LOJ yra  $\alpha$ -pinenas,  $\beta$ -pinenas ir 3-karcas. Tačiau iš pušų medienos išmetamų teršalų kiekis yra žymiai didesnis. Dominuojantys iš pušies išsiskiriantys terpenai yra  $\alpha$ -pinenas ir  $\alpha$ -terpineolis [26].

Pušies mediena yra plačiausiai naudojama kaip žaliava statybiniam elementams. Laikui bėgant, terpenų išmetimas iš minkštos medienos mažėja, priklausomai nuo jos išbuvimo laiko patalpoje. LOJ koncentracijai medienos pramonėje įtakos gali turėti ir išoriniai veiksniai, kaip temperatūra, santykinė drėgmė, oro mainų greitis, medienos paviršiaus plotas.

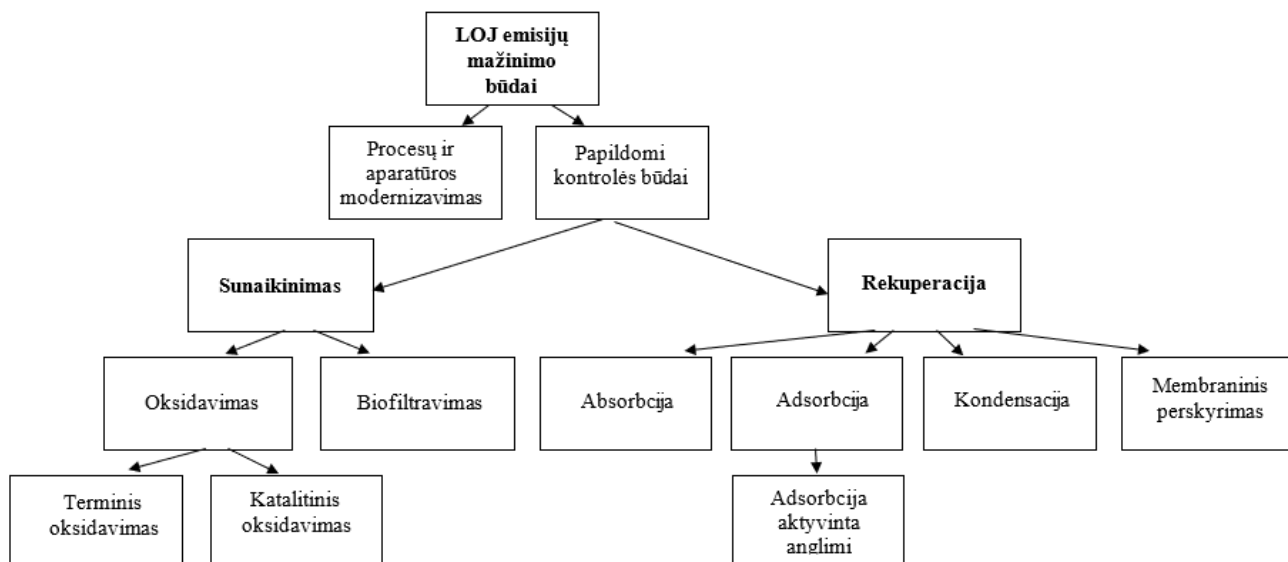
$\alpha$ -pinenas ir  $\beta$ -pinenas yra reprezentatyviausios ir gausiausios rūšys bei labiausiai susijusios su antrinių organinių aerosolių (AOA) susidarymu. Pinenų reakcijos su OH/O<sub>3</sub>/NO<sub>3</sub> sukelia žemesnes lakiąsias rūšis, kurios kaip nustatyta yra AOA pirmtakai [27].  $\alpha$ -pinenas yra biologiškai prieinamas ir 60 proc. absorbuojamas plaučiuose, greitai metabolizuojamas [28].

#### **1.4. Pagrindinės į aplinką išsiskiriančių lakiųjų organinių junginių šalinimo technologijos**

Daugelyje pramonės šakų siekiant sumažinti taršos efektyvumą, stengiamasi LOJ turinčias medžiagas, pakeisti kitais produktais. Tačiau ne visuose gamybos ar vartojimui paruoštuose produktuose galima išvengti LOJ naudojimo. Pramonėje LOJ išmetamų teršalų kiekiui kontroliuoti galima naudoti daugybę skirtingų metodų, kurie pateikti 3 paveikslėlyje. Šie metodai iš esmės yra suskirstyti į dvi skirtingas grupes:

- I) Proceso modifikavimo grupė, kur LOJ išmetimų kontrolė pasiekama modifikuojant proceso įrangą, žaliavas ir (arba) keičiant procesą.
- II) Papildomų kontrolės būdų grupė, kur siekiant reguliuoti išmetamų teršalų kiekį taikomi papildomi kontrolės metodai [29].





3 pav. LOJ emisijų mažinimo būdai [29].

Kai negalima išvengti LOJ naudojimo produktuose, tuomet naudojami kiti šalinimo būdai, kurie skirstomi į rekuperacinius ir sunaikinančius. Rekuperaciniai būdai apima absorbciją, adsorbiciją, kondensaciją bei membranis perskyrimą ir yra taikomi tuomet, kai LOJ koncentracija yra didelė ir iš ištakų galima išgauti grynas pradines medžiagas. Esant mažesnėms išmetamų kenksmingų medžiagų koncentracijoms, jas tikslinga suskaidyti, t.y. paversti nekenksmingais junginiais. Suskaidymas yra skirstomas į oksidavimą bei biofiltravimą, o pats oksidavimo procesas į terminį bei katalitinį oksidavimą [29,30].

#### 1.4.1. Lakiųjų organinių junginių šalinimas naudojant biofiltracijos technologiją

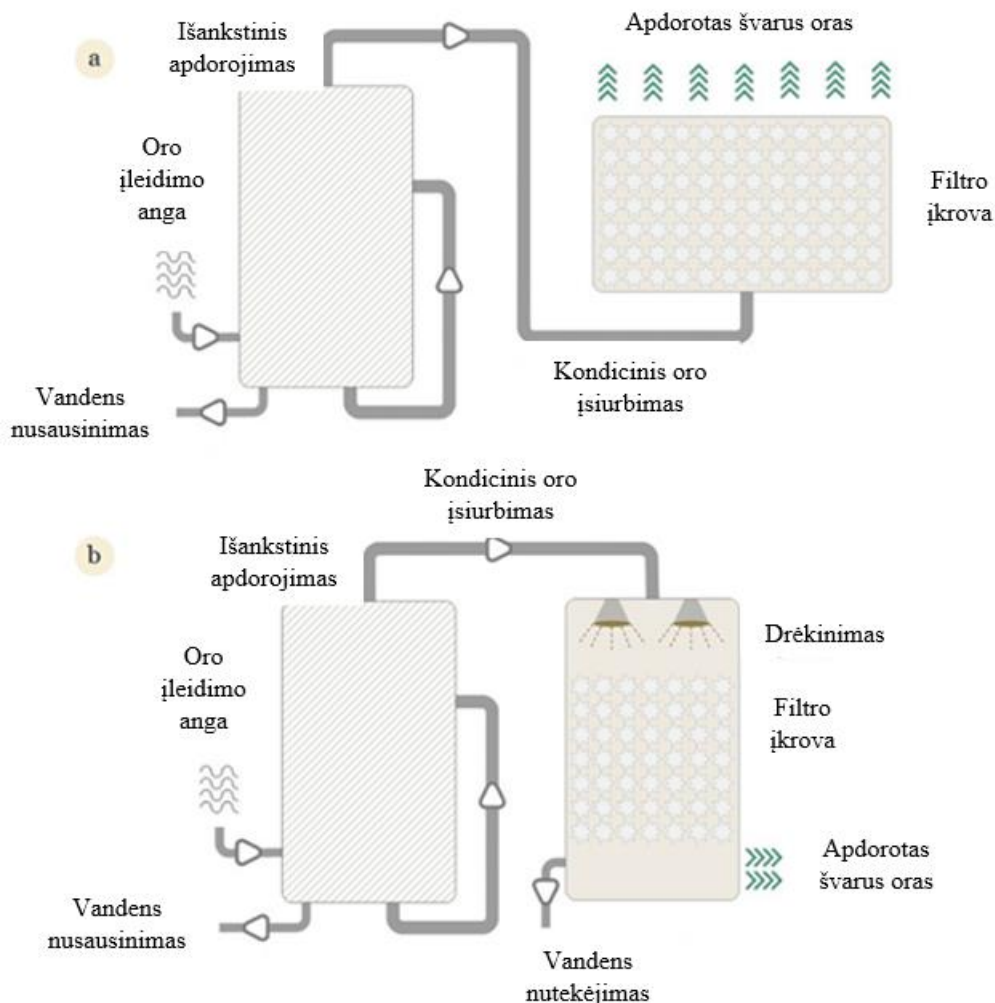
Biofiltracija yra sėkmingai naudojama norint kontroliuoti kvapus, tiek organinius, tiek neorganinius oro teršalus, kurie toksiški žmonėms (oro toksinai), taip pat LOJ iš įvairių pramonės ir viešojo sektoriaus šaltinių [31]. Biofiltracija laikoma palankia sistema, dėl mažų eksploatacinių išlaidų, ir jų gebėjimo pašalinti didelius išmetamųjų dujų srautus, turinčius mažą lakiųjų organinių junginių koncentraciją [32].

Biofiltrą oro teršalams kontroliuoti dažniausiai sudaro viena ar kelios biologiškai aktyvių medžiagų įkrovos, dažniausiai durpių, komposto ar dirvožemio mišiniai. Palaikymas mikrobu augimui daro biofiltrinį sluoksnį kaip pagrindinį biofiltravimo proceso pagrindą. Tam kad būtų idealus biofiltro sluoksnis:

1. mikrobiologinio bioplėvelės vystymui ir dujų–bioplėvelės masės perdavimui turėtų būti taikomas didelis savitasis paviršiaus plotas;
2. tam, kad būtų galima paskirstyti dujas, reikalingas aukštas poringumas;
3. turi būti gera vandens sulaikymo geba, kad būtų išvengiama džiovavimo įkrovoje;
4. turi būti vidinių maistinių medžiagų;
5. reikalinga tanki ir įvairi vietinė mikroflora [31].

Paprastai egzistuoja dviejų biofiltrų konfigūracijos, kurios pateiktos 4 paveikslėlyje. 4a konfigūracija parodo atidaromus biofiltrus, kuriuose dujos kyla į viršų. Šie biofiltrai dažniausiai yra įrengiami lauke, dėl didelių erdvės poreikių ir nėra apsaugotos nuo klimato sąlygų. 4b paveikslėlyje

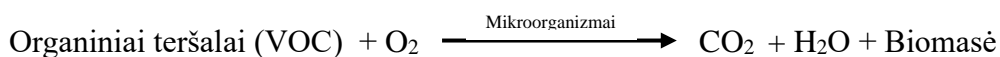
pavaizduotas uždaras biofiltras, kuriam reikia mažiau vietos ir yra sumontuojamas uždaroje patalpoje. Dujų srautas į filtrą gali būti perduodamas kylančia arba žemėjančia kryptimi.



4 pav. Tipiškas biofiltravimo įrenginio scheminis brėžinys [33].

Pagrindinis biofiltro projektavimo veiksnys yra oro srautas, kuris turėtų būti apskaičiuojamas vienam biofiltro paviršiau ploto vienetui. Dujos pernešamos pro biofiltrą kuriame yra drėgnų organinių ar inertinių medžiagų todėl, kvapieji junginiai biologiškai suskaidomi. Įprastai drėkinamas oras patenka į įkrovos filtravimo įrenginį [33].

Galutiniai produktai po visiško oro teršalų biologinio suskaidymo yra CO<sub>2</sub>, vanduo ir mikrobu biomasa. Biologinio skilimo procesas vyksta oksidacijos būdų ir gali būti aprašytas taip [31]:



Vandens kiekis terpėse yra vienas iš svarbiausių veiksnių, turinčių įtakos biofiltruose. Taip pat vienas iš veiksnių, turinčių įtakos biofiltrų veikimui yra temperatūra.

Optimali temperatūra yra diapazone nuo 20 iki 30°C. Kai kuriais atvejais padidėjusi temperatūra padidina biologinį skaidymą. Taip pat ne ką mažiau svarbus veiksnys yra pH pusiausvyra, kur idealus pH biofiltrų procesui yra nuo 7,8 iki 8.

Egzistuoja dviejų tipų biofiltrai, kurie paprastai naudojami LOJ apdorojimui:

- atviro projektavimo biofiltras su kylančiais dujų srautais, sumontuojamas už LOJ generuojančių įrenginių ribų. Šiems reaktoriams reikia didelių plotų ir jie taip pat yra veikiami klimato pokyčių.
- uždaroje patalpose montuojami uždaro tipo biofiltrai su kylančiais arba mažėjančiais dujų srautais. Šiems reaktoriams reikia mažiau vietos nei atviros konfigūracijos. Užterštos dujos pasklinda biofiltre ir adsorbuojamos ant bioplėvelės. Energija ir metaboliniai šalutiniai produktai yra CO<sub>2</sub> ir H<sub>2</sub>O.

Biofilto veikimas yra vertinamas atsižvelgiant į šalinimo efektyvumą (RE%) ir filtravimo sluoksnio pašalinimo talpą (EC, g/m<sup>3</sup>, h), pateikiamos skaičiavimo formulės:

$$RE = \frac{c_{gi} - c_{go}}{c_{gi}} \cdot 100 \quad (1)$$

$$ILR = \frac{Q(c_{gi})}{V} \quad (2)$$

$$EC = \frac{Q(c_{gi} - c_{go})}{V} \quad (3)$$

*Kur:*

*C<sub>gi</sub>* = įleidimo angos koncentracija biofiltre, g/m<sup>3</sup>;

*C<sub>go</sub>* = išleidimo angos koncentracija biofiltre, g/m<sup>3</sup>;

*ILR* = įleidimo greitis, g/m<sup>3</sup>, h;

*EC* = pašalinimo pajėgumas, g/m<sup>3</sup>, h;

*V* = filtro sluoksnio tūris, m<sup>3</sup>;

*Q* = Tūrinis dujų srautas, m<sup>3</sup>/h;

Biofiltracijos technologijos privalumai:

- Mažos pradinės investicijos;
- Ardo įvairius junginius, turinčius skirtingą koncentraciją;
- Lengva valdyti ir prižiūrėti;
- Nesusidaro nereikalingi atliekų srautai;
- Biofiltracija yra pakankamai universali kvapams, toksiškiems junginiams ir LOJ apdorojimui;
- Šių sudedamųjų dalių apdorojimo efektyvumas yra didesnis nei 90%, kai yra nedidelė teršalų koncentracija (<1000ppm).

Biofiltracijos technologijos trūkumai:

- Mažesnis apdorojimo efektyvumas esant didesnėms koncentracijoms;
- Ypač didelis bioreaktoriaus dydis sukelia apribojimus erdvėje;
- Reikia atidžiai kontroliuoti darbo sąlygas;
- Išmetamieji teršalai smarkiai svyruoja ir gali pakenkti biofilto mikrobo populiacijai ir bendram veikimui;
- Mikrobo populiacijos aklimatizacijos laikotarpis gali trukti savaites ar net mėnesius ypač šalinant LOJ teršalus [34].

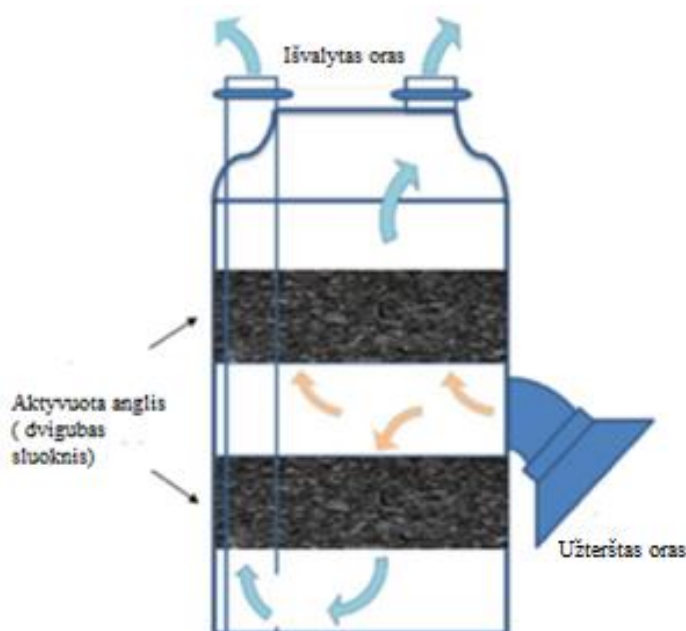
### 1.4.2. Lakiųjų organinių junginių šalinimas naudojant adsorbcijos technologiją

Adsorbcija yra paviršiaus reiškinys, kai kietas paviršius pritraukia dujų molekule ar skystą tirpalą. Adsorbuojanti kietą medžiagą yra vadinama adsorbentu (aktyvuota anglis), o adsorbuota dalelė - adsorbatu (oro teršalai). Kai dujos ar garai liečiasi su kietosiomis dalelėmis, kietosios dalelės adsorbuoja dalį dujų kompozicijos. Dujos / Kietas kontaktinis paviršius vadinamas adsorbatu.

Daugybė organinių ir neorganinių teršalų pašalinami tiek iš dujinių, tiek iš skystųjų tirpalų natūraliu adsorbcijos būdu labai poringoje vidutinėje, kietoje fazėje su dideliais vidiniais paviršiais [35]. Adsorbcija paprastai vyksta fiksuotoje ar suskystintoje medžiagoje, tokioje kaip aktyvuota anglis ar ceolitas ir yra efektyviausia mažos koncentracijos garams apdoroti [36]. Adsorbatai gali prisitvirtinti prie paviršių dviem būdais: 1) pirmu atveju adsorbentai prisitvirtina prie kietos terpės silpnomis van der Waalso jėgomis, tačiau 2) antru atveju adsorbentai prilimpa prie kietos terpės, sudarydami cheminę ryšį tarp adsorbuotų medžiagų ir kietos terpės [35]. Adsorbcijos technologinį procesą sudaro adsorbentų sluoksnis (aktyvuota anglis, ceolitas, polimeras arba jų derinys) [37].

Aktyvuoti angliavandeniliai daugiausia naudojami kaip filtro medžiaga suskaidanti ore esančias užterštas dujas. Porėtos anglies pagrindo medžiagos pasižymi dideliu šiluminiu ir cheminiu stabilumu bei didelėmis adsorbcijos galimybėmis. Literatūroje pastebima, kad aktyviausiai panaudoti ir ištirti yra aktyvuotos anglies procesai. Yra įvairių sugeriamųjų įtaisų teršalams šalinti, tai būtų maišomosios talpyklos, statiniai maišytuvai, purškimo stulpeliai, tačiau dažniausiai LOJ šalinimui naudojami supakuoti stulpeliai [38].

Adsorbcijos sistemos paprastai sudaro statinės granuliuotų medžiagų įkrovos vertikaliuose cilindrinuose stulpeliuose. Viena iš adsorbcijos sistemų skirtų LOJ šalinimui pateikta 5 paveikslėlyje.



5 pav. Adsorbcijos sistema LOJ šalinimui [39].

Adsorbcijos sistemoje oro garai patenka į koloną, juda oro srauto kryptimi ir tęsiasi, kol išėjimo gale kvapas „prasiskverbia“. Jos efektyvumą labai riboja didelis drėgmės kiekis dėl kurių ir išsiskiria

kvapai. Yra trys pagrindiniai veiksniai kurie tiesiogiai lemia kvapiųjų medžiagų adsorbciją, tai paviršiaus plotas, porų struktūra ir paviršiaus cheminės funkcinės grupės. Taikant adsorbcijos technologiją galima pasiekti gana aukštą išvalymo efektyvumą, kuris priklausomai nuo modifikacijos svyruoja 90 - 99 proc. ribose [39].

Privalumai ir trūkumai naudojant adsorbcijos technologiją:

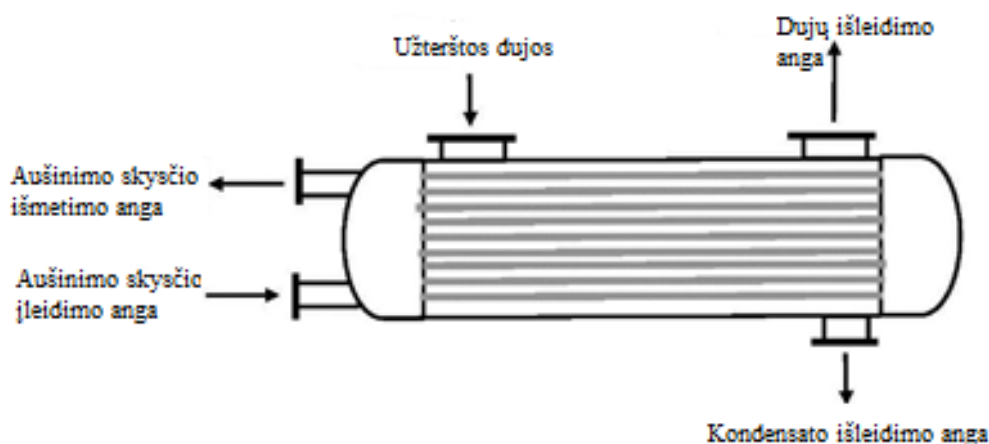
- LOJ adsorbcijai turi įtakos morfologija ir cheminės funkcinės adsorbentų grupės;
- Paprastai didelis paviršiaus plotas ir mažas porų dydis palengvina adsorbciją, o funkcinų grupių įtaka yra susijusi su LOJ poliškumu;
- LOJ savybės daro didelę įtaką jų adsorbcijai ant anglies turinčių medžiagų;
- Aukštos virimo temperatūros LOJ yra geriau adsorbuojami ant adsorbentų, nei žemos virimo temperatūros;
- Adsorbcijos sąlygos, tokios kaip temperatūra ir vandens garų kiekis, daro didelę įtaką LOJ adsorbcijai [40].

### 1.4.3. Lakiųjų organinių junginių šalinimas naudojant kondensacijos technologiją

Kondensacijos procesas, naudojamas visoje pramonėje, norint paversti dujas ar garus skysčiais. Bet kurias dujas galima paversti iki skysčio pakankamai žeminant temperatūrą (arba didinant slėgį). Įprasti pavyzdžiai gali būti įvairių angliavandenilių distiliavimas atliekant rafinavimą ir džiovinant orą. Ši technologija gali būti naudojama teršalų šalinimui iš dujų srauto, jei teršalų rasos taškas yra didesnis nei nešiklio. Medžiagų atskyrimą galima atlikti didinant slėgį (kompresinė kondensacija) arba žeminant temperatūrą, esant pastoviam slėgiui (kondensacija šaldant).

Šiuolaikinėje oro taršos kontrolės sistemose, kondensatoriai dažniausiai naudojami kaip pirminio apdorojimo įtaisai. Kondensatoriai gali būti naudojami priešais absorberius, adsorberius ir oksidatorius, siekiant sumažinti bendrą apdorotų dujų tūrį arba selektyviai siekiant pašalinti tam tikrus organinius junginius, kaip LOJ iš dujų srauto.

Dažniausiai pramonėje yra taikoma kondensatoriai, nes slėgio didinimo technika yra brangi. Jie veikia, kai šiltesnis garų srautas liečiasi su aušinimo terpe. Šiluma iš šiltų dujų perduodama į vėsesnę terpę. Kondensatoriaus principinė sistema pateikta 6 paveikslėlyje.



6 pav. Kondensatoriaus principinė sistema [41].

LOJ pradeda kondensuotis tada, kai jo dalinis slėgis yra lygus jo garų slėgiui. Pagrindinė reikalinga įranga: kondensatorius, šaldymo įrenginys ir papildomi aparatai. Kondensavimas labai tinka mažiems srautams, esant didelei koncentracijai (>2500 ppm). Jei LOJ turi aukštą užšalimo temperatūrą ant kondensatoriaus sienelių gali užšalti komponento dalelės, o tai sumažina šilumos perdavimą ir taip mažėja šalinimo efektyvumas [41].

LOJ kondensacijos technologija laikoma praktiniu metodu, kai dujų srautas yra mažas, o LOJ koncentracija šiuose srautuose yra pakankamai didelė. Kai dujų sraute yra tik vienas komponentas, kondensacijos technologija tampa patrauklesnė, nes nereikia teršalų papildomai apdoroti. Kai išmetamųjų dujų sraute yra daugiau nei vienas LOJ, kondensuotas produktas turi būti papildomai apdorojamas. Daugelyje standartinių kondensacijos procesų aušinimo proceso išlaidos yra nemažos [42].

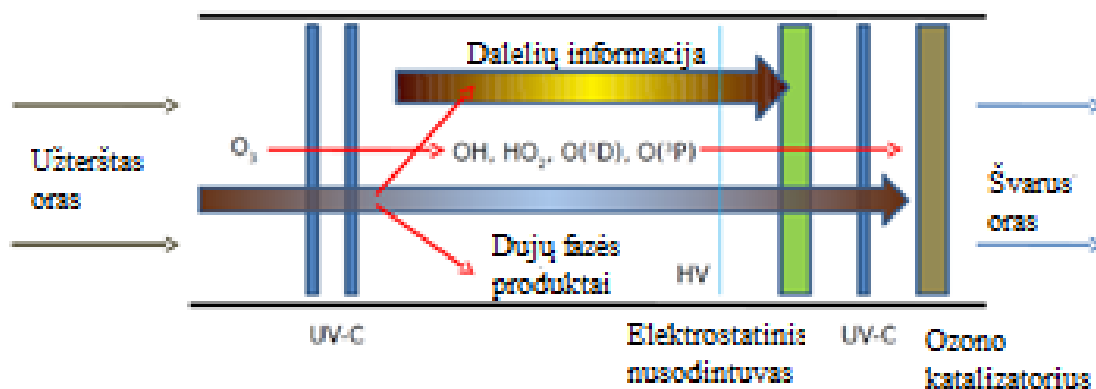
#### **1.4.4. Lakiųjų organinių junginių šalinimas naudojant kompleksines oro valymo sistemas**

Pažangios oksidacijos procesas plačiai naudojamas taršai pašalinti iš nuotekų. Hidroksilo radikalai, susidarantys *in situ*, naudojant ozono, vandenilio peroksido ir ultravioletinės (UV) šviesos derinį, gali būti naudojami organiniams (ir kai kuriems neorganiniams) teršalams skaidyti. Nors dauguma LOJ yra pašalinami iš atmosferos vykdant fotochemiškai valdomų laisvųjų radikalų grandinių reakcijų sekas, iki šiol pažangioji oksidacija nebuvo taikoma dujų fazės taršos srautams išmetamųjų teršalų kontrolei.

LOJ oksidacijos reakcijos vyksta pridėdant deguonį. Oksidacijos metu, LOJ paprastai pridėda stiprų karbonilo dipolį prie molekulės, sumažindamas garų slėgį ir padidindamas tirpumą. Suskaidžius susidaro mažesnės molekulinės masės produktai, tokie kaip HCHO, CO, CO<sub>2</sub> ir HCOOH. Oro oksidacijos metu susidarancio antrinio organinio aerozolio (AOA) išėiga atmosferoje labai skiriasi, atsižvelgiant į LOJ mišinį, santykinę drėgmę, temperatūrą ir oksidantus, AOA išėiga paprastai būna nuo 5 proc. iki 50 proc.. Šis procesas yra efektyvus energijos vartojimui ir yra veiksmingas įvairiems taršos lygiams, kai katalizė ir degimas nėra savaiminis.

Dujų fazės pažangios oksidacijos (DFPO) apžvalga:

DFPO proceso apžvalga pateikta 7 paveikslėlyje. Užterštas oras traukiamas arba išpučiamas į sistemą, kurioje pridėdama ozonas. Aerozolio dalelių paviršiaus plotas gali būti padidintas panaudojant vandens garus ir amoniaką tam, kad būtų geriau įsisavinamos dalelės. Tada naudojant ultravioletines (UV) fluorescencines lempas, fotochemiškai iš ozono susidaro radikalai. Pradinė reakcija su OH • yra daugumo teršalų greitį ribojantis žingsnis, sukeliantis oksidacijos kaskadą, kuriai padeda kiti sistemos oksidatoriai: O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> ir H<sub>2</sub>O.



7 pav. DFPO proceso schema [43].

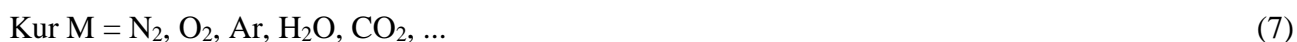
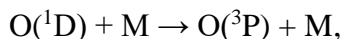
Ryšys su UV chromoforais gali būti fotolizuojamas, po to produktai gali būti oksiduojami, tuomet oras teka per vamzdelį, kurio pagrindinis tikslas sukurti dujų fazės chemiją ir leisti dalelėms augti kondensacijos būdu. AOA sudarytas tam tikru mastu iš didesnių pirminių LOJ, jo išeiga priklauso nuo įvairių kintamųjų, įskaitant santykinę drėgmę, LOJ mišinį ir jo oksidacijos laipsnį bei kondensacijos branduolių ir bazių, įskaitant aminos, buvimą. Dalelės pašalinamos filtru, o paskutiniame etape nesureagavęs ozonas pašalinamas prieš išvalytam orui paliekant sistemą.

Fotocheminis LOJ oksidavimas į AOA. Ozonas yra pigus reagentas, o šiuolaikiniai iškrovos generatoriai gali generuoti >1 mol ozono naudodami 1 kWh elektros energijos. Tačiau pats ozonas reaguoja lėtai arba visai nereaguoja į daugelį svarbių LOJ. Ozonas yra pradinis radikalios dujų fazės chemijos taškas.



Fotolizės greitis priklauso nuo lempos skleidžiamo spektro ir galios, oro pralaidumo, reaktoriaus geometrijos ir atspindžio; UV lempos sunaudoja apie 90 proc. DFPO energijos. Lempos efektyvumas kinta priklausomai nuo temperatūros ir vėjo greičio, o reaktoriaus medžiagos turėtų būti suderintos su UV spinduliais.

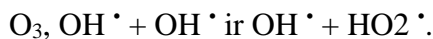
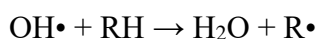
$O(^1D)$  yra labai reaktyvus:



5 reakcijos lygtyje deguonies atomas reaguoja su vandens garais, sudarydamas hidroksilo radikalus ( $OH \cdot$ ), kurie yra stiprūs oksidatoriai. Nors paprastai  $[H_2O] \gg [LOJ]$ , reakcija 6 taip pat sukuria hidroksilo radikalus, tuo pačiu skaidydama LOJ. Deguonies atomas reaguoja su molekuliniais deguonimi ir regeneruoja ozoną.



$OH \cdot$  išeiga tam tikram ozono ir UV šviesos kiekiui priklauso nuo konkurencijos tarp 5 ir 6 reakcijų, ir 7 reakcijos.  $OH \cdot$  reaguoja su ore esančiais LOJ.



Apibendrinant galima teigti, kad OH poveikis DFPO sistemoje priklauso nuo taršos apkrovos, ozono koncentracijos, santykinės drėgmės, lempos stiprio ir oro srauto greičio / buvimo laiko reakcijos kameroje.

DFPO rodo didelį potencialą efektyviai pašalinti įvairius teršalus, įskaitant sočiuosius ir nesočiuosius LOJ, aerozolio daleles ir ozoną. Metodas buvo išbandytas skirtingų angliavandenilių ir dalelių atžvilgiu.

Metodas yra toks, kad būtų naudinga suprojektuoti oro valymo įrenginius įvairiems teršalų scenarijams. Parametrai, kuriuos galima pakeisti siekiant optimizuoti našumą, yra išbuvimo laikas, švitinimas, ozono koncentracija ir santykinė drėgmė. Šie bandymai buvo atlikti naudojant gana dideles taršos apkrovas. Atsižvelgiant į cheminį gyvavimo laiką, kurį lemia demonstruojamos OH radikalų koncentracijos, DFPO taip pat bus taikomas mažesnėms teršalų koncentracijoms.

Proceso metu naudojamas ozonas ir UV - C šviesa, kad susidarytų *in situ* radikalai, kurie oksiduoja taršą, sukurdami daleles, kurios pašalinamos filtru; ozonas pašalinamas naudojant MnO<sub>2</sub> korio katalizatorių. Šis *in situ* procesų derinys pašalina daugybę teršalų, kurių savitoji energija yra palyginti maža. Procesui išbandyti ir optimizuoti buvo sukurti du koncepcijos įrodymo įtaisai. Laboratorijos prototipas buvo pastatytas iš standartinio vėdinimo kanalo ir galėjo veikti iki 850 m<sup>3</sup>/h. Nešiojamas nepertraukiamo srauto prototipas, pastatytas aliumininiame skrydžio korpuse, sugebėjo išlaikyti 46 m<sup>3</sup>/h greitį. Propano, cikloheksano, benzeno, izopreno, aerozolio dalelių masės ir ozono pašalinimo efektyvumas buvo didesnis kaip 95 proc., kai koncentracija buvo 0,4 – 6 ppm, o ekspozicijos trukmė - iki 0,5 min. Laboratorijos prototipas sukūrė OH • koncentraciją, gautą iš propano reakcijos (2,5 ± 0,3) × 10<sup>10</sup>cm<sup>-3</sup>, esant specifinei energijos išėigai 3 kJ/m<sup>3</sup>, o nešiojamąjį prietaisą (4,6 ± 0,4) × 10<sup>9</sup> cm<sup>-3</sup>, esant 10 kJ/m<sup>3</sup>. Remiantis šiais rezultatais, *in situ* vykstanti dujų fazės oksidacija yra perspektyvi daugelio LOJ šalinimui. Dujų fazės oksidacija gali suskaidyti junginius, kurie reaguoja su OH, ir kontroliuoti ozoną bei bendrą aerozolio dalelių masę. Priklausomai nuo pirminės taršos sudėties, gali susidaryti antrinė tarša, įskaitant formaldehidą ir ypač smulkias aerozolio daleles [43].

#### 1.4.5. Lakiųjų organinių junginių šalinimas naudojant ne terminės plazmos technologiją

Be jau minėtų kitų tradicinių šalinimo sistemų, naujausiomis technologijomis pagrįsta ne terminės plazmos technologija (NTP), kelia vis didesnę susidomėjimą oro taršos kontrolei vykdyti [8]. LOJ taršos mažinimui ir kontrolei reikalinga efektyvi ir nebrangi technologija. NTP metodas yra veiksmingas įvairių tipų pavojingų oro teršalų šalinimo būdas, palyginti su įprastomis technologijomis, dėl savo išskirtinių pranašumų, tokių kaip:

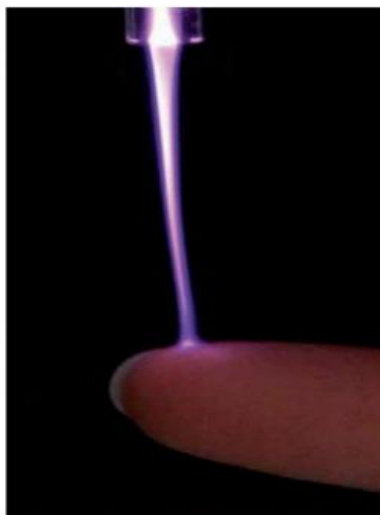
- Vidurinio sudėtingumo eksploatavimo sąlygų (aplinkos temperatūros ir slėgio)
- Mažos kainos ir kompaktiškos sistemos
- Plataus pritaikymo LOJ, turintiems mažą ir didelę koncentraciją [44].

Įsitvirtinusių dujų valymo technologijų metodai yra veiksmingi atsižvelgiant į teršalų pašalinimo lygį ir energijos suvartojimą. Katalitiniams procesams ir šiluminiam oksidavimui reikalinga aukšta temperatūra (1000°C). Greta daugelio technologijų įdiegimo, jas sunku pritaikyti procesuose,



kuriuose greitai keičiasi teršalų koncentracija ir dujų srautas. Priemonė įveikti bent pastarąją problemą yra NTP technologijos naudojimas [8] .

NTP dar vadinama „jonizuojančiomis dujomis“, tai mišri atomų, molekulių, jonų, elektronų ir radikalų būseną [45], kurie gali sąveikauti tarpusavyje, sukurdami „turingą“ ir reaktyvią plazmos aplinką. Tokios aktyvios rūšys gali skaidyti teršalus į mažiau kenksmingus produktus [44]. Plazmoje yra dvi būsenos, pusiausvyros ir ne pusiausvyros. Pusiausvyros būseną rodo, kad elektronų, jonų temperatūra beveik lygi, o fono dujos įkaista nuo kelių tūkstančių iki daugiau nei dešimties tūkstančių Kelvino laipsnių. Dėl šios priežasties plazmos pusiausvyros būseną vadinama „šilumine plazma“. Kita vertus ne pusiausvyros būseną reiškia, kad elektronų jonų ir neutralų temperatūra yra gana skirtinga ir elektronų temperatūra yra iš esmės aukštesnė nei kitų dalelių. Todėl fono dujų temperatūra yra gana maža ne pusiausvyros būsenoje, o tokia būseną vadinama „neterminė plazma“. 8 paveikslėlyje parodytas tipiškas neterminės plazmos pavyzdys. Šis paveikslas rodo, kad neterminės plazmos fono dujų temperatūra yra pakankamai žema, jog galima paliesti pirštu [45].



**8 pav.** NTP pavyzdžio demonstracija [4].

Įprastas būdas generuoti NTP yra pritaikyti elektrinį lauką neutralioms dujoms naudojant du elektrodus, iš kurių vienas yra prijungtas prie žemės, o kitas - prie aukštos įtampos šaltinio [46]. Tačiau NTP taikymą LOJ skaidymui riboja trys pagrindinės kliūtys:

- Prastesnis produktų selektyvumas;
- Nepageidaujamų šalutinių produktų (tokių kaip  $O_3$ ,  $NO_x$ , tarpinių LOJ ir aerosolių) susidarymas, kurie netgi padidina bendrą toksiškumą apdorotų dujų sraute;
- Mažas energijos efektyvumas [44].

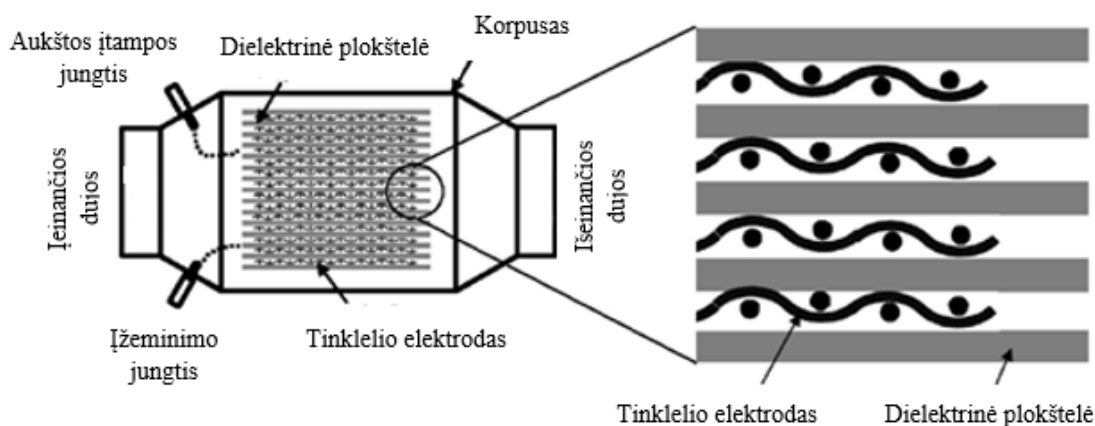
Paprastai NTP elektros iškrova susidaro suformavus pakankamai stiprų elektrinį lauką, t.y. panaudojus pakankamai didelę įtampą tarp dviejų elektrodų (iškrovos ir įžeminimo elektrodo) per kuriuos teka dujos. Taikoma įtampa daugiausia priklauso nuo tarpo tarp elektrodų, dielektrinių sluoksnių buvimo ir šalinamų dujų, tačiau įprastai ji svyruoja nuo 10 iki 30kV. Įdiegus pakankamai didelę įtampą, vyksta šie procesai: jonizacija, sužadinimas, molekulinė disociacija, krūvio perkėlimas, radikalų susidarymas ir jų rekombinacija.

Atsižvelgiant į dujų sudėtį, plazmos chemija skatina labai reaktyvių rūšių ir radikalų susidarymą. Toks procesas baigiasi per labai trumpą laiką (paprastai < 1ms) ir tai leidžia apriboti NTP reaktoriaus dydį. Jei LOJ užterštas oras yra drėgnas, tai susidaro hidroksilo (OH) radikalai ir O<sub>3</sub> [8].

Visgi NTP galima priskirti prie daug žadančių alternatyvių metodų siekiant pašalinti LOJ iš dujų srautų. Vietoj šiluminės energijos plazmą generuoja elektros energiją, taigi nereikia jokio išorinės šiluminės energijos [45]. LOJ skilimas su NTP yra plačiai tiriamas laboratorinėms sąlygoms ir nenaudojant katalizatorių. Vienas intensyviausiai tiriama LOJ yra toluenas (C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>), kurį sudaro benzeno žiedas su metilo grupe. Nustatyta, kad skilimo procesas prasideda vandenilio abstrakcija iš metilo grupės elektronų smūgių arba reakcija su hidroksilo radikalais. Ši reakcija vyksta žiedo turinčių junginių (pvz., benzaldehido arba benzenkarboksirūgšties) susidarymui.

Dauguma apžvalgų ir aukščiau paminėtų tyrimų atliekama laboratorijoje tiksliai apibrėžtomis sąlygomis. Šie tyrimai apima bendrą plazmos chemijos ir išmetimo raidos mechanizmų supratimą, kuris yra labai vertingas ir pageidautinas kuriant naujus procesus.

Vienas iš NTP panaudojimo eksperimentų buvo atliktas Estijoje, naftos skalūnų perdirbimo įmonėje. Eksperimentas buvo atliktas apeinant išmetimo kanalą pramoninio proceso metu. Norėdami ištirti bendrą plazmos chemiją ir įvertinti plazmos poveikį, jautri laboratorinė įranga buvo naudojama pramoninėje aplinkoje agresyviomis sąlygomis (dulkėtas oras, šiluma, drėgmė ir įrenginių bei prietaisų vibracija). Pagrindiniai eksperimentiniai nustatymai tai plazmos šaltinis, energijos tiekimas plazmai, energijai gaminti ir diagnostikos rinkinys, skirtas analizuoti dujų sudėtį ir plazmos šaltinio elektrinius parametrus. Dujų mėginiai buvo apdoroti plazmos šaltiniu, kuris pateiktas 9 paveikslėlyje.



9 pav. Plazmos reaktoriaus schema [52].

Reaktorius buvo sudarytas iš 50 elektrodų, pagamintų iš nerūdijančio plieno, kurie buvo atskirti vienas nuo kito dielektrinėmis plokštelėmis, pagamintomis iš flogotipo (magnio žėručių). Elektrodai pakaitomis buvo prijungti prie aukštos ir žemos įtampos. Taigi, plazma buvo suformuota statinio tūrio dielektrinio barjero iškrovos (DBD) reaktoriaus konfigūracija. Ši išleidimo konfigūracija buvo sumontuota ir uždaryta į nerūdijančio plieno korpusą, kuriame taip pat yra elektros jungtys ir dujų įleidimo ir išleidimo jungtys (100 mm skersmens) [8].

Įvadinę sistemos dalį sudaro vamzdis, sujungtas su pramoniniu procesu, ir antrasis vamzdis, skirtas orui maišyti su proceso dujomis. Prieš patekdamas į plazmos reaktorių, dujos praleido dulkių filtrą, kad apsaugotų eksperimentinę sistemą nuo dalelių. Po plazmos šaltinio dujos praėjo srauto matuoklį, praleido ventiliatorių / siurblių ir iš sistemos pasišalina per išleidimo angą.

Pagal išmatuotą plazmos įvedimo galią ir dujų srautą, per reaktorių buvo apskaičiuotas savitojo energijos suvartojimas (SES), kaip pateikta žemiau esančioje 9 formulėje. SES veikia kaip mastelio parametras vertinant teršalų konversiją ir plazmos energijos efektyvumą.

$$SES \left[ \frac{J}{L} \right] = \frac{\text{Įeinanti galia [W]} \cdot 3600}{\text{dujų srautas} \left[ \frac{L}{h} \right]} \quad (9)$$

Estijoje atliktu tyrimu buvo įrodyta, kad dujiniai teršalai gali būti suskaidomi su NTP net pramoninėmis sąlygomis. Kaip tikimasi veikiant NTP ore susidaro ozonas ir azoto oksidas. Įvairių procesų derinimas gali pagerinti bendrą valymo efektyvumą ir pritaikomumą. Energijos efektyvumo pagerinimo potencialą suteikia plazmos šaltinio geometrija ir dydis, kuriuos galima optimizuoti atsižvelgiant į specialiojo pramoninio proceso dujų srautą. Eksperimento metu buvo pasiektas 71 proc. (220 J/L) šalinimo efektyvumas butilacetatui bei 74 proc. stireno ir metanolio šalinimo efektyvumas (300 J/L). Didžioji dalis LOJ buvo iš dalies oksiduota į anglies monoksidą bei mažesniu mastu visiškai oksiduota iki anglies dioksido [8].

### 1.5. Lakiųjų organinių junginių šalinimui naudojamų technologijų palyginimas

Visus LOJ šalinimo metodus galima įvertinti atsižvelgiant į energijos vartojimo efektyvumą, priežiūros, įrenginio eksploatavimo išlaidas bei teršalų kontrolę. Kaip ir anksčiau buvo minėta, pramoniniai ir žemės ūkio išmetamųjų teršalų kontrolės būdai apima biofiltravimą, absorbciją, adsorbciją ir pažangiąją oksidaciją. Technologijų palyginimai pateikti 2 lentelėje [47].

2 lentelė. Lakiųjų organinių junginių šalinimo technologijų palyginimai [47].

Oro teršalų šalinimo technologija	Šalinimo efektyvumas procentais	Privalumai	Trūkumai (ribojimai)
Absorbcija /skruberis	90 – 98 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lengva prižiūrėti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fizikinės ir cheminės LOJ savybės turi įtakos pašalinimo efektyvumui.</li> <li>• Tinkamo tirpiklio suradimas</li> </ul>
Adsorbcija	80 – 96 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Galimas teršalų atstatymas</li> <li>• Sumažina tūrinį srautą taršos kontrolei pasroviui</li> <li>• Didelis paviršiaus plotas ir mažas porų dydis [40]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LOJ, įleidžiamo srauto temperatūra, slėgis ir debitas bei adsorbentas turi įtakos pašalinimo efektyvumui.</li> <li>• Dalelės gali užblokuoti sistemą ir padidinti slėgio kritimą [40].</li> </ul>
Biofiltrai	60 – 95 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mažos investicijos ir eksploatavimo išlaidos</li> <li>• Yra efektyvus esant mažai koncentracijai ir dideliame srautui</li> <li>• Efektyvus esant dideliame drėgmės lygiui [48;49]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mažiau efektyvus esant didesnėms koncentracijoms ir halogenintiems/aromatiniams junginiams</li> <li>• Jautres aplinkos sąlygoms, įskaitant koncentracijos, temperatūros ir drėgmės pokyčius [49]</li> <li>• Reikalingas didelis paviršiaus plotas</li> <li>• Gali susidaryti toksiškesni antriniai teršalai</li> <li>• Priklauso nuo junginio skaidrumo</li> <li>• Teršalai gali būti toksiški mikrobams</li> </ul>

2 lentelė. Lakiųjų organinių junginių šalinimo technologijų palyginimai (tęsinys)

Oro teršalų šalinimo technologija	Šalinimo efektyvumas procentais	Privalumai	Trūkumai (ribojimai)
<b>Katalitinė oksidacija</b>	90 – 98 % [50]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reikia mažiau šilumos ir degalų nei šiluminei oksidacijai</li> <li>• Didesnis šalinimo efektyvumas žemesnėje temperatūroje dėl katalizatoriaus buvimo [51].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Katalizatoriaus perkrovimas dalelėmis sumažina efektyvumą.</li> <li>• Katalizatorius yra jautrus įtekančio srauto koncentracijai ir tekėjimo sąlygoms [50].</li> <li>• Katalizatorius gali būti paveiktas siera, chlorintais junginiais ar didelėmis dalelių apkrovomis.</li> <li>• Katalizatorių reikia reguliariai pakeisti</li> <li>• Reikia toliau apdoroti halogenintus ir sieros junginius, paverčiamus rūgštimis</li> <li>• Naudojami brangūs ir reti elementai</li> </ul>
<b>Kondensacija</b>	70 – 85 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tirpiklį galima naudoti pakartotinai.</li> <li>• Efektyvus junginiams, kurių virimo temperatūra aukštesnė kaip 311K.</li> <li>• Tinka junginiams, kurių aukšta virimo temperatūra ir didelė garų fazių koncentracija.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Didelės kapitalo ir operacijos išlaidos.</li> <li>• Mažiau efektyvus esant žemai koncentracijai [42].</li> <li>• Reikalinga didesnė aušinimo galia norint išgauti lakias rūšis.</li> </ul>
<b>Dujų fazės pažangioji oksidacija (DFPO)</b>	85 – 99 % [52,53]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Didelis hidroksilo radikalų ir ozono reaktyvumas.</li> <li>• Mažas slėgio kritimas [52]</li> <li>• Galimas biogeninių patogenų, tokių kaip bakterijos ir virusai, pašalinimas dėl UV spinduliuotės ir stiprios oksidacinės aplinkos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Šalinimo efektyvumas priklauso nuo užteršto oro srauto tėkmės greičio ir buvimo laiko [54].</li> <li>• Reikia iširti oksidacijos produktus.</li> <li>• Ne vienodai efektyvus visiems teršalams [53]</li> <li>• Galimas nepageidaujamų reakcijos produktų, tokių kaip anglies monoksidas ir formaldehidas, susidarymas.</li> </ul>
<b>Ne terminė plazma</b>	75 – 100 % [45,55]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mažesnis tūris, palyginti su adsorbicijos ir absorbcijos metodais [56]</li> <li>• Vidutinio sunkumo eksploataavimo sąlygos</li> <li>• Maža kaina ir kompaktiška Sistema</li> <li>• Optimalus veikimas esant plačiam LOJ koncentracijų diapazonui [44,57]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nepageidaujami šalutiniai produktai (CO, NO<sub>x</sub> ir O<sub>3</sub>)</li> <li>• Prastesnis produktų selektyvumas</li> <li>• Mažas energijos efektyvumas [44,58]</li> </ul>

Pramoninių išmetamųjų teršalų kontrolė apima didelį užteršto oro srauto apdorojimą. LOJ kontrolės metodai gali suskaidyti teršalus ir užtikrinti oro kokybę. Biologinio filtravimo komercinį pritaikymą riboja jo dydis ir pažeidžiamumas apsinuodijimui bei LOJ koncentracijos pokyčiui. Šiluminės

oksidacijos ir adsorbcijos metodai yra plačiai naudojami LOJ išmetimams kontroliuoti, tačiau dažnai yra reikalingos papildomos gamtinės dujos, kai išmetamų teršalų koncentracija yra per maža. Šiluminė oksidacija sukuria  $\text{NO}_x$  ir rūgštis, kurioms gali prireikti papildomų apdorojimo sistemų. Adsorbcija yra svarbiausias metodas, naudojamas, kai organinių teršalų regeneracija kelia didžiausią susirūpinimą, o šiluminė oksidacija apima kvapų kontrolę gyvuliams ir biodujų gamybai bei nuotekų valymui, oro valymui patalpose ir išmetamų teršalų kontrolę iš procesų, išmetamų LOJ.

DFPO yra nauja oro taršos kontrolės technologija. Ši technologija leidžia suskaidyti organinius ir neorganinius teršalus, kurie gali būti dujiniai ar kietosios dalelės. Technologija gerai kontroliuoja teršalus išmetamus iš skirtingų šaltinių, tai parodo efektyvų patalpų teršalų ir pramoninių išmetamųjų teršalų pašalinimą. DFPO lengvai prižiūrima, taikoma įvairiems teršalams, efektyviai naudojami energiją ir tinkama įvairioms taršos kontrolės situacijoms [47].

NTP procesas, kuris gali veikti be šilumos energijos, turi didelį potencialą tokiuose pramoniniuose procesuose, kuriuose šilumą naudoti nėra patogu [59]. Daugybėje mokslinių tyrimų stebėta, kad NTP yra gana efektyvi technologija LOJ skaidymui, pavyzdžiui tolueno, benzeno, acetono ir kitų LOJ skaidymo efektyvumas gali siekti 99,99proc. NTP technologija pasižymi maža kaina ir kompaktiška sistema, taip pat plačiu pritaikymu LOJ, turintiems tiek mažą tiek didelę koncentraciją skaidymui [60].

## 1.6. Literatūros apžvalgos apibendrinimas

Viena iš svarbių aplinkos taršos problemų yra kvapas, kuris gali sukelti nemalonius pojūčius. Yra įvairių taršos šaltinių, kurie prisideda prie kvapo skleidimo aplinkoje, kurie skirstomi į mobilius, stacionarius, teritorinius bei natūralius taršos šaltinius. Daugeliu atveju kvapų atsiradimo priežastimi aplinkoje tampa valymo įrenginių nebuvimas arba jų nenaudojimas, nepakankamas pažangių technologijų taikymas, netinkamas statinių inžinerinių sistemų įrengimas, taip pat institucijų nustatytų veiklų nevykdymas. Kvapai susidaro arba gali susidaryti fizikinių, cheminių, biologinių procesų metu dėl kelių pagrindinių veiklų: praktikuojamos gyvulininkystės, komunalinių įrenginių naudojimo, pramonės bei energetikos bei medienos gamybos pramonės.

Daugiausia oro teršalų išsiskiria į aplinką dėl pramoninių objektų. LOJ yra vieni iš pagrindinių dujinių teršalų išsiskiriančių aplinkoje, kurie kelia didžiulį poveikį žmogaus sveikatai ir aplinkai. Šie teršalai gali patekti į žmogaus organizmą įkvėpus, nurijus ar per lytėjimą, net maža LOJ koncentracija gali sukelti vėžį.

Vieni pagrindinių LOJ grupei priklausančių oro taršos šaltinių yra Terpenai, kurių didžioji dalis išmetama medienos apdirbimo pramonėje. Šioje pramonėje dažniausiai aptinkami terpenai yra  $\alpha$ -pinenas,  $\beta$ -pinenas,  $\alpha$ -terpineolis, 3-kerenas, linonenas, tai reprezentatyviausios ir gausiausios rūšys bei labiausiai susijusios su AOA susidarymu.

Daugelyje pramonės šakų siekiant sumažinti taršos efektyvumą, stengiamasi LOJ turinčias medžiagas, pakeisti kitais produktais. Tačiau ne visuose gamybos ar vartojimui paruoštuose produktuose galima išvengti jų naudojimo. Pramonėje LOJ teršalų kiekiui kontroliuoti naudojama daugybė metodų, kurie suskirstyti į dvi grupes: proceso modifikavimo grupę ir papildomų kontrolės būdų grupę. Kai nėra galimybės išvengti LOJ naudojimo produktuose yra naudojami kiti šalinimo būdai, kurie skirstomi į rekuperacinius ir sunaikinančius. Rekuperaciniam šalinimo būdai priskiriama absorbcija, adsorbcija, kondensacija ir membraninis perskyrimas. Šie būdai dažniausiai naudojami

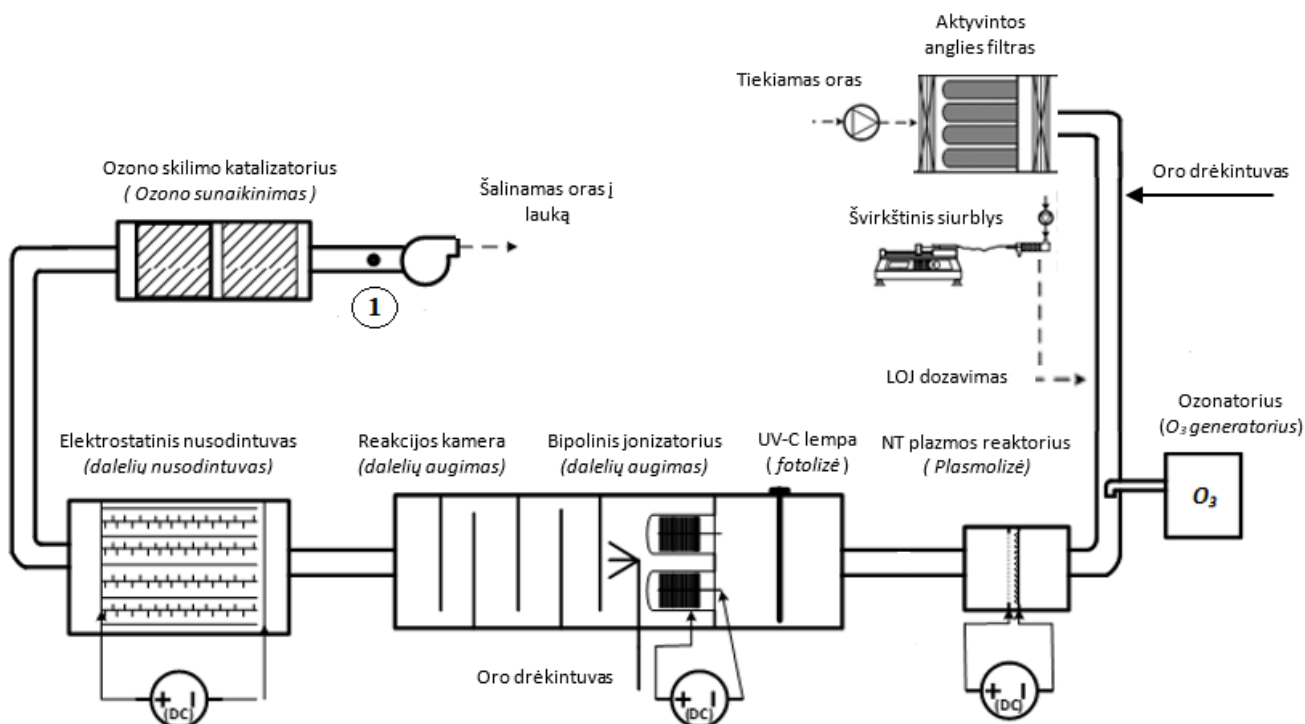
esant didelėms LOJ koncentracijoms. Esant mažesnėms išmetamų teršalų koncentracijoms, jas tikslinga suskaidyti, t.y. paversti nekenksmingais junginiais. Suskaidymas yra skirstomas į oksidavimą bei biofiltravimą, o pats oksidavimo procesas į terminį bei katalitinį oksidavimą.

Visus LOJ šalinimo metodus galima įvertinti atsižvelgiant į energijos vartojimo efektyvumą, priežiūros, įrenginio eksploatavimo išlaidas bei teršalų kontrolę. Technologijų palyginimai pateikti 2 lentelėje, kurioje aptariama kiekviena oro teršalų šalinimo technologija, pasirinktos technologijos šalinimo efektyvumas, privalumai bei trūkumai (ribojimai). Tačiau viena iš šalinimo technologijų kelianti didelį konkurenciją kitoms būtų NTP technologija, kuri išsiskiria optimaliu veikimu esant įvairiam teršalų koncentracijų diapazonui, pažymi maža kaina bei kompaktišku veikimu. Naudojant šią technologiją šalinimo efektyvumas pasiekiamas nuo 75 iki 100 proc.

## 2. Tyrimo metodika

### 2.1. Eksperimento įrangos aprašymas

Eksperimentui atlikti, LOJ užterštam orui pašalinti, naudota pusiau pramoninės oro valymo sistemos prototipas, kurio pagrindinė schema pateikta 10 paveikslėlyje. Ji buvo suprojektuota ir surinkta Kauno technologijų universiteto Aplinkos technologijos katedros Aplinkos oro tyrimų laboratorijoje.



10 pav. LOJ užteršto oro apdorojimo įrenginys

Lauko oras, kuris prieš patenkant į sistemą buvo papildomai apdorojamas nuo LOJ ir kietųjų dalelių, buvo naudojamas kaip eksperimentinis oras. Tiekiamas oro srautas iš lauko patenka į oro paruošimo įrenginį, kuriame įmontuoti aktyvintos anglies filtrai. Toliau išvalytas oras nukreipiamas į eksperimentinę sistemą, pusiau pramoninį prototipą. Pirmiausia švarus oras buvo drėkinamas vandens garais, tiekiamais iš oro drėkintuvo (Medisana, AH 660, Vokietija). Tuomet LOJ buvo suleidžiami į srautą naudojant garintuvo bloką, kurį sudaro dozavimo švirkštinis siurblys, mažas oro siurblys ir šildymo vamzdelis. Skystos fazės LOJ junginiai (terpenai) iš švirkštinio siurblio buvo dozuojami į kaitinimo vamzdelį ir išgarinami iki 1 L/min papildomo švaraus oro srauto, kuris po to išvirkščiamas į pagrindinį eksperimentinio įrenginio oro srautą (kuris priklausė nuo eksperimento sąlygų).

Pusiau pramoniniame prototipe yra įmontuotas NTP reaktorius *in-situ* generuoti ozonui ir LOJ teršalams oksiduoti bei atskiras ozono generatorius, pagrįstas DBD technologija. Naudojant NTP reaktorių, energija naudojama tiesioginiam ozono generavimui iš užteršto oro srauto, taip pat tiesioginei LOJ junginių ozonolizei. Antruoju atveju, ozonas gali būti generuojamas atskirame ozono generatoriuje ir tada tiekiamas į užteršto oro srautą. Į NTP reaktorių tiekama aukštos teigiamos įtampos nuolatinė srovė (0-30 W), iš specialiai tam skirto maitinimo šaltinio. Kitame etape radikalai generuojami iš jau susidariusio ozono, naudojant fotolizę, UV lempų UV-C spinduliuotę (40W modelis F980078BU, „LightTech“, Vengrija). Pradinė reakcija su OH• yra daugumos teršalų greitį

ribojantis žingsnis, suaktyvinti oksidacijos kaskadą, kuriai padeda kiti sistemos oksidantai: O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, O (3P) ir HO<sub>2</sub>. Kitas etapas yra bipolinis jonizatorius, susidedantis iš dviejų teigiamų ir dviejų neigiamų jonizacijos vienetų, tiekiamų iš specialiai suprojektuotos aukštos neigiamos / teigiamos įtampos (± 0 – 15 kV) nuolatinės srovės maitinimo šaltinio. Vėliau oras nukreipiamas į didelio tūrio maišymo kamerą (bendras tūris – 0,5 m<sup>3</sup>), kurios pagrindinis tikslas yra išplėsti dujų fazės chemiją ir leisti aerozolio dalelėms augti kondensacijos ir koaguliacijos būdu. Tada aerozolio dalelės, sugeneruotos ankstesniuose etapuose, surenkamos į adatinės plokštės tipo elektrostatinį nusodintuvą, veikiantį esant aukštai neigiamajai įtampai (–30 kV). Paskutinis sistemos etapas yra į keraminį MnO<sub>2</sub> įterptas katalizatorius (Tombo Nr. 8803–CZH2, „Nichias Corp.“, Tokushima, Japonija), veikiantis kaip ozono ardytojas. Proceso pabaigoje išvalytas oras yra grąžinamas į aplinką.

## 2.2. Eksperimentinis planas

Visas eksperimentas buvo padalytas į dvi pagrindines dalis, kurių tyrimo planas pateiktas žemiau esančiose lentelėse (3 ir 4). Vadovaujantis eksperimento planu yra parenkamos sąlygos tyrimui atlikti.

Pirmojoje eksperimento dalyje LOJ šalinimui atlikti buvo naudojamas neterminės plazmos reaktorius, kaip aktyviųjų radikalų ir ozono šaltinis. Eksperimentui atlikti buvo naudojama 50% šaltinio oro drėgmė ir 20° C temperatūra. Atliekant pirmąją eksperimento dalį buvo žiūrima į oro srauto priklausomybę nuo neterminės plazmos galios. Oro srauto debitas kito nuo 25 iki 200 m<sup>3</sup>/h, o neterminės plazmos galia nuo 5 iki 25 W. Pirmasis bandymas buvo atliekamas kuomet pasirinktas oro srautas buvo 25 m<sup>3</sup>/h, o neterminės plazmos galia 5W, atlikto bandymo žymėjimas P1. Iš viso buvo atlikti 25 skirtingi tyrimo variantai, kurie pateikti 3 lentelėje.

**3 lentelė.** Tyrimo planas naudojant NTP.

		Ne terminės plazmos galia, W				
		5	10	15	20	25
Oro srautas, m <sup>3</sup> /h	25	P1	P6	P11	P16	P21
	50	P2	P7	P12	P17	P22
	100	P3	P8	P13	P18	P23
	150	P4	P9	P14	P19	P24
	200	P5	P10	P15	P20	P25

Antroji eksperimento dalis buvo atlikta naudojant atskirą ozono generatorių, kuomet naudojama 50 proc. šaltinio oro drėgmė ir 20°C temperatūra. Šią plano dalį sudarė oro srauto priklausomybė nuo ozonatoriaus galios. Ozonatoriaus galios kitimas pasirinktas nuo 28 iki 52 W, o oro srauto debitas nuo 25 iki 200 m<sup>3</sup>/h. Ozonatoriui reikalingas didesnis galios kiekis, lyginant su NTP, todėl siekiant palyginti šias dvi technologijas parinkta didesnė ozonatoriaus galia. Pirmojo bandinio žymėjimas O1, kuomet ozonatoriaus galia pasirinkta 28 W, o oro srautas 25 m<sup>3</sup>/h. Iš viso atlikti 25 tyrimo variantai, kurie pateikti 4 lentelėje. Prieš atliekant eksperimentus ozono generatorius buvo sugeneruotas taip, kad būtų pasiektos būtinos ozono išėigos vertės, kurios buvo apskaičiuotos ankščiau atsižvelgiant į ankstesnius NTP eksperimentų rezultatus. Šio eksperimento plano dalyje atliktas įrangos pakeitimas, kuomet atjungiamas neterminė plazma ir pajungiamas ozonatorius.



#### 4 lentelė. Tyrimo planas naudojant ozonatorių.

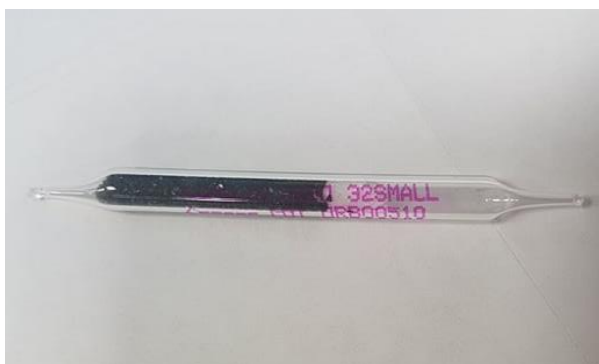
		Ozonatoriaus galia, W				
		28	34	41	47	52
Oro srautas m <sup>3</sup> /h	25	O1	O6	O11	O16	O21
	50	O2	O7	O12	O17	O22
	100	O3	O8	O13	O18	O23
	150	O4	O9	O14	O19	O24
	200	O5	O10	O15	O20	O25

### 2.3. LOJ ėminių ėmimo metodai

Ėminių ėmimo vieta buvo įrengta visos valymo sistemos paskutinėje stadijoje, paveikslėlyje 10 pažymėtame taške 1, kur buvo matuojama LOJ koncentracija. Kaip tikslinis teršalas buvo naudojamas Terpenas, kurio koncentracija buvo palaikoma pastovi – 4 mg/m<sup>3</sup>.

#### LOJ ėminių ėmimas:

Ėminių ėmimui atlikti buvo naudojami LOJ sorbciniai vamzdeliai, pavaizduoti 11 paveikslėlyje, kurie buvo laikomi šaldiklyje sandarioje plastikinėse dėžutėse iki eksperimento pradžios.



11 pav. LOJ ėminių ėmimui skirtas sorbcinis vamzdelis.

Prieš ėmimą vamzdeliai yra išimami iš šaldiklio ir laikomi dėžutėje laboratorijoje kol vamzdelių temperatūra tampa artima laboratorijos aplinkos temperatūrai. Ant sorbcinio vamzdelio yra užklijuojami lipdukai su ėminių numeriu, atitinkantys eksperimento plano numerį, tuomet naudojant ampulių atidarytuvą nupjaunami vamzdelio galai. Vamzdelis yra įstatomas į laikiklį pagal rodyklę, kuri rodo oro siurblio kryptį. Tai atlikus – įjungiamas oro siurblys. Prie vamzdelio prijungiamas oro srauto matuoklis Defender 500, kuriuo sureguliuojamas mėginių ėmimo srauto greitis. Atsuktuvu reguliuojant potenciometrą nustatomas debitas 1 l/min. Vamzdelio numeris ir tikrasis debitas yra užrašomi į registracijos lapą su kitais reikalingais duomenimis bei registruojamas ėminių ėmimo pradžios laikas. Po ėminių ėmimo, prie vamzdelio prijungiamas oro srauto matuoklis. Oro srauto tikrasis debitas užrašomas į registracijos lapą. Atjungiamas oro srauto matuoklis ir išjungiamas oro siurblys. Į registracijos žurnalą užrašomas ėminio ėmimo pabaigos laikas. Ėminių ėmimo laikas visomis eksperimento sąlygomis vienodas 20min. Užfiksavus duomenis vamzdelis atjungiamas, ant jo galų tvirtai užmaunami raudoni apsauginiai vamzdeliai, tuomet juos dedame į sandarią plastikinę dėžutę ir laikome šaldiklyje.

## 2.4. Mėginių paruošimas chromatografijos analizei

Siekiant paruošti mėginius buvo naudojami reagentai kaip analitinis standartas, anglies disulfidas (naudojamas dujų chromatografijai) bei 2-fluorotoluenas.

Taip pat naudojami laboratoriniai indai ir priemonės:

- 4 ml talpos stikliniai buteliukai su PTFE membrana;
- Chromatografiniai buteliukai (1,8 ml talpos) su kamšteliu (PTFE membrana);
- Ampulių atidarytuvas/stiklo rėžtuvas;
- Plieninė viela stiklo vatos ištraukimui;
- Stiklinė 5 ml pipetė tirpikliams;
- Purtyklė

### Kalibravimo kreivės paruošimas chromatografijai:

Į 10 ml matavimo kolbą įpilamas 1ml analitinio standarto kiekis ir praskiedžiamas iki brūgšnio (10 kartų skiedimas). Iš praskiesto kalibracinio tirpalo (PKT), paruošiami septyni kalibraciniai tirpalai su skirtingomis koncentracijomis, tam kad atspindėtų mėginiuose tikėtiną koncentracijos diapazoną. Visi kalibraciniai tirpalai praskiedžiami iki 50ml kolbutėse. Koncentracijos svyravimas pasirinktas nuo 4,00 iki 0,063  $\mu\text{g/ml}$ , kaip pagrindinis kalibracinis tirpalas pasirinktas KT4 su 0,500  $\mu\text{g/ml}$  koncentracija. Visi kalibracinės kreivės duomenys pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. Kalibracinės kreivės duomenys

	Tirpinys, ml	C(junginio), $\mu\text{g/ml}$	C(2-fluorotoluenas), ml	Kolbutė, ml
Analitinis standartas		2000		
PKT	1	200		10
Kalibracinis tirpalas KT1	1	4,000	4,000	50
Kalibracinis tirpalas KT2	0,5	2,000	2,000	50
Kalibracinis tirpalas KT3	0,25	1,000	1,000	50
Kalibracinis tirpalas KT4 (Pagrindinis)	0,125	0,500	0,500	50
Kalibracinis tirpalas KT5	0,0625	0,250	0,250	50
Kalibracinis tirpalas KT6	0,03125	0,125	0,125	50
Kalibracinis tirpalas KT7	0,015625	0,063	0,063	50

Paruošti kalibraciniai tirpalai supilami į chromatografinius buteliukus (PTFE membrana) ir ant jų užrašomi pavadinimai. Siekiant tikslių rezultatų, paruošiamos penkios serijos buteliukų su visais tirpalais, o su pagrindiniu tirpalu KT4 yra paruošiami dvidešimt buteliukų. Visi jie laikomi šaldytuve, 4 °C temperatūroje, iki analizės.

Taip pat paruošiami tirpikliai kuomet atidaromas naujas anglies disulfido butelis, iš kurio švaria Pastero pipete paimami trys mėginiai į chromatografinius buteliukus. Buteliukai užkemšami ir ant jų užrašomas pavadinimas.

## **LOJ mėginių paruošimas:**

LOJ sorbciniai vamzdeliai išimami iš šaldiklio ir laikomi laboratorijos aplinkoje tol kol temperatūra susivienodina. Paruošiami 4 ml talpos buteliukai ant kurių suklijuojamos etiketės su mėginių pavadinimais ir numeriais. Naudojant acetonitrilą yra nuplaunamas ampulių atidarytuvas, kuriuo aplink įrėžiama sorbcinio vamzdelio sienelė ties stiklo vata. Vamzdelio galas yra nulaužiamas. Iš sorbcinio vamzdelio išimama stiklo vata ir patalpinama į paruoštus 4 ml buteliukus. Į jį supilamas visas likęs sorbentas ir stiklo vata. Buteliukai su sorbentu statomi į šalto vandens vonelę su ledu. Į 4 ml buteliuką su sorbentu automatine pipete yra įpilami 3 ml anglies disulfido. Į buteliukus su pipete įleidžiama 20 µl 2-fluorotolueno standarto (2FT-2). Buteliukas užkemšamas kamšteliu su PTFE membrana ir ant jo užklijuojamas lipdukas su pavadinimu. Tuomet buteliukai yra laikomi purtyklėje 30 min. Po ekstrakcijos ekstrahentas Pastero pipete perpilamas 1 chromatografinį buteliuką. Buteliukas užkemšamas ir ant jo užrašomas pavadinimas ir numeris. Buteliukai laikomi šaldytuve 4 °C temperatūroje iki analizės.

### **2.5. Chromatografijos analizei naudojamų metodų sąlygos**

LOJ analizei naudojamas dujų chromatografo (GC) su liepsnos jonizacijos detektoriumi (FID) metodas. Analizė atlikta naudojant GC/FID sistemą Shimadzu 2010 Plus, Shimadzu Corp., Japonija), su aprūpinta Rxi-5Sil MS (30m, 0,25 mm ID, 1,0µm, Restek Corp., JAV) kolonėle. Pagrindinės metodo sąlygos: injektuojamo bandinio tūris 1 µl, palaikoma inžektoriaus temperatūra 280 °C, detektoriaus temperatūra 300 °C. Nustatoma krosnies temperatūros programa: temperatūra keliami nuo 40 °C (1 min), keliant temperatūrą po 10 °C/min iki 230 °C (10 min), nuo 10 °C/min iki 280 °C (5min).

Skilimo metu tarpinių medžiagų junginiai analizuojami naudojant dujų chromatografijos (GC) - masių spektroskopijos (MS) metodą GC/MS-QP2010 SE (Shimadzu Corp., Japonija). Analizė atliekama su aprūpinta Rxi-5Sil MS (30m × 0,25mm ID × 1,0µm, Restek Corporation, JAV) kapiliarine kolonėle. GC/MS metodo sąlygos: pagrindinė temperatūra 50 °C, inžektoriaus temperatūra 280 °C. Injekcija atliekama taikant srauto skirstymą, injektuojamo bandinio tūris – 1 µl. Krosnies temperatūros programa nustatoma kelti palaipsniui nuo 40 °C (1 min.), keliant temperatūrą po 10 °C per 1 min. iki 230 °C ir palaikoma 10 min, taip pat po 10 °C / min. iki 280 °C (5 min.). MS nuskaitymo intervalas 20-500 amu.

### **2.6. Duomenų analizės metodai**

Remiantis dujų chromatografijos masių spektrometrija metodo užfiksuotais smailių plotais ir pikais buvo apskaičiuojami standartiniai nuokrypiai. Duomenys apdorojami ir sisteminami naudojant statistinius duomenų analizės paketus Microsoft Office Excel 2016 (Microsoft, JAV).

### 3. Tyrimų rezultatai

Tyrimui, LOJ šalinimui, buvo naudojama pusiau pramoninio prototipo sistema, kurios modelis pateiktas 10 paveikslėlyje. Eksperimentas atliktas dviem būdais, nuosekliai pagal 2.2 skyriuje pateiktą planą.

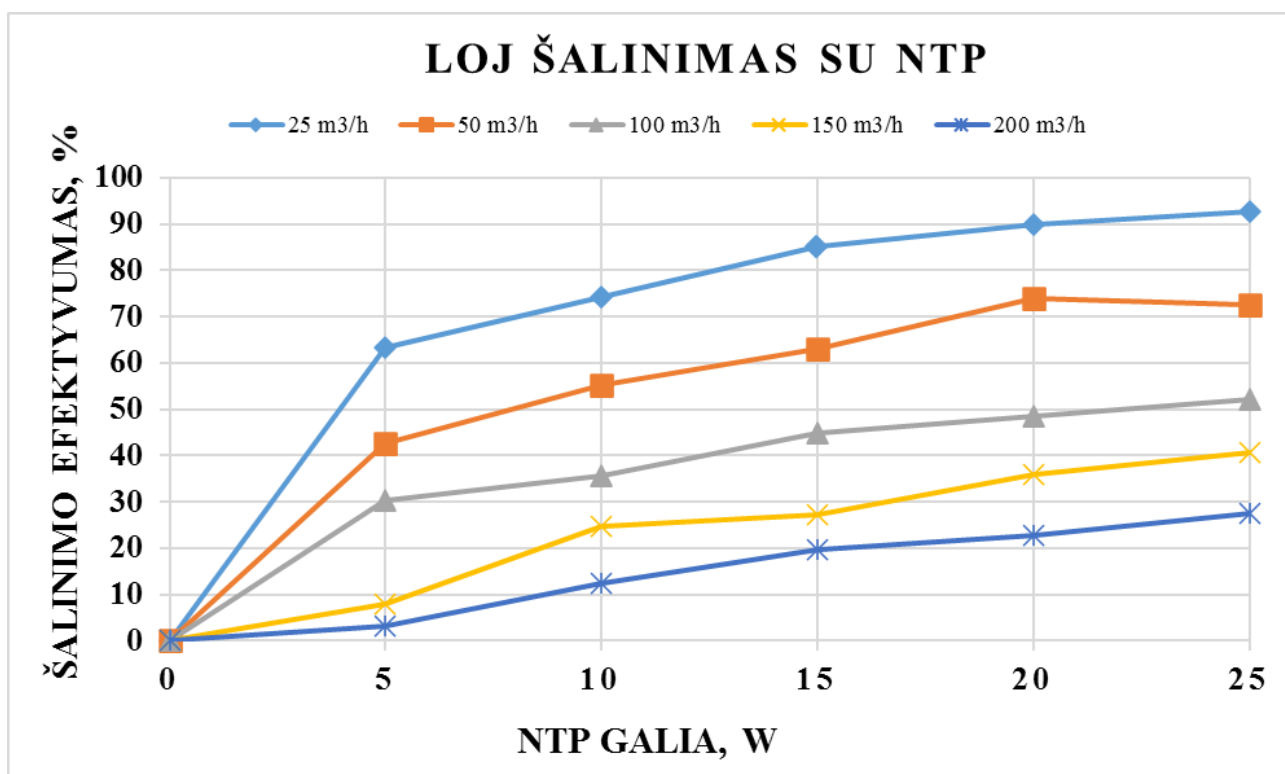
#### 3.1. Lakiųjų organinių junginių šalinimo efektyvumas

Pirmojoje tyrimo dalyje buvo naudojamas pramoninis prototipas su NTP modeliu. Šio eksperimento metu buvo stebimas ryšys tarp LOJ šalinimo efektyvumo ir NTP galios esant skirtingiems oro srautams, kai pradinė LOJ koncentracija prieš šalinimą buvo  $4 \pm 0,3 \text{ mg / m}^3$ . Vykdam tyrimą buvo pasirinktos skirtingos eksperimento sąlygos, kuomet NTP galia kito nuo 5 iki 25 W, o oro srautas nuo 25 iki 200 m<sup>3</sup>/h. Iš viso gauti 25 skirtingi eksperimento rezultatai, kurie išreikšti LOJ šalinimo efektyvumo procentine išraiška. Gauti eksperimentiniai rezultatai, pateikti 6 lentelėje.

6 lentelė. LOJ šalinimo efektyvumo rezultatai esant skirtingoms sąlygomis, naudojant NTP.

Oro srautas, m <sup>3</sup> /h	NTP galia, W					
	0	5	10	15	20	25
25 m <sup>3</sup> /h	0	63,40	74,20	85,10	90,00	92,80
50 m <sup>3</sup> /h	0	42,70	55,20	63,10	73,90	72,60
100 m <sup>3</sup> /h	0	30,20	35,50	44,80	48,60	52,10
150 m <sup>3</sup> /h	0	8,00	24,80	27,20	35,90	40,60
200 m <sup>3</sup> /h	0	3,30	12,30	19,80	22,70	27,60

Pagal gautus eksperimento metu LOJ šalinimo efektyvumo rezultatus, buvo nustatytas ryšys tarp LOJ šalinimo efektyvumo ir NTP galios esant įvairiems oro srautams, kuris pateiktas 12 paveikslėlyje.



12 pav. Ryšys tarp LOJ šalinimo efektyvumo ir NTP galios esant skirtingiems oro srautams (25 – 200 m<sup>3</sup>/h).

Iš 12 grafike esančių rezultatų galime matyti, jog LOJ šalinimo efektyvumas svyravo nuo 3,30 proc. (esant 5 W NTP galiai ir 200 m<sup>3</sup>/h oro srautui) iki 92,80 proc. (esant 25 W NTP galiai ir 25 m<sup>3</sup>/h oro srautui). Pasirinkus kitus oro srautus 50/100/150/200 m<sup>3</sup>/h oro srautus, esant didžiausiai NTP galiai valymo efektyvumas atitinkamai pasiektas 72,6/52,1/40,6 proc. Iš grafiko matyti, kad geriausi rezultatai pasiekti esant 25 m<sup>3</sup>/h oro srautui, kuomet šalinimo efektyvumas, esant 5 W galiai, siekia 63,4 proc. ir yra 2,3 karto didesnis nei pasirinkus didžiausią NTP galią 25 W ir didžiausią oro srautą 200 m<sup>3</sup>/h. Šie duomenys nusako, jog didesnis buvimo laikas valymo sistemoje ir mažesnis oro srauto greitis per valymo sistemą sukelia didesnę LOJ šalinimo efektyvumą.

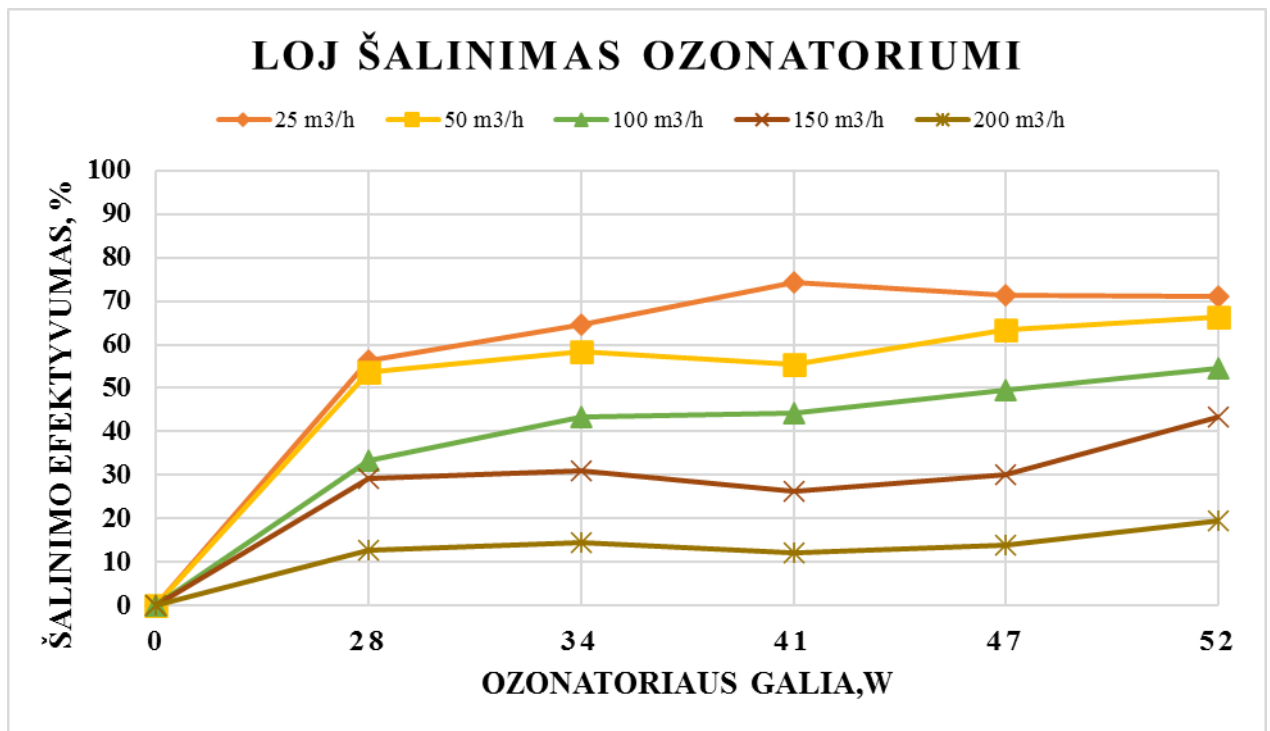
Antrajai eksperimento plano daliai įvykdyti naudojamas papildomas ozonatorius, kuomet atjungiamas NTP. Norint pasiekti LOJ šalinimo efektyvumą panašų į NTP konfigūracijos efektyvumą, buvo pasirinktos didesnės ozonatoriaus galios vertės, kurios buvo suskaičiuotos pagal ozono išeigą. Taigi ozonatoriaus galios diapazonas pasirinktas nuo 28 W iki 52 W, o oro srautas naudojamas toks pat, kaip ir su NTP nuo 25 iki 200 m<sup>3</sup>/h. Šio eksperimento metu buvo stebimas ryšys tarp LOJ šalinimo efektyvumo ir ozonatoriaus galios, esant skirtingiems oro srautams, kuomet pradinė LOJ koncentracija prieš šalinimą buvo  $4 \pm 0,3$  mg/m<sup>3</sup>. Iš viso gauti 25 skirtingi duomenys, kurie išreikšti LOJ šalinimo efektyvumo procentine išraiška. Eksperimento metu gauti LOJ šalinimo efektyvumo rezultatai, naudojant ozonatorių pateikti 7 lentelėje.

**7 lentelė.** LOJ šalinimo efektyvumo rezultatai esant skirtingoms sąlygoms, naudojant ozonatorių.

		Ozonatoriaus galia, W					
		0	28	34	41	47	52
Oro srautas, m <sup>3</sup> /h	25 m <sup>3</sup> /h	0	56,20	64,60	74,44	71,35	70,95
	50 m <sup>3</sup> /h	0	53,54	58,47	55,53	63,48	66,36
	100 m <sup>3</sup> /h	0	33,23	43,31	44,36	49,70	54,47
	150 m <sup>3</sup> /h	0	29,18	31,01	26,35	30,24	43,27
	200 m <sup>3</sup> /h	0	12,74	14,46	12,24	13,88	19,45

Pagal gautus eksperimento metu LOJ šalinimo efektyvumo rezultatus, buvo nustatytas ryšys tarp LOJ šalinimo efektyvumo ir ozonatoriaus galios, esant įvairiems oro srautams, kuris pateiktas 13 paveikslėlyje.

Iš 7 lentelėje pateiktų duomenų bei 13 grafiko galime teigti, jog didžiausias LOJ šalinimo efektyvumas pasiektas 74,4 proc., kuomet buvo pasirinkta 41 W ozonatoriaus galia ir 25 m<sup>3</sup>/h oro srautas. Priešingu atveju mažiausias valymo efektyvumas pasiektas 12,7 proc., kuomet oro srauto debitas siekia 200 m<sup>3</sup>/h, o ozonatoriaus galia 28 W. Iš gautų duomenų galime pastebėti, jog esant 5 W ozonatoriaus galiai tarp 25 - 50 m<sup>3</sup>/h ir 100 - 150 m<sup>3</sup>/h oro srautų, matomi tik nežymūs efektyvumo skirtumai, jie išryškėja kuomet yra didinama ozonatoriaus galia. Didžiausias šalinimo efektyvumas pasiekiamas su 41 W ozonatoriaus galia, pasirinkus 25 m<sup>3</sup>/h oro srautą 74,4 proc., su 50 m<sup>3</sup>/h oro srautu 66,4 proc., su 100 m<sup>3</sup>/h – 54,5 proc., su 150 m<sup>3</sup>/h oro srautu 43,3 proc., bei mažiausias 19,4 proc. su 200 m<sup>3</sup>/h oro srautu. Geriausi rezultatai pasiekti esant mažiausiam oro srautui (25 m<sup>3</sup>/h), pasirinkus visas skirtingas ozonatoriaus galias, efektyvumas pasiekiamas didžiausias.



**13 pav.** Ryšys tarp LOJ šalinimo efektyvumo ir ozonatoriaus galios esant skirtingiems oro srautams (25 – 200 m<sup>3</sup>/h).

Lygindami pramoninio prototipo veikimą su NTP modeliu ir ozonatoriumi galime išvelgti skirtumus. Naudojant NTP modelį LOJ šalinimo efektyvumas pasiekiamas 1,2 karto didesnis. Tačiau abiejų šių technologijų metu geriausi rezultatai pasiekiami esant mažam oro srautui, šiuo atveju 25 m<sup>3</sup>/h. Pagal eksperimentinius rezultatus taip pat galime pastebėti, jog ilgesnis išbuvimo laikas šalinimo sistemoje (mažesnis oro srautas) yra efektyvesnis norint pasiekti didesnę teršalų šalinimo efektyvumą.

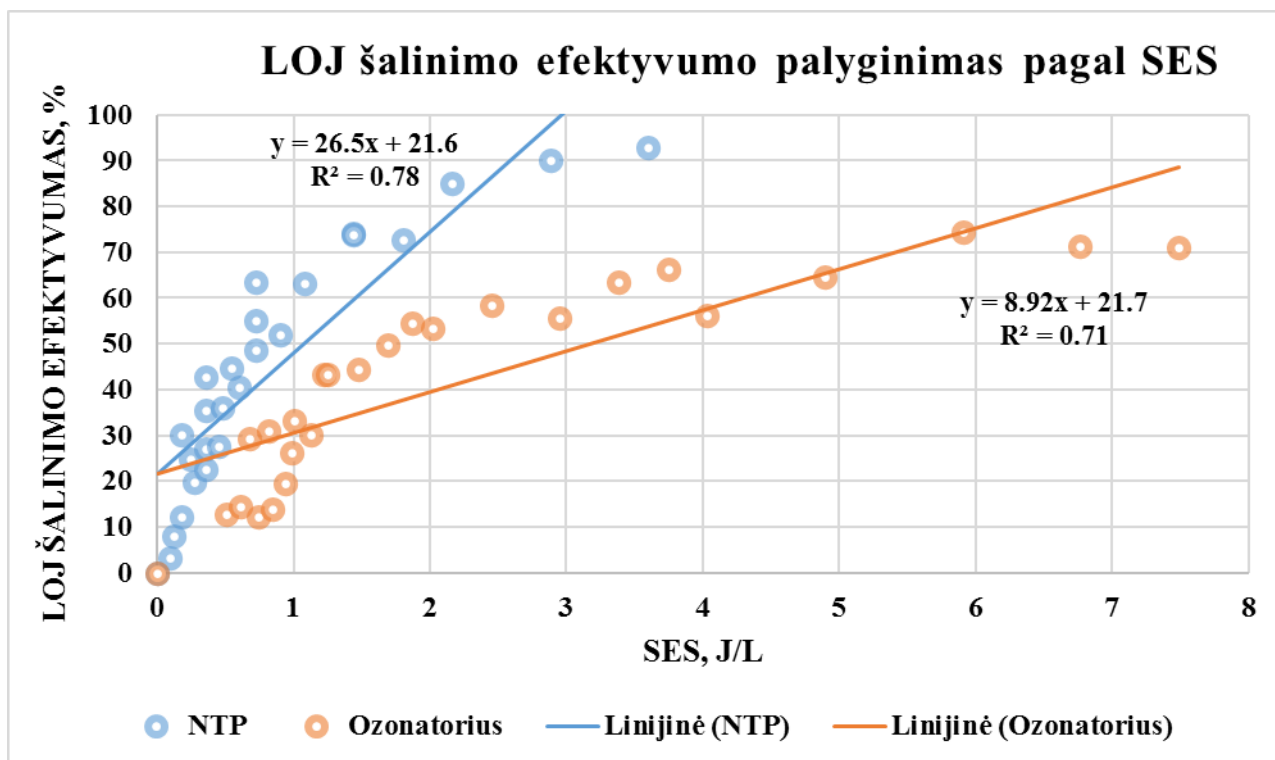
Savitasis energijos suvartojimas (SES) yra pagrindinis parametras, turintis įtakos LOJ šalinimo efektyvumui. Taigi atliktas LOJ šalinimo efektyvumo palyginimas esant įvairioms SES vertėms, tarpusavyje palyginus NTP ir ozonatoriaus technologijas. 8 lentelėje pateikti duomenys, kuriuose atsispinti pagal pirmąjį eksperimento planą (naudojant NTP) gauti šalinimo efektyvumo ir SES duomenys, bei pagal antrąjį eksperimento planą (naudojant ozonatoriaus modulį) gauti šalinimo efektyvumo ir SES duomenys.

**8 lentelė.** Pagal I ir II eksperimento planus gauti šalinimo efektyvumo ir SES rezultatai.

I eksperimento planas (NTP)	SES, J/L	Šalinimo efektyvumas, %	II eksperimento planas (ozonatorius)	SES, J/L	Šalinimo efektyvumas, %
P0	0,00	0,00	O0	0,00	0,00
P1	0,72	63,40	O1	4,03	56,20
P2	0,36	42,70	O2	2,02	53,54
P3	0,18	30,20	O3	1,01	33,23
P4	0,12	8,00	O4	0,67	29,18
P5	0,09	3,30	O5	0,50	12,74
P6	1,44	74,20	O6	4,90	64,60
P7	0,72	55,20	O7	2,45	58,47
P8	0,36	35,50	O8	1,22	43,31
P9	0,24	24,80	O9	0,82	31,01
P10	0,18	12,30	O10	0,61	14,46
P11	2,16	85,10	O11	5,90	74,44
P12	1,08	63,10	O12	2,95	55,53
P13	0,54	44,80	O13	1,48	44,36
P14	0,36	27,20	O14	0,98	26,35
P15	0,27	19,80	O15	0,74	12,24
P16	2,88	90,00	O16	6,77	71,35
P17	1,44	73,90	O17	3,38	63,48
P18	0,72	48,60	O18	1,69	49,70
P19	0,48	35,90	O19	1,13	30,24
P20	0,36	22,70	O20	0,85	13,88
P21	3,60	92,80	O21	7,49	70,95
P22	1,80	72,60	O22	3,74	66,36
P23	0,90	52,10	O23	1,87	54,47
P24	0,60	40,60	O24	1,25	43,27
P25	0,45	27,60	O25	0,94	19,45

Pagal 8 lentelėje pateiktus duomenis nustatytas LOJ šalinimo efektyvumo palyginimas su NTP ir ozonatoriaus galiomis esant įvairioms SES vertėms, kuris pavaizduotas 14 paveikslėlyje.

Pusiau pramoninis prototipas, turintis NTP modulį, esant mažesnėms savitosios energijos sąnaudoms, sukelia didesnę LOJ šalinimo efektyvumą. Tuo tarpu sistemai aprūpintai ozonatoriaus modeliu reikia keletą kartų daugiau energijos norint pasiekti panašų šalinimo efektyvumą, o tai galime pastebėti 14 paveikslėlyje esančio grafiko.



**14 pav.** LOJ šalinimo efektyvumo palyginimas su NTP ir ozonatoriaus galiomis esant įvairioms SES vertėms.

Pagal turimus duomenis ir grafiką galima pastebėti, kad naudojant NTP modulį, SES vertės svyruoja nuo 0,09 J/L (25 W, 100 m<sup>3</sup>/h) iki 3,6 J/L (25 W, 25 m<sup>3</sup>/h), o priešingu atveju naudojant ozonatorių, SES vertės svyravo nuo 0,5 J/L (28 W, 200 m<sup>3</sup>/h) iki 7,5 J/L (25 W, 25 m<sup>3</sup>/h). Iš grafiko galime matyti, jog didžiausias šalinimo efektyvumas pasiektas esant didžiausioms SES vertėms naudojant abu modelius, tačiau ozonatoriaus vertė net 2,08 karto didesnė nei naudojant NTP. Eksperimentiniai rezultatai parodė, jog šalinimo efektyvumas priklauso nuo naudojamos savitosios energijos šaltinio.

### 3.2. Terpeno junginių šalinimo efektyvumas

Atlikus eksperimentą, naudojant dujų chromatografijos su liepsnos jonizacijos detektoriumi (GC–FID) metoda, buvo įvertinti trys pagrindiniai Terpeno grupės junginių teršalai:

- $\alpha$ -terpineolis
- $\alpha$ -pinenas
- $\beta$ -pinenas

Apskaičiuotas ir nustatytas šių junginių šalinimo efektyvumas procentais, naudojant du skirtingus prototipus, su NTP ir ozonatoriaus modeliu. Ryšiai tarp anksčiau paminėtų junginių šalinimo efektyvumo ir NTP galios, esant skirtingiems oro srautams (25 – 200 m<sup>3</sup>/h) pateikti žemiau esančiuose poskyriuose. Taip pat apžvelgta pasirinktos technologijos įtaka šalinimo efektyvumui.



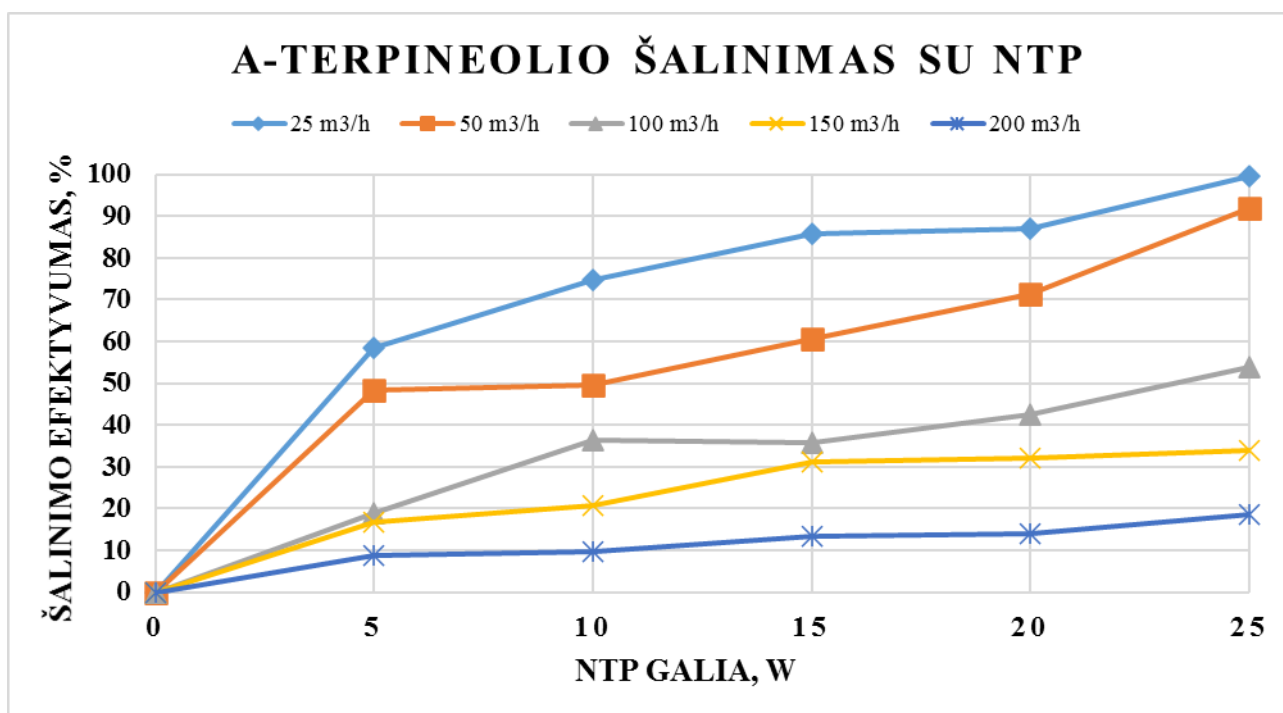
### 3.2.1. $\alpha$ -Terpineolio šalinimo efektyvumas

Atlikto tyrimo metu įvertintas pušies medienos komponento  $\alpha$ -terpineolio šalinimo efektyvumas. Skirtingomis sąlygomis, naudojant NTP modelį, gauti 25 eksperimento rezultatai, kurie išreikšti šalinimo efektyvumo procentine išraiška. Visi duomenys užfiksuoti ir pateikti 9 lentelėje.

**9 lentelė.**  $\alpha$ -Terpineolio šalinimo efektyvumo rezultatai esant skirtingoms sąlygoms, naudojant NTP.

	Oro srautas, m <sup>3</sup> /h	NTP galia, W					
		0	5	10	15	20	25
	25 m <sup>3</sup> /h	0	58,37	74,79	85,73	87,04	99,50
	50 m <sup>3</sup> /h	0	48,42	49,58	60,77	71,43	91,79
	100 m <sup>3</sup> /h	0	18,82	36,26	35,65	42,41	53,81
	150 m <sup>3</sup> /h	0	16,77	20,78	31,03	32,20	34,03
	200 m <sup>3</sup> /h	0	8,63	9,64	13,39	13,98	18,70

Pagal gautus 9 lentelė esančius rezultatus, nustatytas ryšys tarp  $\alpha$ -Terpineolio šalinimo efektyvumo ir NTP galios, esant skirtingiems oro srautams (25-200 m<sup>3</sup>/h), kuris pateiktas 15 paveikslėlyje.



**15 pav.** Ryšys tarp  $\alpha$ -Terpineolio šalinimo efektyvumo ir NTP galios, esant skirtingiems oro srautams (25 – 200 m<sup>3</sup>/h).

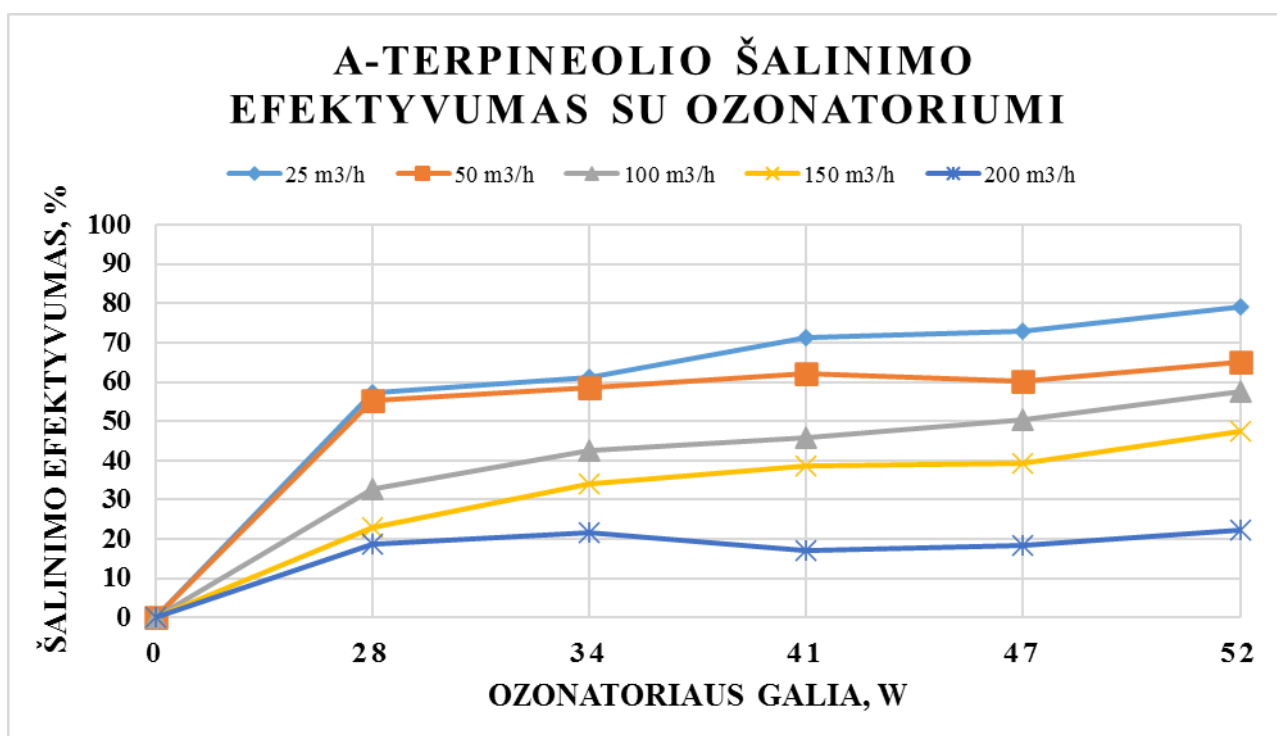
Remiantis pateiktu grafiku, galima teigti, kad geriausi rezultatai ir 99,5 proc. šalinimo efektyvumas pasiektas pasirinkus didžiausią NTP galią, tai 25 W bei mažiausią oro srautą, 25 m<sup>3</sup>/h. Mažiausias šalinimo efektyvumas 8,63 proc., pasiektas pasirinkus 5 W NTP galią ir didžiausią oro srautą 200 m<sup>3</sup>/h. Iš grafiko taip pat galime matyti didelį rezultatų išskirtinumą esant 25 m<sup>3</sup>/h oro srautui, kur šalinimo efektyvumas svyruoja nuo 58,4 proc. iki 99,5 proc. Mažiausią įtaką  $\alpha$ -terpineolio šalinimo efektyvumui turėjo 200 m<sup>3</sup>/h oro srautas, kur maksimalus efektyvumas apsiektas 18,70 proc., esant 25 W NTP galiai.

Taip pat nustatytas  $\alpha$ -terpineolio šalinimo efektyvumas (išreikštas procentine išraiška) naudojant ozonatorių. Eksperimento metu gauti rezultatai pateikti 10 lentelėje.

**10 lentelė.**  $\alpha$ -Terpineolio šalinimo efektyvumo rezultatai esant skirtingoms sąlygoms, naudojant ozonatorių.

Oro srautas, m <sup>3</sup> /h	Ozonatoriaus galia, W					
	0	28	34	41	47	52
25 m <sup>3</sup> /h	0	57,34	61,12	71,15	73,04	79,27
50 m <sup>3</sup> /h	0	55,39	58,54	62,20	60,22	65,09
100 m <sup>3</sup> /h	0	32,66	42,49	45,85	50,43	57,47
150 m <sup>3</sup> /h	0	23,09	34,05	38,77	39,41	47,44
200 m <sup>3</sup> /h	0	18,86	21,80	17,11	18,43	22,23

Pagal 10 lentelėje gautus šalinimo efektyvumo rezultatus taipogi nustatytas ryšys tarp  $\alpha$ -Terpineolio šalinimo efektyvumo ir ozonatoriaus galios, esant įvairiems oro srautams (25-200 m<sup>3</sup>/h), kuris atvaizduotas 16 paveikslėlyje.



**16 pav.** Ryšys tarp  $\alpha$ -Terpineolio šalinimo efektyvumo ir ozonatoriaus galios, esant skirtingiems oro srautams (25 – 200 m<sup>3</sup>/h).

Iš 16 grafike pateiktų duomenų galime pastebėti, kad esant 28 W ir 34 W ozonatoriaus galiai, bei 25 m<sup>3</sup>/h ir 50 m<sup>3</sup>/h oro srautams, šalinimo efektyvumas tarpusavyje stipriai nesiskyrė, šalinimo efektyvumas pasiekiamas su 28 W galia 57,34 proc. ir 55,39 proc. (1,95 proc. skirtumas) bei su 34W galia 61,12 proc. ir 58,54 proc. (2,58 proc. skirtumas). Padidinus ozonatoriaus galią pastebimi ryškesni šalinimo efektyvumo skirtumai. Didžiausias skaidymo efektyvumas 79,27 proc. pasiekiamas kuomet ozonatoriaus galia siekė 52 W ir oro srautas 25 m<sup>3</sup>/h. Pasirinkus didžiausią oro srautą 200 m<sup>3</sup>/h, pagal gautus rezultatus grafike, galime matyti jog valymo efektyvumas pasiekiamas mažiausias.

Palyginus tyrime naudotas NTP ir ozonatoriaus technologijas  $\alpha$ -terpineoliui šalinti, didžiausias šalinimo efektyvumas (99,50 proc. esant 25 W galiai ir 25 m<sup>3</sup>/h oro srauto sąlygoms) pasiekiamas naudojant NTP modelį. Naudojant abi technologijas didžiausias šalinimo efektyvumas pasiekiamas esant 25 m<sup>3</sup>/h oro srautui.

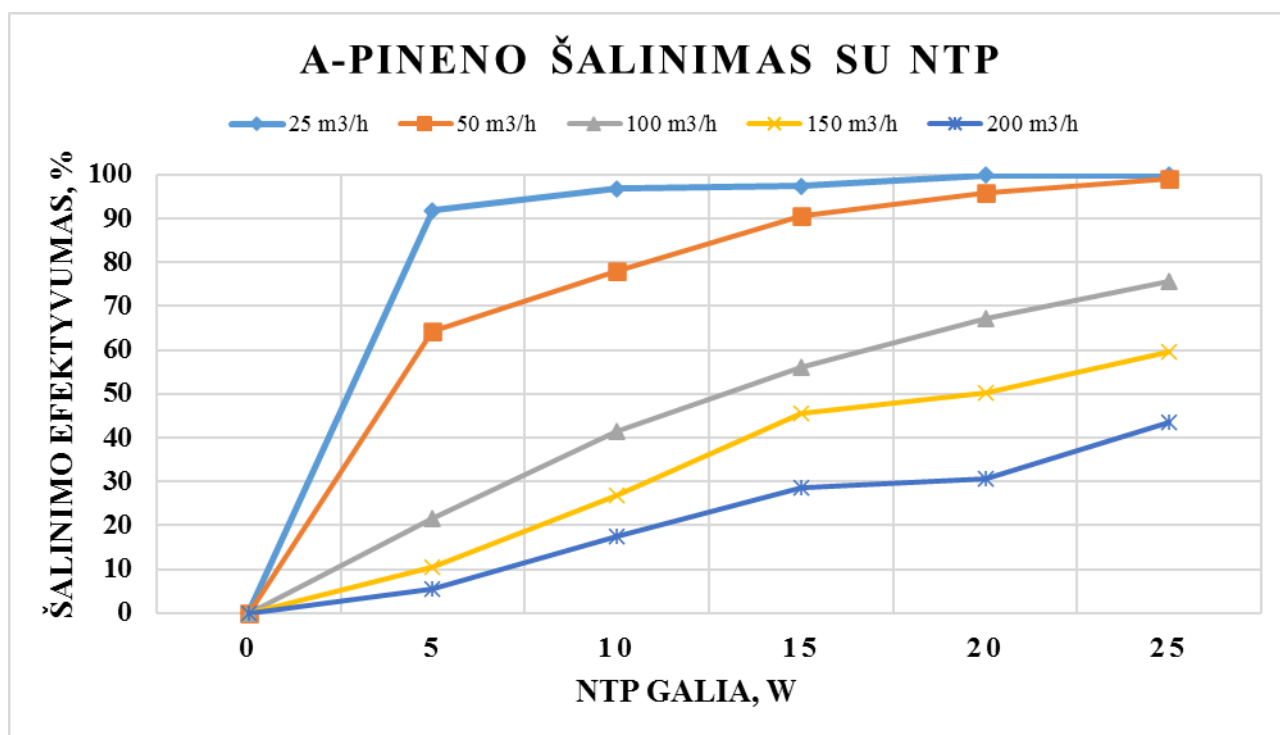
### 3.2.2. $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumas

Vienas iš tyrimo metu identifikuotų terpenų šeimos narių yra  $\alpha$ -pinenas. Eksperimento metu, pagal pirmąjį eksperimento planą gauti rezultatai išreikšti šalinimo efektyvumo procentine verte pateikti 11 lentelėje.

**11 lentelė.**  $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumo rezultatai esant skirtingoms sąlygoms, naudojant NTP.

	Oro srautas, m <sup>3</sup> /h	NTP galia, W					
		0	5	10	15	20	25
	25 m <sup>3</sup> /h	0	91,80	96,72	97,37	99,90	99,90
	50 m <sup>3</sup> /h	0	64,15	77,98	90,63	95,88	98,98
	100 m <sup>3</sup> /h	0	21,44	41,42	56,00	67,16	75,66
	150 m <sup>3</sup> /h	0	10,46	26,79	45,60	50,21	59,65
	200 m <sup>3</sup> /h	0	5,36	17,47	28,73	30,76	43,56

Pagal gautis duomenis nustatytas ryšys tarp  $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumo ir NTP galios, esant įvairiems oro srautams (25-200 m<sup>3</sup>/h) pateiktas 17 paveikslėlyje.



**17 pav.** Ryšys tarp  $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumo ir NTP galios, esant skirtingiems oro srautams (25 – 200 m<sup>3</sup>/h).

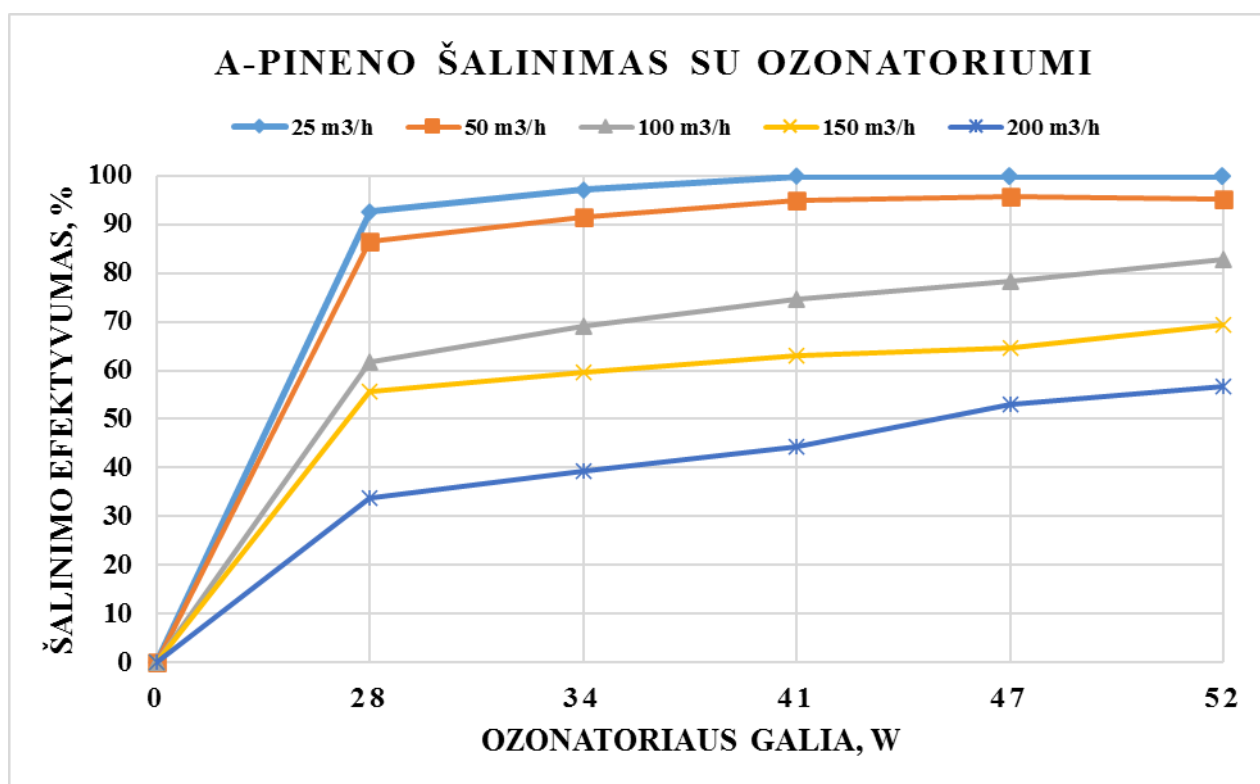
Iš gautų duomenų ir pateiktų 17 grafike galime matyti, kad geriausias šalinimo efektyvumas pasiekiamas esant 25 m<sup>3</sup>/h oro srautui ir svyruoja nuo 91,8 proc. iki 99,90 proc. (esant 25 W galiai). Taip pat labai aukštas 98,90 proc.  $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumas pasiektas esant 25 W NTP galiai ir 50 m<sup>3</sup>/h oro srautui. Mažiausi rezultatai gauti, lyginant su kitais oro srautais, kai debitas buvo 200 m<sup>3</sup>/h, šalinimo efektyvumas svyravo nuo 5,4 proc. iki 43,6 proc. Esant skirtingiems oro srautams ir 25 W NTP galiai, didžiausi  $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumo rezultatai pasiekti sekantys: su 25 m<sup>3</sup>/h – 99,90 proc., 50 m<sup>3</sup>/h – 98,98 proc., 100 m<sup>3</sup>/h – 75,7 proc., 150 m<sup>3</sup>/h – 59,7 proc., ir su 200 m<sup>3</sup>/h – 43,6 proc.

Pagal antrąją eksperimento dalį, nustatytas  $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumas, procentine išraiška, naudojant ozonatorių. Šie duomenys užfiksuoti ir pateikti 12 lentelėje.

12 lentelė.  $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumo rezultatai esant skirtingoms sąlygoms, naudojant ozonatorių.

Oro srautas, m <sup>3</sup> /h	Ozonatoriaus galia, W						
	0	28	34	41	47	52	
25 m <sup>3</sup> /h	0	92,57	97,15	99,90	99,90	99,90	
50 m <sup>3</sup> /h	0	86,43	91,63	94,88	95,73	95,18	
100 m <sup>3</sup> /h	0	61,65	69,09	74,51	78,45	82,76	
150 m <sup>3</sup> /h	0	55,66	59,54	63,07	64,60	69,29	
200 m <sup>3</sup> /h	0	33,80	39,29	44,22	52,99	56,84	

Lyginant antrąją technologiją, kuomet buvo naudojamas ozonatorius, matomi akivaizdūs skirtumai. Ryšys tarp  $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumo ir ozonatoriaus galios, esant įvairiems oro srautams (25 – 200 m<sup>3</sup>/h) pateiktas 18 paveikslėlyje.



18 pav. Ryšys tarp  $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumo ir ozonatoriaus galios, esant skirtingiems oro srautams (25 – 200 m<sup>3</sup>/h).

Iš 18 grafiko turimų duomenų galime matyti, jog 99,90 proc.  $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumas pasiekiamas esant mažiausiam oro srautui, 25 m<sup>3</sup>/h ir 41 – 52 W ozonatoriaus galiai. Maksimaliam efektyvumui pasiekti užtenka 41 W galios, tačiau naudojant NTP, buvo reikalinga didžiausia galia. Pasirinkus oro srautą 25 m<sup>3</sup>/h, šalinimo efektyvumas svyravo nuo 92,6 proc. iki 99,89 proc. Geri rezultatai gauti ir esant 50 m<sup>3</sup>/h oro srautui, kuomet šalinimo efektyvumas svyravo nuo 86,4 iki 95,2 proc. Pasirinkus 100 m<sup>3</sup>/h ir 150 m<sup>3</sup>/h oro srautus, maksimalus  $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumas esant 52 W ozonatoriaus galiai pasiekiamas atitinkamai 82,8 proc. ir 69,3 proc. Mažiausias  $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumas pasiekiamas esant didžiausiam oro srautui 200 m<sup>3</sup>/h, gauti rezultatai svyravo nuo 33,8 proc. iki 56,84 proc.

Lyginant dvi technologijas (NTP ir ozonatorių), galime pastebėti, kad  $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumas pasiekiamas aukštesnis naudojant prototipą su ozonatoriumi. Naudojant pastarąją technologiją reikalinga mažesnė galia pasiekti optimalų (99,90 proc.)  $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumą, naudojant tą patį oro srautą kaip ir su NTP technologija.

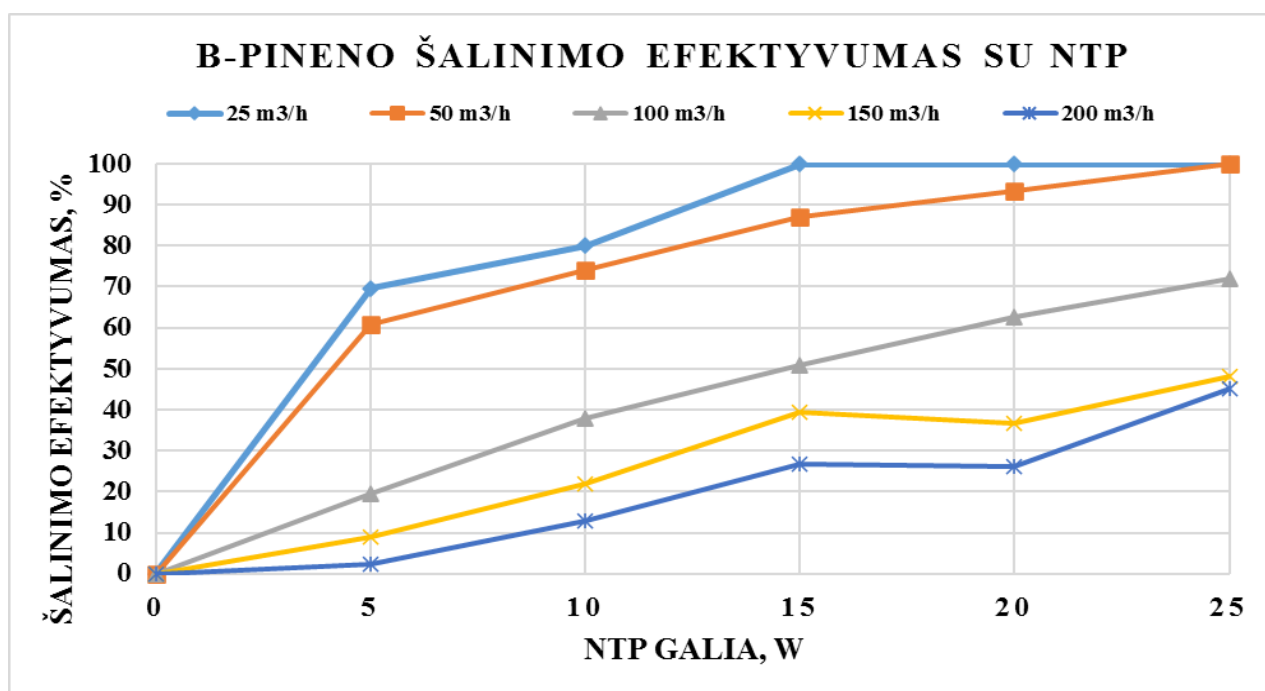
### 3.2.3. $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumas

Atlikto tyrimo metu identifiikuotas pušies medienos komponentas  $\beta$ -pinenas bei nustatytas šio junginio šalinimo efektyvumas procentine išraiška naudojant NTP. Gauti 25 skirtingi eksperimento rezultatai, esant skirtingomis sąlygomis pateikti 13 lentelėje.

13 lentelė.  $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumo rezultatai esant skirtingoms sąlygoms, naudojant NTP.

Oro srautas, m <sup>3</sup> /h	NTP galia, W					
	0	5	10	15	20	25
25 m <sup>3</sup> /h	0	69,69	80,09	99,90	99,90	99,90
50 m <sup>3</sup> /h	0	60,87	74,10	87,17	93,42	99,90
100 m <sup>3</sup> /h	0	19,63	37,77	51,00	62,67	71,97
150 m <sup>3</sup> /h	0	9,02	21,96	39,31	36,80	48,11
200 m <sup>3</sup> /h	0	2,43	12,91	26,71	26,06	45,16

Pagal turimus duomenis nustatytas ryšys tarp  $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumo ir NTP galios, esant įvairiems oro srautams, pavaizduotas 19 paveikslėlyje. Iš grafiko, galime matyti, kad  $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumas didėja esant mažesniai oro srautui ir didesnei NTP galiai. Eksperimentinėmis sąlygomis (NTP galia svyravo nuo 5 iki 25 W) pasiektas optimalus (99,90 proc.)  $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumas kuomet, pasirinktas mažiausias oro srautas 25 m<sup>3</sup>/h ir NTP galia kito nuo 15 – 25 W, esant 50 m<sup>3</sup>/h oro srauto ir 25 W galios eksperimento sąlygoms. Mažiausias  $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumas pasiektas 2,43 proc., kuomet pasirinktas didžiausias oro srautas 200 m<sup>3</sup>/h ir mažiausia 5 W galia.



19 pav. Ryšys tarp  $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumo ir ozonatoriaus galios, esant skirtingiems oro srautams (25 – 200 m<sup>3</sup>/h).

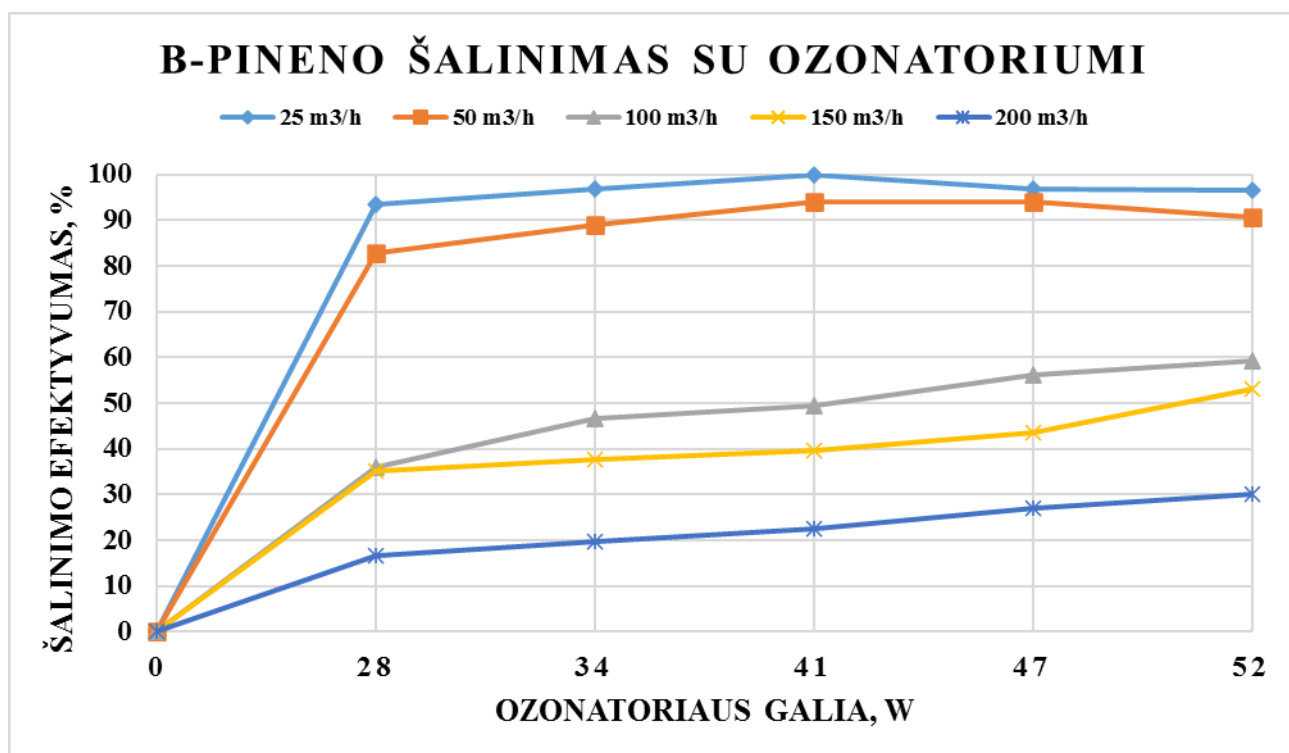
Remiantis gautais rezultatais, galime atkreipti dėmesį į tai, kad mažiausi  $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumo rodikliai pasiekti prie 200 m<sup>3</sup>/h oro srauto, o geriausi esant 25 m<sup>3</sup>/h oro srautui. Matomi akivaizdūs skirtumai, lyginant tarpusavyje skirtingus oro srautus 25/50 m<sup>3</sup>/h su 100/150/200 m<sup>3</sup>/h oro srautais, esant toms pačioms NTP galioms. Padidinus oro srautą  $\beta$ -pinenas skyla ir sudaro naujas aktyvias rūšis, todėl šalinimo efektyvumas mažėja.

Taip pat atliktas  $\beta$ -pineno šalinimo tyrimas naudojant ozonatorių, kur jo galia kito nuo 28 iki 52 W. Eksperimento metu gauti šalinimo efektyvumo rezultatai, išreikšti procentine išraiška, pateikti 14 lentelėje.

**14 lentelė.**  $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumo rezultatai esant skirtingoms sąlygoms, naudojant ozonatorių.

Oro srautas, m <sup>3</sup> /h	Ozonatoriaus galia, W						
	0	28	34	41	47	52	
25 m <sup>3</sup> /h	0	93,47	96,73	99,90	96,84	96,65	
50 m <sup>3</sup> /h	0	82,92	88,96	94,18	93,92	90,79	
100 m <sup>3</sup> /h	0	36,12	46,78	49,57	56,32	59,40	
150 m <sup>3</sup> /h	0	35,05	37,59	39,57	43,68	53,07	
200 m <sup>3</sup> /h	0	16,56	19,74	22,40	27,15	30,20	

Pagal gautus rezultatus, nustatytas ryšys tarp šalinimo efektyvumo ir ozonatoriaus galios, esant skirtingiems oro srautams pateiktas 20 paveikslėlyje. Iš grafiko galime matyti, kad 99,90 proc. efektyvumas pasiektas kuomet pasirinktas oro srautas yra 25 m<sup>3</sup>/h, o ozonatoriaus galia 41 W, tai vienintelis rezultatas, kuomet teršalas buvo optimaliai suskaidytas. Taip pat geri rezultatai pasiekti pasirinkus 50 m<sup>3</sup>/h oro srautą, kuomet šalinimo efektyvumas buvo 94,18 proc.



**20 pav.** Ryšys tarp  $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumo ir ozonatoriaus galios, esant skirtingiems oro srautams (25 – 200 m<sup>3</sup>/h).

Iš 20 grafike pateiktos informacijos taip pat galime matyti skirtumą tarp pasirinktų oro srautų. Mažiausias efektyvumas pasiekiamas esant 28 W ozonatoriaus galiai ir 200 m<sup>3</sup>/h oro srautui. Pasirinkus šį oro srautą, pasiekiamas mažiausias šalinimo efektyvumas. Tačiau galime pastebėti skirtumą, jog pasirinkus 25 m<sup>3</sup>/h oro srautą ir mažesnę galią, šiuo atveju NTP 5 W, o ozonatoriaus galia 28 W, atitinkamai valymo efektyvumas pasiekiamas su NTP 69,69 proc., o su ozonatoriumi 93,47 proc. Taigi galime teigti, jog geresnis pradinis efektyvumas pasiekiamas naudojant ozonatorių.

### 3.2.4. Terpeno junginių šalinimo efektyvumo palyginimas

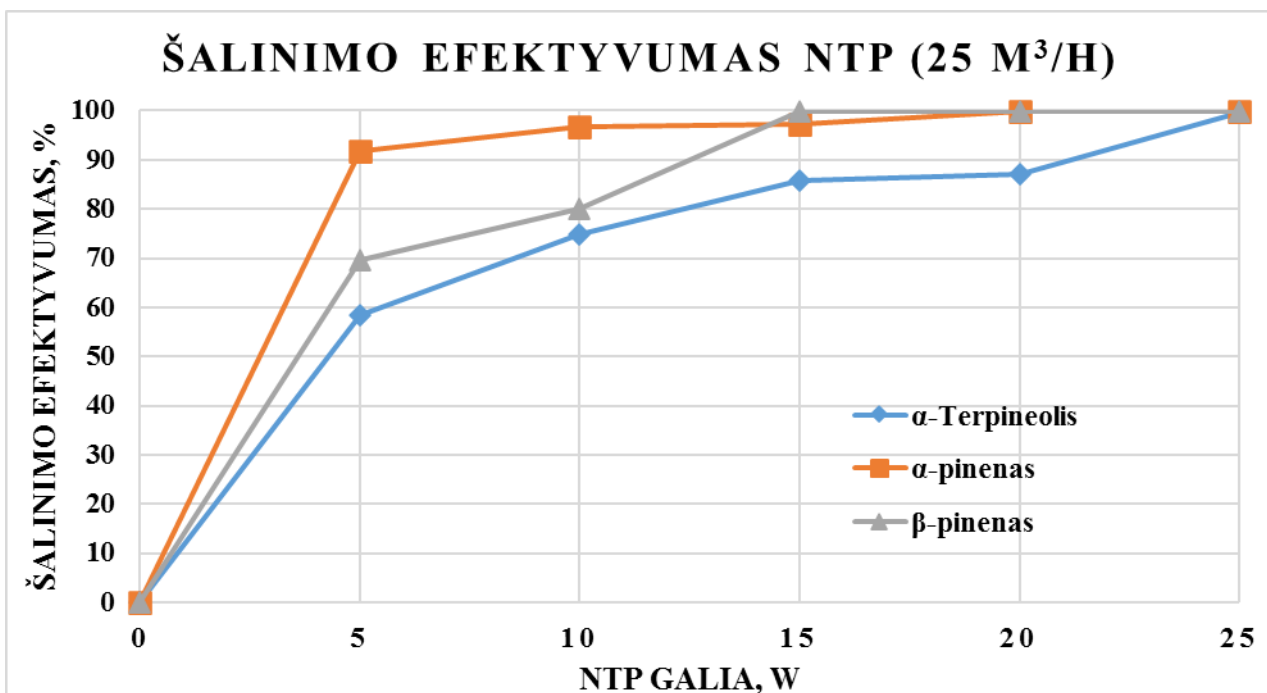
Eksperimento metu buvo tiriamas trijų pagrindinių LOJ,  $\alpha$ -terpineolio,  $\alpha$ -pineno ir  $\beta$ -pineno, šalinimo efektyvumas, kurių emisija aplinkos ore susidaro apdorojant pušies medieną. Atskirai tirtų terpenų šalinimo efektyvumas eksperimento metu svyravo nuo 2,4 proc. iki 99,99 proc. Pagal anksčiau atliktą kiekvieno teršalo šalinimo efektyvumo apžvalgą, geriausi rezultatai gauti esant 25 m<sup>3</sup>/h oro srautui, naudojant NTP bei ozonatorių. Gauti  $\alpha$ -Terpineolio,  $\alpha$ -pineno ir  $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumo rezultatai (išreikšti procentine išraiška) esant 25 m<sup>3</sup>/h oro srautui naudojant NTP ir ozonatorių pateikti 15 lentelėje.

**15 lentelė.**  $\alpha$ -Terpineolio,  $\alpha$ -pineno ir  $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumo rezultatai esant 25 m<sup>3</sup>/h oro srautui naudojant NTP ir ozonatorių.

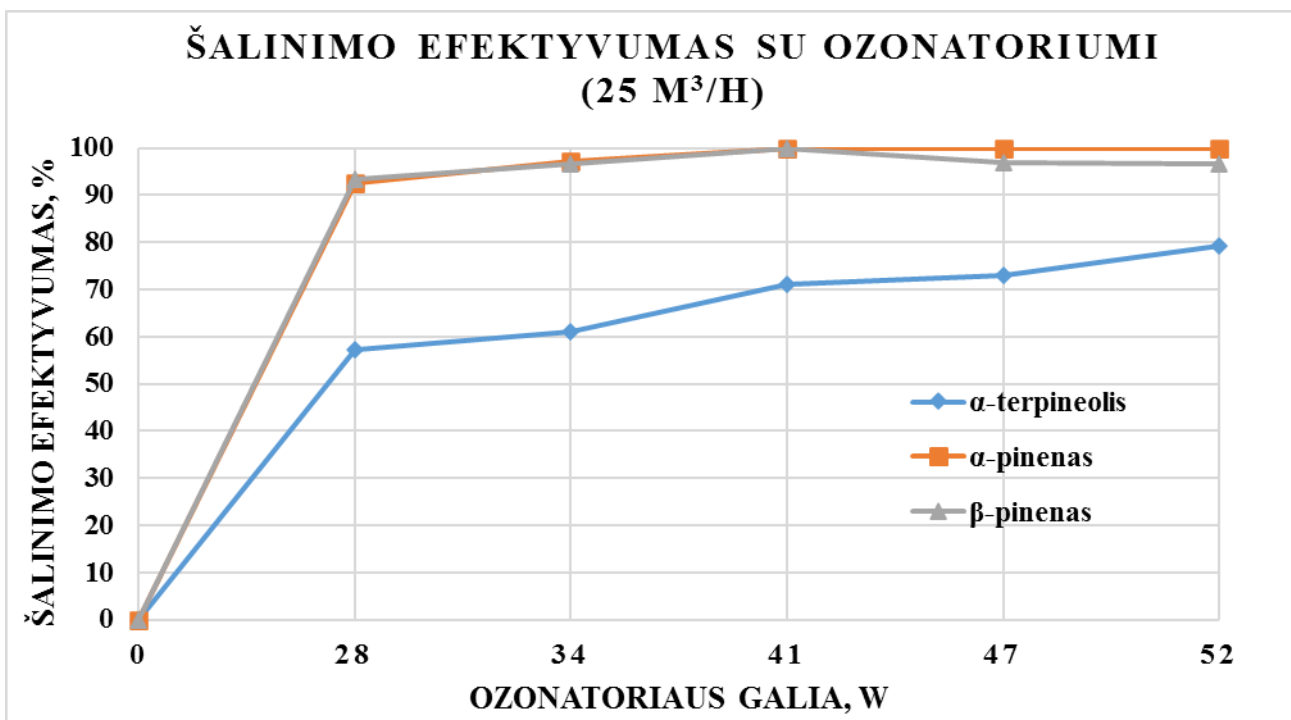
		NTP galia, W					
Teršalas		0	5	10	15	20	25
	$\alpha$ -Terpineolis	0	58,37	74,79	85,73	87,04	99,50
	$\alpha$ -pinenas	0	91,8	96,72	97,37	99,90	99,90
	$\beta$ -pinenas	0	69,69	80,09	99,90	99,90	99,90
		Ozonatoriaus galia, W					
Teršalas		0	28	34	41	47	52
	$\alpha$ -terpineolis	0	57,34	61,12	71,15	73,04	79,27
	$\alpha$ -pinenas	0	92,57	97,15	99,90	99,90	99,90
	$\beta$ -pinenas	0	93,47	96,73	99,90	96,84	96,65

Iš gautų rezultatų pastebima, kad  $\alpha$ -pinenas pasižymi didžiausiu šalinimo efektyvumu, tiek su NTP tiek su ozonatoriaus moduliais. Esant 25 W galiai ir 25 m<sup>3</sup>/h oro srautui (2,8 – 3,6 J/L) su NTP moduli ir esant 41 – 52 W galiai ir 25 m<sup>3</sup>/h oro srautui (5,9 – 7,5 J/L) su ozonatoriaus moduli, buvo pasiektas 99,90 proc.  $\alpha$ -pineno šalinimo efektyvumas (21 – 22 paveikslėliai).

$\alpha$ -Terpineolis pasižymėjo žemiausiu šalinimo efektyvumu tiek naudojant NTP, tiek ozonatorių. Eksperimento rezultatai parodė, jog teršalų pašalinimo efektyvumas daugiausia priklauso nuo naudojamo savitosios energijos šaltinio ir išbuvimo laiko valymo sistemoje, tai yra pasirinkto oro srauto. Visa tai priklauso ne tik nuo ozonatoriaus ar NTP modulių naudojamos plazmos galios, bet ir nuo tikslinių junginių cheminės struktūros.



21 pav. Ryšys tarp  $\alpha$ -terpineolio,  $\alpha$ -pineno ir  $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumo ir NTP galios, esant 25 m<sup>3</sup>/h oro srautui.



22 pav. Ryšys tarp  $\alpha$ -terpineolio,  $\alpha$ -pineno ir  $\beta$ -pineno šalinimo efektyvumo ir ozonatoriaus galios, esant 25 m<sup>3</sup>/h oro srautui.

Visi trys junginiai skirtingi, bei pasižymi skirtingomis savybėmis.  $\alpha$ -pinenas yra organinis terpeno klasės junginys, alkenas turintis reaktyvius keturis žiedus.  $\alpha$ -terpineolis yra lakusis monoterpenoidinis alkoholis, kuris pasižymi mažiau stabilesne chemine struktūra. Tiek  $\alpha$ -pinenas, tiek  $\beta$ -pinenas yra labai reaktyvūs ir reaguoja su ozonu ir kitomis plazmoje susidarantiomis



reaktyviomis rūšimis, tokiomis kaip hidroksilo radikalas arba  $\text{NO}_3$ - radikalas, dėl kurių susidaro mažo lakumo ryšiai ir formuojasi antriniai organiniai junginiai (AOJ) [27].

Ankstesni  $\alpha$ -pineno ir  $\beta$ -pineno šalinimo tyrimai buvo atliekami nedidelio masto impulsiniame koronos išlydžio reaktoriuje naudojant pradinę 800 ppm koncentraciją ir labai aukštą 0,05 kWh/m<sup>3</sup> SES. Esant šioms eksperimento sąlygoms buvo pasiektas 98 proc. LOJ pašalinimo efektyvumas [61]. Taip pat buvo atliktas eksperimentas, kurio metu buvo tirtas NTP ir filtravimo derinys, siekiant suskaidyti  $\beta$ -pineną. Vykdam šį tyrimą prototipe buvo naudojamas 50 m<sup>3</sup>/h oro srautas, o filtravimo efektyvumas siekė 75 proc. [62].

## Išvados

1. Atlikus lakiųjų organinių junginių problematikos apžvalgą galima teigti, kad siekiant kontroliuoti šiuos teršalus pramoniniuose procesuose, ne terminės plazmos technologija turi didelį potencialą. Lyginant su kitomis technologijomis kaip adsorbicija, absorbcija ar biofiltracija ne terminės plazmos technologija pasižymi maža kaina ir kompaktiška sistema, optimaliu veikimu esant plačiam lakiųjų organinių junginių koncentracijų diapazonui. Ši technologija laikoma konkurencinga dėl užterštame ore esančių LOJ aukšto pašalinimo efektyvumo ir mažo energijos suvartojimo.
2. Tyrimas atliktas naudojant prototipą, pagal sudarytą eksperimentinį planą, kuris susidėjo iš dviejų dalių (po 25 atskirus matavimus P25 ir O25 pagal kintančius parametrus). Pirmoji eksperimento dalis atlikta naudojant ne terminės plazmos modulį kuomet jos galia kito nuo 5 iki 25W, o oro srautas nuo 25 iki 200 m<sup>3</sup>/h. Antroji eksperimento dalis atlikta naudojant ozonatorių, kuomet jo galia kito nuo 28 iki 52W bei oro srautas nuo 25 iki 200 m<sup>3</sup>/h.
3. Atlikus eksperimentą nustatytas lakiųjų organinių junginių šalinimo efektyvumas taikant dvi technologijas su kintamais parametrais. Didžiausias šalinimo efektyvumas su ne terminės plazmos moduliu pasiektas 92,80 proc. esant 25 W galiai ir 25 m<sup>3</sup>/h oro srautui; su ozonatoriaus moduliu – 74,44 proc. esant 25 W galiai ir 25 m<sup>3</sup>/h oro srautui. Atsižvelgiant į gautus rezultatus galima teigti, kad didesnis šalinimo efektyvumas pasiekiamas, esant didesnei galiai ir mažesniai oro srautui, naudojant ne terminės plazmos modulį.
4. Įvertintas specifinis energijos suvartojimas, turintis įtakos LOJ šalinimo efektyvumui. Specifinės energijos vertės naudojant ne terminės modulį buvo 2,8 karto mažesnės nei naudojant ozonatoriaus modulį. Vertės su ne terminės plazmos moduliu svyravo nuo 0,09 J/L (25 W, 100 m<sup>3</sup>/h) iki 3,6 J/L (25 W, 25 m<sup>3</sup>/h), su ozonatoriumi nuo 0,5 J/L (28 W, 200 m<sup>3</sup>/h) iki 7,5 J/L (25 W, 25 m<sup>3</sup>/h). Pasiekus didžiausią lakiųjų organinių junginių šalinimo efektyvumą su ne terminės plazma specifinės energijos suvartojimo vertė siekė 3,6 J/L.
5. Nustatytas tiriamajame tirpale esančių terpeno grupės junginių šalinimo efektyvumo priklausomybė nuo proceso parametrų. Gauti šie rezultatai: α - Terpeneolio šalinimo efektyvumas pasiektas 99,50 proc. (su ne termine plazma 25 W, 25 m<sup>3</sup>); α- pineno pasiektas 99,90 proc. (su ne termine plazma 20 - 25 W, 25 m<sup>3</sup>/h ir ozonatoriumi 41 – 52 W, 25 m<sup>3</sup>/h); β- pineno šalinimo efektyvumas pasiektas 99,90 proc. (su ne termine plazma 15 - 25 W, 25 m<sup>3</sup>/h ir 25 W ir 50 m<sup>3</sup>/h ir ozonatoriumi 41 W, 25 m<sup>3</sup>/h eksperimento sąlygomis).
6. Įvertinus rezultatus, galime teigti, jog teršalų šalinimo efektyvumas daugiausia priklausė nuo naudojamo savitosios energijos suvartojimo ir išbuvimo laiko uždaroje sistemoje, tai yra pasirinkto oro srauto.

## Literatūros sąrašas

1. HU, R., et al. Odor pollution due to industrial emission of volatile organic compounds: A case study in Hefei, China. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. 2020, 246: 119075 [žiūrėta 2020-04-13]. Prieiga per [doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119075](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119075).
2. MONDAL, S. Removal of VOCs and Improvement of Indoor Air Quality Using Activated Carbon Air Filter. In: *Proceedings of National Conference on Advances in Structural Technologies (CoAST-2019)* [interaktyvus]. 2019. p. 3. (ORCID-0000000227221669).
3. TONG, R. Emission characteristics and probabilistic health risk of volatile organic compounds from solvents in wooden furniture manufacturing. *Journal of cleaner production* [interaktyvus]. 2019, 208:1096-1108 [žiūrėta 2020-04-13]. Prieiga per [doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.195](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.195).
4. KLEPEIS, N., et al. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* [interaktyvus]. 2001, 11.3: 231 [žiūrėta 2020-04-14]. Prieiga per [doi.org/10.1038/sj.jea.7500165](https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165).
5. WHEATLEY, R., et al. Effect of substrate composition on production of volatile organic compounds from *Trichoderma* spp. inhibitory to wood decay fungi. *International biodeterioration & biodegradation* [interaktyvus]. 1997, 39.2-3: 199-205 [žiūrėta 2020-04-16]. Prieiga per [doi.org/10.1016/S0964-8305\(97\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(97)00015-2).
6. VELIČ, A., et al. Modeling of Odor from a Particleboard Production Plant. *Journal of Wood Chemistry and Technology* [interaktyvus]. 2019, 1-10 [žiūrėta 2020-04-13].
7. WIDHALM, B., et al. Biotechnological approach for  $\alpha$ -pinene,  $\beta$ -pinene, and  $\Delta^3$ -carene degradation in pine wood for reduced terpene emissions from Oriented Strand Boards. *International biodeterioration & biodegradation* [interaktyvus]. 2018, 134: 103-109 [žiūrėta 2020-04-13]. Prieiga per [doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.08.010](https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.08.010).
8. SCHIAVON, M., et al. Non-thermal plasma as an innovative option for the abatement of volatile organic compounds: a review. *Water, Air, & Soil Pollution* [interaktyvus]. 2017, 228.10: 388 [žiūrėta 2020-04-13]. Prieiga per [doi.org/10.1007/s11270-017-3574-3](https://doi.org/10.1007/s11270-017-3574-3).
9. YUWONO, A.; LAMMERS, P.. Odor pollution in the environment and the detection instrumentation. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2004.
10. DONHAM, K., et al. Assessment of air quality at neighbor residences in the vicinity of swine production facilities. *Journal of agromedicine* [interaktyvus]. 2006, 11.3-4: 15-24. [žiūrėta 2019-09-13]. Prieiga per [doi.org/10.1300/J096v11n03\\_03](https://doi.org/10.1300/J096v11n03_03).
11. KAMPA, M.; CASTANAS, E.. Human health effects of air pollution. *Environmental pollution* [interaktyvus]. 2008, 151.2: 362-367 [žiūrėta 2019-09-13]. Prieiga per [doi:10.1088/1755-1315/218/1/012131](https://doi.org/10.1088/1755-1315/218/1/012131).
12. Studentų mokslinė konferencija „Jaunasis mokslininkas“, 2011, ISBN 9789955896999.
13. Aplinkos apsaugos agentūra (2004). Taršos integruota prevencija ir kontrolė. Geriausi prieinami gamybos būdai popieriaus gamybos pramonei [žiūrėta: 2019-09-14]. Vilnius, 2004, prieiga internetu [http://aaa.am.lt/naudinga/TIPK\\_gruodis/12a.doc](http://aaa.am.lt/naudinga/TIPK_gruodis/12a.doc).
14. BLEIZGYS, Rolandas; BAGDONIENĖ, Indrė; NAUJOKIENĖ, Vilma. KARVIDĖS ORO TARŠA KENKSMINGOMIS DUJOMIS IŠ ĮVAIRIŲ ŠALTINIŲ. *Veterinarija ir Zootechnika*, 2011, 56.78. ISSN 1392-2130.
15. HARTUNG, J.; WATHES, C.. Environmental impact of livestock farming in Europe. *Landbauforschung Völkenrode, special*, 2001, 226: 1-3.

16. RIBIKAUSKAS, Vytautas; VAIČIONIS, Gediminas Kazys. Mėsinių tipo galvijų tvartų mikroklimato įvertinimas. *Gyvulininkystė*, 2004, 63-75. ISSN 13926144.
17. KAMALAN, H., et al. A review on available landfill gas models. *Journal of Environmental Science and Technology* [interaktyvus]. 2011, 4.2: 79-92 [žiūrėta 2019-09-13]. Prieiga per doi: [10.3923/jest.2011.79.92](https://doi.org/10.3923/jest.2011.79.92).
18. FANG, Jing-Jing, et al. Odor compounds from different sources of landfill: characterization and source identification. *Waste Management* [interaktyvus]. 2012, 32.7: 1401-1410 [žiūrėta 2019-09-26]. Prieiga per [doi.org/10.1016/j.wasman.2012.02.013](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.02.013).
19. EASTER, C., et al. Odor and air emissions control using biotechnology for both collection and wastewater treatment systems. *Chemical engineering journal* [interaktyvus]. 2005, 113.2-3: 93-104 [žiūrėta 2019-09-26]. Prieiga per [doi.org/10.1016/j.cej.2005.04.007](https://doi.org/10.1016/j.cej.2005.04.007).
20. CHEREMISINOFF, Paul N. Air pollution control and design for industry. Routledge, 2018. ISBN 082479057.
21. CHAMBA, P.; NUNES, E. Work-related asthma among workers in the wood-processing industry: a review: allergies in the workplace. *Current Allergy & Clinical Immunology*, 2016, 29.2: 110-117. ISSN : 16093607.
22. T WIDHALM, Bernhard, et al. Reduction of aldehydes and terpenes within pine wood by microbial activity. *Holzforschung* [interaktyvus]. 2016, 70.9: 895-900 [žiūrėta 2019-09-26]. Prieiga per [doi.org/10.1515/hf-2015-0243](https://doi.org/10.1515/hf-2015-0243).
23. United States environmental protection agency. An Introduction to Indoor Air Quality. Organic Gases (Volatile Organic Compounds - VOCs), Žiūrėta 2020-03-22. Prieiga internetu <http://www.epa.gov/iaq/voc.html#Health%20Effects/>.
24. BARRO, R., et al. Analysis of industrial contaminants in indoor air: Part 1. Volatile organic compounds, carbonyl compounds, polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls. *Journal of Chromatography A*. [interaktyvus]. 2009, 1216.3: 540-566 [žiūrėta 2019-09-30]. Prieiga per [doi.org/10.1016/j.chroma.2008.10.117](https://doi.org/10.1016/j.chroma.2008.10.117).
25. Neuenschwander, U. (2010). "Mechanism of the Aerobic Oxidation of  $\alpha$ -Pinene". *ChemSusChem* (in German) [interaktyvus]. 3 (1): 75–84 [žiūrėta 2019-09-29]. Prieiga per [doi:10.1002/cssc.200900228](https://doi.org/10.1002/cssc.200900228).
26. SKULBERG, K, et al. Health and Exposure to VOCs From Pinewood in Indoor Environments. *Frontiers in Built Environment* [interaktyvus]. 2019, 5: 107 [žiūrėta 2019-10-11]. Prieiga per [doi.org/10.3389/fbuil.2019.00107](https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00107).
27. LIU, Ze, et al. Uptake and reaction kinetics of  $\alpha$ -pinene and  $\beta$ -pinene with sulfuric acid solutions. *Chemical Physics Letters* [interaktyvus]. 2010, 491.4-6: 146-150 [žiūrėta 2019-09-30]. Prieiga per [doi.org/10.1016/j.cplett.2010.04.004](https://doi.org/10.1016/j.cplett.2010.04.004).
28. Zebib, B.; Beyrouthy, Marc El; Sarfi, C.; Merah, O. "Chemical Composition of the Essential Oil of *Satureja myrtifolia* (Boiss. & Hohen.) from Lebanon". *Journal of Essential Oil-bearing Plants JEOP* [interaktyvus]. 2015, 18 (1): 248–254 [žiūrėta 2019-10-13]. Prieiga per [doi:10.1080/0972060X.2014.890075](https://doi.org/10.1080/0972060X.2014.890075).
29. KHAN, F.; GHOSHAL, A. Removal of volatile organic compounds from polluted air. *Journal of loss prevention in the process industries* [interaktyvus]. 2000, 13.6: 527-545 [žiūrėta 2019-10-15]. Prieiga per [doi.org/10.1016/S0950-4230\(00\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(00)00007-3).
30. CABEZA, I. O., et al. Biofiltration of  $\alpha$ -pinene vapours using municipal solid waste (MSW)–pruning residues (P) composts as packing materials. *Chemical engineering journal* [interaktyvus]. 2013, 233: 149-158 [žiūrėta 2019-10-15]. Prieiga per [doi.org/10.1016/j.cej.2013.08.032](https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.08.032).

31. TIWARI, Avneesh., et al. Control of Odour, Volatile Organic Compounds (VOCs) & Toxic Gases through Biofiltration—An Overview. *Int. J. Tech. Innov. Mod. Eng. Sci* [interaktyvus]. 2019, 5: 1-6. ISSN:2455-2585
32. CABEZA, I. O., et al. Biofiltration of  $\alpha$ -pinene vapours using municipal solid waste (MSW)–pruning residues (P) composts as packing materials. *Chemical engineering journal* [interaktyvus]. 2013, 233: 149-158 [žiūrėta 2020-03-12]. Prieiga per [doi.org/10.1016/j.cej.2013.08.032](https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.08.032).
33. DHAMODHARAN, K., et al. Emission of volatile organic compounds from composting: A review on assessment, treatment and perspectives. *Science of The Total Environment* [interaktyvus]. 2019, 133725 [žiūrėta 2020-02-16]. Prieiga per [doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133725](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133725).
34. KAUSELYA, K.; NARENDIRAN, R.; RAVI, R. Biofiltration Emerging Technology for Removal of Volatile Organic Compounds (VOC's)-A Review. *Int J Environ Bioener* [interaktyvus]. 2015, 10: 1-8.
35. MONDAL, S.; DE, S.; SAHA, P.. Removal of VOCs and Improvement of Indoor Air Quality Using Activated Carbon Air Filter. In: *Proceedings of National Conference on Advances in Structural Technologies (CoAST-2019)*. 2019. p. 3. (ORCID000-000227221669).
36. DEVINNY, Joseph S.; DESHUSSES, Marc A.; WEBSTER, Todd Stephen. *Biofiltration for air pollution control*. CRC press, 2017. ISBN 5982079951
37. ABROMAITIS, Vytautas, et al. LCA-BASED COMPARISON OF VOC REMOVAL FROM EXHAUST GASES BY PLASMA AND" CONVENTIONAL" END-OF-PIPE METHODS. In: *Environmental Engineering. Proceedings of the International Conference on Environmental Engineering. ICEE*. Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property, 2011. p. 1. ISBN 978-9955-28-826-8
38. WYLOCK, C., et al. Review on the potential technologies for aromas recovery from food industry flue gas. *Trends in food science & technology* [interaktyvus]. 2015, 46.1: 68-74 [2019-11-13]. Prieiga per [doi.org/10.1016/j.tifs.2015.08.002](https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.08.002).
39. REN, B., et al. Current status and outlook of odor removal technologies in wastewater treatment plant. *Waste and Biomass Valorization* [interaktyvus]. 2019, 10.6: 1443-1458 [žiūrėta 2019-11-14]. Prieiga per [doi.org/10.1007/s12649-018-0384-9](https://doi.org/10.1007/s12649-018-0384-9).
40. ZHANG, X., et al. Adsorption of VOCs onto engineered carbon materials: A review. *Journal of hazardous materials* [interaktyvus]. 2017, 338: 102-123 [žiūrėta 2019-11-15]. Prieiga per [doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.05.013](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.05.013)
41. Jan Carlson Air Pollution Control Technology Review: Condensation, Catalytic products international site. Prieiga per <https://www.cpilink.com/blog/air-pollution-control-technology-review-condensation>.
42. HAMAD, A.; FAYED, M. E. Simulation-aided optimization of volatile organic compounds recovery using condensation. *Chemical Engineering Research and Design* [interaktyvus]. 2004, 82.7: 895-906 [žiūrėta 2019-11-15]. Prieiga per [doi.org/10.1205/0263876041596724](https://doi.org/10.1205/0263876041596724)
43. JOHNSON, M., et al. Gas-phase advanced oxidation for effective, efficient in situ control of pollution. *Environmental science & technology* [interaktyvus]. 2014, 48.15: 8768-8776 [žiūrėta 2020-02-23]. Prieiga per [doi.org/10.1021/es5012687](https://doi.org/10.1021/es5012687).
44. FENG, X., et al. Synergistic effects and mechanism of a non-thermal plasma catalysis system in volatile organic compound removal: a review. *Catalysis Science & Technology* [interaktyvus]. 2018, 8.4: 936-956 [žiūrėta 2019-11-29]. Prieiga per [doi: 10.1039/C7CY01934C](https://doi.org/10.1039/C7CY01934C).

45. MATSUMOTO, T., et al. Non-thermal plasma technic for air pollution control. Air pollution-a comprehensive perspective [interaktyvus]. 2012 [žiūrėta 2020-01-13]. Prieiga per [doi.org/10.5772/50419](https://doi.org/10.5772/50419).
46. SCHMIDT, M., et al. Non-thermal plasma based decomposition of volatile organic compounds in industrial exhaust gases. International journal of environmental science and technology [interaktyvus]. 2015, 12.12: 3745-3754 [žiūrėta. Prieiga per [doi.org/10.1007/s13762-015-0814-1](https://doi.org/10.1007/s13762-015-0814-1)].
47. ADNEW, G., et al. Gas-phase advanced oxidation as an integrated air pollution control technique. *AIMS Environmental Science* [interaktyvus]. 2016, 3.1: 141 [žiūrėta 2020-01-13]. Prieiga per [doi: 10.3934/environsci.2016.1.141](https://doi.org/10.3934/environsci.2016.1.141).
48. SCHIAVON, M., et al. Air pollution control through biotrickling filters: a review considering operational aspects and expected performance. *Critical reviews in biotechnology*, [interaktyvus]. 2016, 36.6: 1143-1155 [žiūrėta 2019-11-17]. Prieiga per [doi.org/10.3109/07388551.2015.1100586](https://doi.org/10.3109/07388551.2015.1100586).
49. MOHAMED, E., et al. Biofiltration technology for the removal of toluene from polluted air using *Streptomyces griseus*. *Environmental technology* [interaktyvus]. 2016, 37.10: 1197-1207 [žiūrėta 2019-11-17]. Prieiga per [doi.org/10.1080/09593330.2015.1107623](https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1107623).
50. HE, Chi, et al. Recent advances in the catalytic oxidation of volatile organic compounds: a review based on pollutant sorts and sources. *Chemical reviews* [interaktyvus]. 2019, 119.7: 4471-4568 [žiūrėta 2020-01-14]. Prieiga per [doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00408](https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00408).
51. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2014, 53, 49, 19304-19312 (Article). Publication Date (Web): December 1, 2014 [žiūrėta 2020-02-24]. Prieiga per [doi.org/10.1021/ie503851q](https://doi.org/10.1021/ie503851q).
52. LIU, G., et al. UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: An efficient aqueous advanced oxidation process for VOCs removal. *Chemical Engineering Journal* [interaktyvus]. 2017, 324: 44-50 [žiūrėta 2020-02-24]. Prieiga per [doi.org/10.1016/j.cej.2017.04.105](https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.04.105).
53. JOHNSON, M., et al. Gas-phase advanced oxidation for effective, efficient in situ control of pollution. *Environmental science & technology* [interaktyvus]. 2014, 48.15: 8768-8776 [žiūrėta 2020-01-29]. Prieiga per [doi.org/10.1021/es5012687](https://doi.org/10.1021/es5012687).
54. KOČÍ, K., et al. Degradation of styrene from waste gas stream by advanced oxidation processes. *CLEAN–Soil, Air, Water* [interaktyvus]. 2019, 47.8: 1900126 [žiūrėta 2020-02-25]. Prieiga per [doi:10.1002/clen.201900126](https://doi.org/10.1002/clen.201900126).
55. Trinh, Q.H.; Mok, Y.S. Effect of the adsorbent/catalyst preparation method and plasma reactor configuration on the removal of dilute ethylene from air stream. *Catal. Today* [interaktyvus]. 2014, 256, 170–177 [žiūrėta 2020-03-02]. Prieiga per [doi.org/10.1016/j.cattod.2015.01.027](https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.01.027)
56. SCHIAVON, M., et al. Non-thermal plasma assisting the biofiltration of volatile organic compounds. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. 2017, 148: 498-508 [žiūrėta 2020-01-30]. Prieiga per [doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.008](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.008).
57. NÓBREGA, PH A.; ROHANI, V.; FULCHERI, L. Non-thermal plasma treatment of volatile organic compounds: A predictive model based on experimental data analysis. *Chemical Engineering Journal* [interaktyvus]. 2019, 364: 37-44 [žiūrėta 2019-11-29]. Prieiga per [doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.100](https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.100).
58. WANG, B., et al. The mechanism of non-thermal plasma catalysis on volatile organic compounds removal. *Catalysis Surveys from Asia* [interaktyvus]. 2018, 22.2: 73-94 [žiūrėta 2019-12-03]. Prieiga per [doi.org/10.1007/s10563-018-9241-x](https://doi.org/10.1007/s10563-018-9241-x).

59. SONG, Young-Hoon, et al. Effects of adsorption and temperature on a nonthermal plasma process for removing VOCs. *Journal of electrostatics* [interaktyvus]. 2002, 55.2: 189-201 [žiūrėta 2020-02-03]. Prieiga per [doi.org/10.1016/S0304-3886\(01\)00197-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(01)00197-8).
60. DEMIDIOUK, V.; MOON, S. I.; CHAE, J. O. Toluene and butyl acetate removal from air by plasma-catalytic system. *Catalysis Communications* [interaktyvus]. 2003, 4.2: 51-56 [žiūrėta 2020-04-11]. Prieiga per [doi.org/10.1016/S1566-7367\(02\)00256-X](https://doi.org/10.1016/S1566-7367(02)00256-X).
61. SOBACCHI, Mario G., et al. Experimental Assessment of Non-Thermal Plasma Techniques for Removal of Paper Industry VOC Emissions. In: *Proc. 15th Int. Symp. on Plasma Chemistry* [interaktyvus]. 2001. p. 3135-3140 [žiūrėta 2020-04-12]. Prieiga internetu: [https://www.researchgate.net/profile/Alexander\\_Gutsol/publication/237296508\\_EXPERIMENTAL\\_ASSESSMENT\\_OF\\_NONTHERMAL\\_PLASMA\\_TECHNIQUES\\_FOR\\_REMOVAL\\_OF\\_PAPER\\_INDUSTRY\\_VOC\\_EMISSIONS/links/542e44460cf29bbc126f0572/EXPERIMENTAL-ASSESSMENT-OF-NON-THERMAL-PLASMA-TECHNIQUES-FOR-REMOVAL-OF-PAPER-INDUSTRY-VOC-EMISSIONS.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Alexander_Gutsol/publication/237296508_EXPERIMENTAL_ASSESSMENT_OF_NONTHERMAL_PLASMA_TECHNIQUES_FOR_REMOVAL_OF_PAPER_INDUSTRY_VOC_EMISSIONS/links/542e44460cf29bbc126f0572/EXPERIMENTAL-ASSESSMENT-OF-NON-THERMAL-PLASMA-TECHNIQUES-FOR-REMOVAL-OF-PAPER-INDUSTRY-VOC-EMISSIONS.pdf)
62. OGNIER, S., et al. SFGP 2007--A New Concept for the Abatement of Volatile Organic Compounds by a Two-Stage Process Combining Non-Thermal Plasma Treatment and Filtration. *International Journal of Chemical Reactor Engineering* [interaktyvus]. 2008, 6.1 [žiūrėta 2020-04-15]. Prieiga per [doi.org/10.2202/1542-6580.1687](https://doi.org/10.2202/1542-6580.1687).