



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS

Karolina Kručaitė

**BOTANINĖS FILTRACIJOS SISTEMA PATALPŲ ORO
VALYMUI**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Violeta Kaunelienė

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS

**BOTANINĖS FILTRACIJOS SISTEMA PATALPŲ ORO
VALYMUI**

Baigiamasis magistro projektas
Pramoninė biotechnologija (kodas 621J70004)

Vadovas

Doc. dr. Violeta Kaunelienė

Recenzentas

Dr. Edvinas Krugly

Projektą atliko

Karolina Kručaitė

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

Karolina Kručaitė

(Studento vardas, pavardė)

Pramoninė biotechnologija, kodas 621J70004

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Botaninės filtracijos sistema patalpų oro valymui“
AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA

20 _____ m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Karolinos Kručaitės**, baigiamasis projektas tema „Botaninės filtracijos sistema patalpų oro valymui“ 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)

TURINYS

SANTRAUKA	7
SUMMARY	8
SANTRUMPOS	9
IŽANGA.....	10
1. LITERATŪROS APŽVALGA.....	12
1.1 Bonaninės biofiltracijos progresavimas.....	12
1.2 Efektyviausi biofiltrai	13
1.3 Biologinės sistemos konfigūracija.....	16
1.4 Pašalinimo mechanizmas.....	18
1.4.1 LOJ pašalinimas antžeminėmis augalo dalimis	18
1.4.2 LOJ pašalinimas mikroorganizmais.....	19
1.4.3 Augalų rūšys	20
1.4.4 Šviesos įtaka LOJ skaidymui	20
1.4.5 Temperatūros įtaka LOJ skaidymui	22
1.5 LOJ matavimo būdai	23
1.5.1 LOJ matavimas liepsnos jonizacijos metodu.....	23
1.5.2 Fotometriniai metodai	24
2. MEDŽIAGOS IR TYRIMŲ METODAI.....	26
2.1 Tiriamieji augalai.....	26
2.2 Tiriamos cheminės medžiagos.....	26
2.3 Tyrimo eiga.....	26
2.4 Rezultatų apdorojimas	28
2.5 Augalų lapų ploto apskaičiavimas	28
3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS	30
3.1 Kameros išsivėdinimas	30
3.2 Bioskaidymo efektyvumas	30
3.3 Skaidymo reakcijos greitis.....	34
3.4 Botaninės filtracijos sistemos taikymas patalpoje	36
4. REKOMENDACIJŲ DALIS.....	38
IŠVADOS.....	39
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	40

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Scheminis, vazoninių augalų, botaninės biofiltracijos sistemos vaizdas.....	11
1.2 pav. Botaninė biofiltracijos sistema.....	17
1.3 pav. Šviesos intensyvumo poveikis formaldehido pašalinimo kiekiui Indijos oleandre.....	22
1.4 pav. LJD taikymo dujų analizei schema.....	24
1.5 pav. Fotometro veikimo principinė schema.....	25
1.6 pav. Bendroji PID jutiklio schema.....	26
2.1 pav. Kameros brėžinys.....	28
2.2 pav. Aeroqual IQM 60.....	28
2.3 pav. Lapo ploto apskaičiavimas ImageJ programa.....	30
3.1 pav. TCE išsivėdinimo iš kameros kreivės.....	31
3.2 pav. LOJ koncentracijų mažėjimas naudojant skirtingus augalus ir apšvietimo sąlygas.....	32
3.3 pav. Pateiktas grafikas su augalų absorbcijos efektyvumu išreikštais procentais.....	33
3.4 pav. Augalų efektyvumas esant skirtingiems LOJ ir skirtingiems šviesos šaltiniams.....	34
3.5 pav. Efektyvumų palyginimas esant skirtingoms koncentracijoms.....	34
3.6 pav. Skaidymo reakcijos greitis.....	36
3.7 pav. Reakcijos greičių konstantų palyginimai esant skirtingom sąlygom.....	37
4.1 pav. Eksperimento struktūrinė schema.....	38

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Efektyviausiai orą valantys augalai.....	7
3.1 lentelė. Tolueno pašalinimas dienos šviesoje per 6,5 val.....	26
3.2 lentelė. Reakcijų sąlygos ir greičio konstantos.....	27
3.3 Lentelė. Patalpos duomenys.....	28

Kručaitė, Karolina. Botaninė filtracijos sistema patalpų oro valymui. Magistro baigiamasis projektas / vadovė doc. dr. Violeta Kaunelienė; Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): technologijų mokslai, biotechnologijos.

Reikšminiai žodžiai: LOJ, vidaus oras, biofiltracija, oro valymas, augalai.

Kaunas, 2018. 43 p.

SANTRAUKA

Daugumos patalpų oras yra užterštas lakiais organiniais junginiais, kurie išsiskiria iš statybinių medžiagų, baldų, švaros ar asmeninės higienos priemonių. Tai kelia riziką žmonių sveikatai. Jau senai žinoma, kad augalai gali būti naudojami oro valymui. Atsižvelgiant į jau atliktus tyrimus, į mūsų krašto klimatą bei ekonominius aspektus, galima konstatuoti vieni iš tinkamiausių oro valymui yra Gebenė lipikė (lot. *Hedera helix*) bei Benjamino fikusas (lot. *Ficus benjamina*).

Šiame darbe atlikti oro valymo efektyvumo tyrimai, į kamerą patalpinus biofiltrą (gebenę lipikę (lot. *Hedera helix*) bei Benjamino fikusą (lot. *Ficus benjamina*) ir lakųjį junginį (toluoną arba TCE). Bandymų metu iš aplinkos į kamerą ir iš jos buvo traukiamas oras 1 l/min greičiu. Matavimai atlikti esant pradinėms teršalo koncentracijoms – 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ir 303 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ir skirtingoms apšvietimų sąlygoms (dienos šviesa, dirbtinė šviesa, tamsa). Efektyviausiai toluoną visomis sąlygomis skaidė fikusas, o TCE – gebenė. Didžiausias tolueno skaidymo efektyvumas buvo naudojant fikusą ir apšviečiant jį dirbtine šviesa. Šiuo atveju koncentracija sumažėja 9 kartus, lyginant su kontrole ir pasiekė 89,7 % efektyvumą. Gebenei dirbtinėje šviesoje skaidant toluoną koncentracija sumažėja iki 12,73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (70,4 % efektyvumas). Nustatyta, kad fikusas TCE neskaido.

Didžiausias reakcijos greitis nustatytas fikusui skaidant toluoną dirbtinėje šviesoje, reakcijos greičio konstanta buvo $9,5 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$. Lėčiausiai reakcija vyko gebenei lipikei absorbuojant toluoną dienos šviesoje.

Norint pilnai išvalyti 12 m², 32,5 m³ dydžio naujos statybos patalpą nuo lakių organinių junginių, išsiskiriančių iš statybinių medžiagų, pakanka 20 vnt. vidutinio dydžio (lapijos plotas 0,14 m²) gebenės lipikės arba 2,8 m² gebenės lipikės lapijos ploto sienelės.

Kručaitė, Karolina. *Botanical filtration of indoor gaseous pollutants*. Final Master's project / supervisor doc. dr. Violeta Kaunelienė; Faculty of Chemical Technology, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Technological Sciences, Biotechnology

Keywords: VOCs, indoor air, biofiltration, air cleaning, plants

Kaunas, 2018. 43 pages.

SUMMARY

Most indoor environments are polluted by volatile organic compounds originating from building materials, furniture, cleaning or personal care products. This poses risk to human health. Many investigations demonstrated that plant can be used for purification of indoor air. Based on the literature review, climatic conditions and economic factors, it may be concluded that ivy (*Hedera helix*) and ficus (*Ficus benjamina*) are one of the most suitable plants for indoor air purification.

In this study effectiveness of toluene and TCE decomposition by ivy (*Hedera helix*) and ficus (*Ficus benjamina*) in a test chamber was investigated. During the measurement campaigns air was pumped through the chamber at a flow rate 1 l/min. Measurements were done at two different initial concentrations - 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 303 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ as well as different light conditions (daylight, artificial light and darkness).

At all light conditions the ficus was more effective to decompose toluene, while the ivy was more effective in case of TCE. The highest decomposition effectiveness was achieved in case of ficus under artificial light. Compared to initial the concentration of toluene was reduced 9 times, the effectiveness of 89,7 % was reached. The ivy under artificial light reduced concentration of toluene to 12,73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (70,4 % effectiveness). It was estimated that in case of ficus decomposition of TCE is not happening.

Decomposition reaction rates were calculated. The highest reaction rate was in case of ficus under artificial light, the rate constant was $9,5 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$. The lowest reaction rate was estimated to be for the decomposition by ivy in daylight.

It was calculated that for decomposition of volatile organic compounds originating from building materials in newly constructed building at a room of 12,5 m^2 size (32,5 m^3), 20 pot ivy plants (foliage area 0,14 m^2) or 2.8 m^2 foliage area is sufficient.

SANTRUMPOS

LOJ – lakieji organiniai junginiai

TCE – trichloretilenas

LJD – Liepsnos jonizacinis detektorius

PID – fotojonizacijos detektorius

IŽANGA

Yra ištirta, kad išsivysčiusiose šalyse žmonės didžiąją dalį savo laiko, t.y apie 85–90%, praleidžia, vidaus patalpose (tiek gyvenamosiose patalpose, tiek viešose erdvėse). Tai gali paaiškinti tiesioginį ryšį tarp patalpų oro kokybės ir visuomenės sveikatos rizikos [1]. JAV Aplinkos apsaugos agentūra patalpų oro kokybę (POK) pripažino viena iš penkių visuomenės sveikatos problemų sukelėjų. Patalpų oro teršalai, tokie kaip: smulkios dalelės, lakieji organiniai junginiai (LOJ), aerozoliai ir dujiniai junginiai, prisideda prie prastos patalpų oro kokybės. Intensyvi pramonės veikla taip pat daro neigiamą poveikį žmogaus sveikatai ir gali sukelti ūmias ir lėtines ligas. Pasireiškiantys akių, nosies, odos dirginimai, alergija, kvėpavimo sutrikimimai, galvos skausmas ir nuolatinis nuovargis yra vienas iš labiausiai tipišku indikatorių, nurodančių blogą patalpų oro kokybę („sergantis pastato sindromas“ (SPS)) [2].

Patalpų oro teršalai susidaro iš įvairių šaltinių, pavyzdžiui: įvairios medžiagos, namų ūkio gaminiai, gyvūnai, požeminiai garažai, iš lauko patenkantys šaltiniai bei patalpose įvykstančios cheminės reakcijos. Ypač šimtai lakiųjų organinių junginių (LOJ), kuriuos sudaro: alifatiniai ir aromatiniai angliavandeniliai, alkoholiai, aldehidai ir chloruoti junginiai, išsiskiria ir į patalpų orą patenka iš baldų, kilimų, statybos medžiagų, aerozolių, valymo priemonių [3]. Neorganiniai dujiniai junginiai (NDJ) tokie kaip: anglies monoksidas (CO), anglies dioksidas (CO₂), azoto oksidai (NO_x) ir sieros dioksidas (SO₂), yra gaunami iš iškastinio kuro deginimo, žibalo šildytuvų, dujinių prietaisų, tokių kaip: kaip krosnys, orkaitės, medienos krosnys, dujiniai karšto vandens šildytuvai, taip pat tabako dūmai bei iš lauko patenkantys šaltiniai, taip pat kelių transportas, elektrinės, naftos perdirbimo įmonės. Nors individualių teršalų lygis patalpose paprastai yra mažesnis nei nustatyta leistina riba, tačiau jungtinis teršalų lygis (sinergetinis ir ilgalaikis jų poveikis), yra pagrindinė priežastis, galinti sukelti sveikatai kenksmingas ligas [4].

Visame pasaulyje yra skiriama daug dėmesio patalpų oro prevencijai didinti (IAQ standartų įdiegimas, emisijos reguliavimas, gyventojų edukacija) ir atsinaujinančių oro valymo sistemų vystymui. Dažniausiai pasitaikančios oro valymo sistemos yra skirtos dalelių šalinimui (mechaniniai filtrai, mechaniniai nusodintuvai), o ne dujiniams junginiams šalinti. Dujinių junginių pašalinimas naudojant dabartines technologijas (adsorbcijos filtrus, ozono generatorius) yra brangus ir neefektyvus pasirinkimas. Dujinės fazės filtrai turi trumpą tarnavimo laiką ir nėra efektyvūs daugialypių dujų pašalinimui, katalizatoriai yra neefektyvūs, o ozono generatoriai yra potencialiai nesaugūs. Priešingai tam, botaninė filtracija, naudojant pagrįstas augalų sistemas, gali būti perspektyvi alternatyva tradiciniams metodams. Augalai turi didelį potencialą šalinant daugelį patalpų ore esančių teršalų, tokių kaip lakieji organiniai junginiai, dulkės, neorganiniai ir organiniai dujų junginiai [5].

Tikslas: ištirti botaninės filtracijos sistemos, skirtos patalpų oro valymui, efektyvumą ir taikymo galimybes

Uždaviniai:

1. Eksperimentiškai nustatyti tolueno ir TCE skaidymo efektyvumą naudojant gebenę lipikę (lot. *Hedera helix*) ir Benjaminio fikusą (lot. *Ficus benjamin*) skirtingomis apšvietimo sąlygomis.
2. Apskaičiuoti gebenės lipikės (lot. *Hedera helix*) ir Benjaminio fikuso (lot. *Ficus benjamin*) skaidymo reakcijos greičius.
3. Pateikti rekomendaciją botaninės filtracijos sistemų taikymui patalpose.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Bonaninės biofiltracijos progresavimas

Patalpų oro kokybė (POK) – itin svarbus, bet lygiagrečiai sunkiai kontroliuojamas veiksnys, kuris daro didelę įtaką patalpų mikroklimatui ir žmonių komfortui. Taip pat aplinkoje yra tam tikras priemaišų kiekis, kurio dalis neišvengiamai patenka į patalpų vidų ir susimaišo su teršalais, jau išsiskyrusiais iš patalpose esančių teršalų šaltinių. Bone ir kiti (2010) patalpų oro taršos šaltinius siūlo klasifikuoti pagal išskiriamos taršos pobūdį:

1. aktyviuosius taršos šaltinius (žmogaus metabolizmo reakcijų produktai, ventiliacija, maisto gaminimas, rūkymas, oro gaiviklių ir buitinės chemijos naudojimas ir kiti);
2. pasyviuosius taršos šaltinius (kilimai/kiliminės dangos, baldai, vinilo tapetai, statybinės medžiagos ir kiti).

Mokslininkai pastebėjo, kad patalpose esantis oras gali būti užterštas kelis kartus labiau negu aplinkos oras. Nustatyta, kad tokį orą tenka valyti papildomai naudojant atitinkamus valymo būdus, prietaisus ar filtrus, kurie gali būti brangūs ar neekonomiški. Vienas natūraliausių oro teršalų šalinimo būdų yra vėdinimas arba ventiliacija. Trūkumas, kad dažniausiai ventiliacija yra brangi dėl šildymo ar šaldymo poreikio, be to ventiliacija gali tiekti teršalus iš lauko [6]. Tai pat, yra atrasta nemažai technologijų, kuriomis galima išvalyti patalpų orą: mechaninė filtracija [7], dujinių medžiagų adsorbicija [8], fotokatalizė [9], naudojant plazmą [10]. Tokius įrenginius sunku įdiegti į paprastų žmonių namus ar biurus, todėl imtasi ieškoti kitų, paprastiems žmonėms prieinamų, priemonių.

Vis labiau populiarėjanti ekologiška bei ekonomiška oro valymo alternatyva siekiant sumažinti aerozolio dalelių ir kitų dujinės fazės teršalų – botaninė biofiltracija. Per praėjusį dešimtmetį botaninė biofiltracija sulaukė vis didesnio pripažinimo. Tam galėjo turėti įtakos ekonominiai, aplinkosauginiai ar socialiniai veiksniai, taip pat ir didėjantis potencialas ateityje būti įtrauktiems tiek į tradicinių namų, tiek į draugiškų aplinkai namų statybas. Botaninė biofiltracija yra draugiški aplinkai biofiltrai su integruotais žaliais augalais, kurie naudoja savo rizosferos mikroorganizmus (natūralūs mikroorganizmai, kurie gyvena augalo šaknų zonoje) teršalo pašalinimui iš judančio teršalų srauto [11]. Botaninė biofiltracija yra biofiltravimo ir fitoremediacijos hibridas. Biofiltrai yra bioreaktoriai tada, kai užterštas oras ar vandens srautas yra aktyviai perleidžiami per didelio biologinio aktyvumo zoną. To rezultate teršalai, taikant šiuos biologinius procesus, yra neutralizuojami. Augalai dažnai buvo naudojami dirvožemio ir vandens užterštiems plotams valyti nuo sunkiųjų metalų, trąšų (nitrātų ir amonio), naftos išsiliejimo ir tirpiklių. Fitoremediacija yra laikoma neinvazine aplinkos valymo alternatyva, be to tai yra iki dešimt kartų ekonomiškė valymo būdas nei tradicinės technologijos. Vienas iš pirmųjų fitoremediacijos veiksmingumo

įrodymų įvyko 1996 metais, JAV, kur tuopos medžiai buvo panaudoti chloruotiems LOJ pašalinti iš gruntinių vandenų [12].

Per 1980 – uosius NASA mokslininkai pateikė keletą vazoninių gėlių tyrimą, kuriame atsispindi jų gebėjimas pašalinti LOJ (lakiuosius organinius junginius) iš patalpų oro statinėmis sąlygomis. Nepaisant šio atradimo tolesnio progreso, fitoremediacijoje nebuvo matyt. Vėliau, tik 1990-aisiais ir ankstyvaisiais 2000-aisiais bendra komanda iš Guelph universiteto, Sidnėjaus universiteto, Australijos ir Gruzijos universitetų, JAV pradėjo kelias dideles tyrinėjimo programas patalpų oro valymo srityje naudojant augalus ir su jais susijusius rizosferos mikroorganizmus. Tačiau ši programa buvo susitelkta į LOJ bet ne į neorganinių dujinių junginių pašalinimą. Botaninis biofiltro modelis, kuris buvo specialiai suprojektuotas LOJ pašalinimui iš patalpų oro, buvo sėkmingas ir parodė gerus rezultatus, todėl yra tikimasi panašių rezultatų neorganinių dujinių junginių šalinime [13].

1.2 Efektyviausi biofiltrai

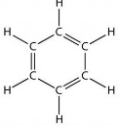
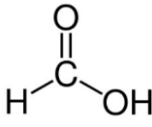
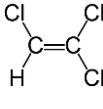
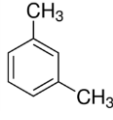
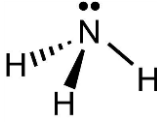
Dažniausiai NASA asocijuojasi su kosminiais erdvėlaviais, raketomis ar planetomis, tačiau 80-ųjų pabaigoje JAV vyriausybė suvienijo jėgas su aplinkos apsaugos organizacija tam, kad efektyviausiai ištirtų nuo toksinių medžiagų orą valančius augalus. Tyrime, kurį atliko Dr. B. C. Wolverton nustatyta, kad tam tikri augalai veiksmingai filtruoja benzeno, amoniako, tolueno, formaldehido bei kitus teršalus, kenksmingus mūsų sveikatai. Tyrime dalyvavo 15 skirtingų augalų rūšių. Kiekvienas augalas absorbuoja vis kitą ore esantį teršalą (1.1 pav.). Pagrindiniai tirti teršalai ir jų poveikis žmogaus sveikatai:

- Benzenas – labai plačiai naudojamas tirpiklis, kuris dalyvauja daugelyje bazinių elementų sudėtyje įskaitant benzina, dažus, alyvą, dažytą plastiką bei kaučiuką. Taip pat jis naudojamas ploviklių, sprogmenų, dažiklių gamyboje ir farmacijoje. Jau seniai žinoma, kad benzenas dirgina odą, akis, jis taip pat gali sukelti leukemiją. Be to buvo atliktų tyrimų, kurie parodė mutageninį poveikį bakterijų ląstelių kultūroms. Dažnas kontaktas su oda gali sukelti jos sausėjimą, uždegimą, pūslių atsiradimą ir dermatitą. Pastebėta, kad įkvėptas didelis kiekis benzeno sukelia galvos svaigimą, silpnumą, euforiją, galvos skausmą, pykinimą, miglotą regėjimą, kvėpavimo takų ligas, nereguliarų širdies plakimą, kepenų ir inkstų pažeidimus, paralyžių bei sąmonės netekimą. Ilgalaikis sąlytis su netgi santykinai žemais benzeno kiekiais sukelia apetito praradimą, mieguistumą, nervingumą, psichinius sutrikimus ir kraujo sistemos ligas, įskaitant anemiją ir kaulų čiulpų ligas.
- Formaldehidas – labai reaktyvi cheminė medžiaga, randama beveik visose patalpose. Pagrindiniai šaltiniai, kuriuose randama formaldehido yra putų izoliacinė medžiaga, medžio drožlių plokštės ar presuotos medienos produktai. Taip pat, gaminiai iš popieriaus,

įskaitant maisto maišelius bei vaškuotus popierius, veido valymui skirtos servetėlės ir vienkartiniai rankšluosčiai yra apdorojami karbmino formaldehido dervomis. Formaldehidas įeina į buitinių valymo priemonių sudėtį. Karbmino formaldehido dervos naudojamos kaip standinimo, riebalų šalinimo, antipirenas ir lipni rišamoji medžiaga grindų dangoje, kiliminėje dangoje bei drabužiuose. Kiti šaltiniai yra tokie kaip: cigarečių dūmai ir šildymo bei kepimo kuras – gamtinės dujos. Formaldehidas dirgina akių, nosies ir gerklės gleivines, gali sukelti alerginį dermatitą. Labiausiai paplitę šios cheminės medžiagos veikimo simptomai yra viršutinių kvėpavimo takų ir akių dirginimas, taip pat galvos skausmas. Iki dabar žinomas sunkiausias poveikis – astma.

- Trichloretilenas (TCE) – yra komercinis produktas, skirtas įvairioms pramonės šakoms. Daugiau nei 90 proc. pagaminto TCE naudojama metalo riebalų šalinimui ir sauso valymo pramonėje, taip pat naudojamas spaustuvių dažų, dažų, lako ir klijų gamyboje. 1975 m. Nacionalinis vėžio institute dirbantys mokslininkai teigia, kad ši cheminė medžiaga yra stiprus kepenų kancerogenas [14].
- Ksilenas – randamas spaudos, gumos, odos ir dažų pramonėje, tabako dūmuose, automobilių išmetamosiose dujose. Simptomai pasireiškia trumpalaikiu poveikiu. Sudirginama burnos, gerklės gleivinė, juntamas galvos svaigimas, skausmas, sumišimas, gali pasireikšti širdies veiklos sutrikimai, kepenų ir inkstų pažeidimas bei ištikti koma.
- Amoniakas – randamas langų valymo skystyje, grindų vaške, kvapniosiose druskose, trašose. Simptomai susiję su trumpalaikiu poveikiu. Būdingas akių dirginimas, kosulys, gerklės skausmas [15].

1.1 lentelė. Efektyviausiai orą valantys augalai. Pilki langeliai pažymi skaidomą LOJ.

Nr.	Pavadinimas	Teršalas				
		Benzenas	Formaldehidas	TCE	Ksilenas	Amoniakas
						
1.	Žemasis finikas (lot. <i>Phoenix robelenii</i>)					
2.	Ilgalapis inkstapartis (lot. <i>Nephrolepis exaltata</i>)					
3.	Karališkasis papartis (lot. <i>Nephrolepis obliterated</i>)					
4.	Kuokštini chlorofitas (lot. <i>Chlorophytum comosum</i>)					
5.	Bambukinė palmė (lot. <i>Chamaedorea seifritzii</i>)					
6.	Benjamino fikusas (lot. <i>Ficus benjamina</i>)					
7.	Skindapas (lot. <i>Epipremnum aureum</i>)					
8.	Kolumbinis anturis (lot. <i>Anthurium andraeanum</i>)					
9.	Lapuotė palmė (lot. <i>Rhapis excelsa</i>)					
10.	Džeimsono gerbera (lot. <i>Gerbera jamesonii</i>)					
11.	Kvapioji dracena (lot. <i>Dracaena fragrans 'Massangeana'</i>)					
12.	Gebenė lipikė (lot. <i>Hedera helix</i>)					
13.	Raudonkraštė dracena (lot. <i>Dracaena marginata</i>)					
14.	Vėzdūnė (lot. <i>Spathiphyllum "Mauna Loa"</i>)					
15.	Kininė chrizantema (lot. <i>Chrysanthemum morifolium</i>)					

Tyrimo rezultatai parodė ir ne veltui „gėlių mama“ praminta kininė chrizantema kartu su Vėzdūne pasirodė esančios veiksmingiausios ir sėkmingai iš patalpos išvalė benzeną, formaldehidą, trichloreteną, ksileną, tolueną ir amoniką.

Nors tyrimai šia tema vis dar atliekami, tačiau išvados bei tyrimų rezultatai iki šiol yra laikomi pačiais išsamiausiai ir tiksliausiai (14).

1.3 Biologinės sistemos konfigūracija

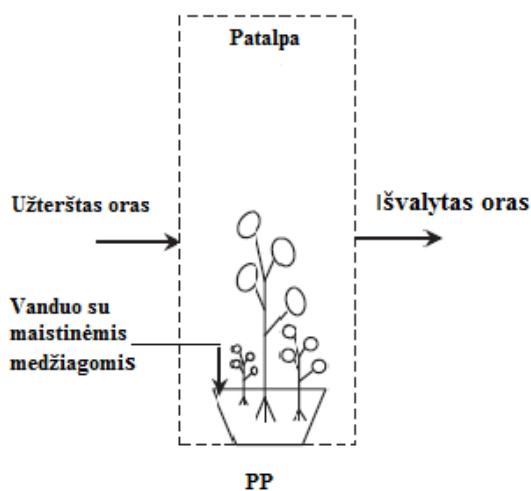
Biologinės sistemos gali būti apibūdinamos kaip bioreaktoriai, kurie pagrįsti biofiltracijos metodu, todėl jų konfigūracija yra susieta su biofiltracijos tipu. Aktyvi biofiltracija gali būti apibrėžta kaip biologinių procesų naudojimas siekiant pašalinti teršalus iš oro ar vandens srauto, kuris aktyviai priverstas veikti daugiau mažiau nenutrūkstamu režimu. Šis procesas biofiltracijos sistemoje (pvz.: biofiltrai, biodrėkinimo filtrai, bioskruberiai), yra atliekamas mikroorganizmais, augalų rizosferos mikroorganizmais arba augalais – padėjėjais (pvz.: botaniniai biodrėkinimo filtrai). Dar vienas procesas gali būti atliekamas pasyviai (pvz.: biodanga, žali stogai, vazoniniai augalai) [16].

Kadangi yra žinoma, kad augmenija ir mikroorganizmai veikia kaip oro teršalų „kempinė“ vaidinant pasyvaus biologinio filtro vaidmenį, tai reiškia, kad visa jie prisideda prie natūralaus, mus supančio oro išvalymo nepaisant teršalus ardančių sinergetinių aplinkybių (slėgio svyravimo tarp įvairių aplinkos komponentų, kritulių kiekio, vėjo greičio, biologinio aktyvumo) [17].

Iki šiol ištirtos botaninės biosistemos dujinams teršalams šalinti gali būti klasifikuojamos į dvi kategorijas: vazoniniai augalai (PPs) (angl. k. – *plotted – plants*) ir augalai-padėjėjai (botaninis) biodrėkinimo filtrai (PBTFs) (angl. k. – *plant – assisted (botanical) biotrickling filters*).

- **Vazoniniai augalai (PPs)**

Vazoniniai augalai, oro teršalams, veikia kaip pasyvus biofiltras ir apima nutraukiamą vandens ir maistingų medžiagų tiekimą. Laboratorinio eksperimento metu, buvo parodyta, kad vazoniniai augalai esantys oro teršalų poveikio patalpoje, leidžia sekti teršalų biologinį įsisavinimą ir degradaciją (1.1 pav.) [18].

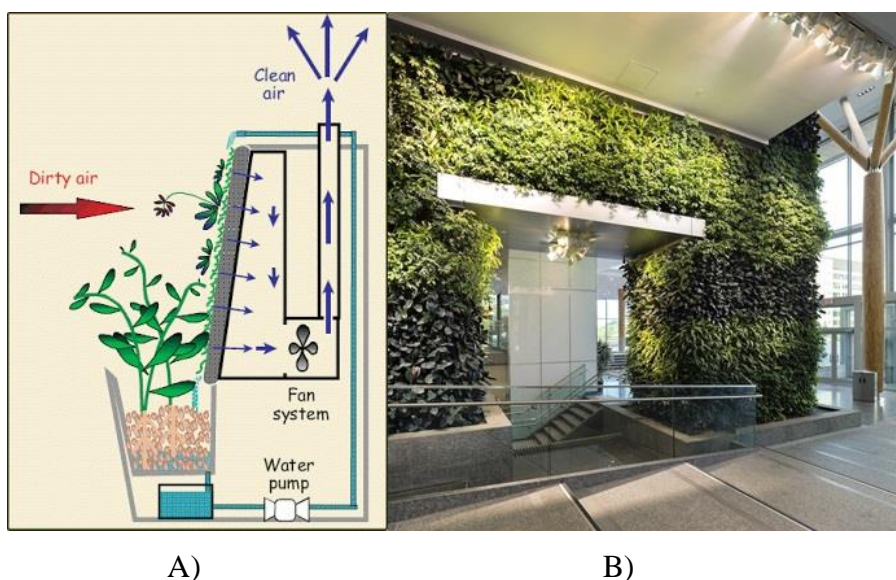


1.1 pav. Scheminis, vazoninių augalų, botaninės biofiltracijos sistemos vaizdas

- **Augalai – padėjėjai (botaniniai) biodrėkinimo filtrai (PBTFs)**

Botaninė biofiltravimo sistema (1.2 pav.) sudaryta iš biodrėkinimo filtrų, hidroponinių augalų ir pakavimo medžiagos, kuri yra reikalinga šaknų palaikymui. Sistema yra nuolat veikianti užterštu oru bei drėkinama maisto medžiagomis. To pasekoje vyksta biologinis įsisavinimas, degradacija bei įvyksta galutinis rezultatas – teršalų pašalinimas. Hidroponiniai augalai (augalų auginimas vandenyje, praturtintame mineralinėmis medžiagomis nenaudojant dirvožemio) yra tradicinių augalų auginimo alternatyva, kuri išsprendžia dirvožemio problemas bei sunkią vazoninių augalų priežiūrą. Praktiškai PBTFs labiau tinka vidaus patalpų oro gryninimui nei PPs, nes ji sustiprina dujų apykaitą ir padidina teršalų pašalinimo našumą [19]. Ši technologija buvo išvystyta Guelp'o universitete, Kanadoje, LOJ pašalinimui iš patalpos dinaminėmis sąlygomis [17].

Pasirinkimas tarp PPs ir PBTFs priklauso nuo kelių faktorių, tokių kaip: finansinė situacija, alokacija ar infrastruktūra. PPs yra paprasčiausios struktūros ir geriausia ekonominė investicija, kuriai nereikia infrastruktūros pakeitimų. VAI pasyviai pašalina patalpų ore esančius teršalus lėčiau nei PBTFs, kurie teršalus šalina aktyviai. Todėl tiek PPs, tiek PBTFs gali būti naudojami mažų teršalų koncentracijų šalinimui, tačiau PBTFs yra veiksmingesnis nei PPs, kuomet reikia apdoroti didelį oro srautą [20].



1.2 pav. Botaninė biofiltracijos sistema. A) Pavaizduota PBTFs sistema – biofiltras yra modifikuota, vertikali hidroponika. Vandens pompos pagalba, vanduo cirkuliuoja iki sienos viršaus, per šaknų sistemą ir grįžta atgal į vandens rezervuarą. Užterštas oras įtraukiamas per šaknis ir padedant ventiliacijos sistemai. Kai oras pereina šaknų sistemos terpę, teršalai yra suskaidyti terpėje esančių mikroorganizmų. Išvalytas oras grįžta atgal į aplinką [21]. B) Pavaizduota, kaip biofiltracija pritaikoma praktiškai

1.4 Pašalinimo mechanizmas

Bendrai botaninės biofiltracijos procesą apima penki pagrindiniai mechanizmai:

1. rizosferos bioskaidymas (paremtas mikroorganizmais),
2. fitoekstrakcija (augalų pagalba pašalinama pavojingi/toksiniai elementai iš dirvos ar vandens),
3. žiotelių sugertis,
4. fitodegradacija (audiniuose vykstanti fermentinė katalizė),
5. fitovotilizacija (tiesioginis išgarinimas iš lapų arba netiesioginė augalų transpiracija).

Šie mechanizmai yra nulemti fizinių – cheminių procesų. tokių kaip: dujinių teršalų absorbcija tirpale, augalų adsorbicija, augalų kapiliarinė difuzija iš šaknų į aukštesnius augalo elementus [22]. Dalis mokslininkų teigia, kad teršalų įsisavinimas augale prasideda nuo šaknų sistemos iš vandens ar dirvožemio arba per žioteles, jei šaknų tinklas yra neprieinamas. Įdomu tai, kad esant sąveikai augalas – mikroorganizmai – teršalai, rizosferos mikroorganizmai palaiko augalų gyvavimą užterštoje dirvos aplinkoje, tačiau tuo pačiu esant apribotoms sąlygoms konkuruoja dėl maisto medžiagų. Tarp rizosferos mikroorganizmų gausiausiai yra bakterijų, grybų, pirmuonių ir dumblių. Pagrindinės bakterijos, siekiančios padidinti augalo augimą, yra šios: *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Azotobacter*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Serratia*, ir *Rhizobium* [23].

Šiame darbe aprašoma kokią įtaką turi/neturi natūralūs aplinkos poveikiai: šviesos intensyvumas, temperatūra, lakiųjų organinių junginių šalinimo priklausomybė nuo antžeminių augalo dalių (lapo žiotelių, kutikulės), požeminių augalo dalių (šaknys, mikroorganizmai) bei augalo rūšies, lakiesiems organiniam junginiam (LOJ) pašalinti.

1.4.1 LOJ pašalinimas antžeminėmis augalo dalimis

Antžeminės augalo dalys, per kurias gali būti šalinami lakieji organiniai junginiai (angl. VOCs), yra augalo žiotelės bei kutikulė. Buvo atliktas formaldehido įsisavinimo per žioteles tyrimas, kuris parodė, kad LOJ šalinimo intensyvumas yra tiesiškai susijęs su padidėjusiu žiotelių laidumu Indijos Oleandre (lot. *Nerium indicum*) [24]. Rezultatai buvo gauti matuojant transpiracijos intensyvumą. Kadangi vėjo greitis buvo išlaikomas pastovus, manyta, kad transpiracijos greičio padidėjimas yra lygus žiotelių laidumo padidėjimui. Tani ir kt. (2007) teigė, kad metilizobutilketono tarpląstelinė koncentracija buvo didesnė kai žiotelių laidumas buvo didesnis, todėl autorė teigia, kad įsisavinimas priklauso nuo žiotelių. Taip pat tyrimai parodė, kad virš žeminėse augalo dalyse formaldehido, benzeno ir tolueno pašalinimas šviesoje yra didesnis

nei tamsoje, todėl daroma prielaida, kad šie junginiai patenka per žioteles, nes šviesos fazėje jos yra atviros, o tamsoje uždarnos.

Pastebėta, kad tam tikruose augaluose LOJ šalinimas vyksta ir nakties metu. Tai atspindi tai, kad yra kitas jiems būdingas pasisavinimo kelias [25]. Paprastai didžioji dalis augalų sugeria ir naudoja CO₂ dienos metu, kuomet žiotelės yra atviros, tačiau augalai, kurie sugeria CO₂ nakties metu, o metabolizuoja jį dienos metu, yra vadinami CAM augalais. Tai reiškia, kad tokie augalai turi žioteles, kurios yra atviros nakties metu ir uždarnos dienos metu [26]. Tačiau po kol kas yra atlikta per mažai tyrimų, kad būtų galima tvirtai teigti, kad LOJ šalinimas ir gauti rezultatai yra būtent vien žiotelių dėka. Prie LOJ šalimo gali prisidėti ir augalo šaknys, mikroorganizmai, augimo terpė.

Tyrimai, nagrinėjantys tiesioginį žiotelių ir kutikulės vaidmenį, atskleidė jų abiejų veikimą vienu metu. Pavyzdžiui ¹⁴C benzenas ir toluenas daugiausia yra įsisavinami per žioteles, bet esminis jų įsisavinimas yra per kutikulę *Vitis vinifera*, *Malus domestica*, and *Acer campestre* augaluose. Taip pat buvo atliktas bandymas teršalų pasisavinimui įrodyti: augalo lapas buvo paliktas plūduriuoti ant vandens. Šiuo būdu buvo galima pamatyti skirtumą tarp įsisavinimo per kutikulę, kutikulę ir žioteles, kadangi žiotelės yra tik ant apatinės lapo dalies. [27]. Trukdantis veiksnys šiame bandyme yra junginių susiskaldymas vandenyje ir tolimesnė sorbcija pro apatinę lapo pusę, kuri yra vandenyje. Tikėtina, kad tai tik minimali rizika ir įtakos rezultatams neturėtų būti.

LOJ yra pašalinami iš aplinkos, tačiau jie kaupiasi augaluose, o didelis jų sancaupų kiekis augalams gali sukelti žalingus padarinius. Yra pastebėtas benzeno kaupimasis obelių ir gervuogių lapuose, o taip pat ir jų vaisiuose. To pasėkoje ilgas ir nuolatinis tokių vaisių vartojimas gali sukelti įvairias ligas [28].

1.4.2 LOJ pašalinimas mikroorganizmais

Mikroorganizmai, gyvenantys vazoninių gėlių dirvoje, atlieka esminį vaidmenį šalinant LOJ iš patalpų oro. Bakterinė kultūra, gauta iš augalo dirvožemio, sąveikaudama su benzeno galėtų būti atsakinga už viso LOJ pašalinimą augalų/dirvožemio sistemoje. Bakterijų skaičius augalų dirvožemyje, kuris buvo veikiamas benzeno – nepakito lyginant su skaičiumi prieš poveikį, tačiau pasikeitė bakterijų bendruomenė. Pasikeitusią bendruomenę, kaip benzeno poveikio rezultatą, taip pat pastebėjo Irga ir kiti [29]. Wolverton ir Wolverton [30] nustatė, kad GRAM⁻ bakterijos, tokios kaip *Pseudomonas*, yra atsakingos už didelę LOJ pašalinimo normą. Nuo *Hoya carnosa* ir *Fittonia verschaffeltii* var. *Argyroneura* dirvožemio buvo gauta atitinkamai 12 ir 30 izoliuotų bakterijų. Augalai buvo auginami identiška kambarinių augalų ir daržo derinyje ir 2 mėnesius buvo nuolat veikiami toluenu. Iš 42 bakterijų 23 buvo charakterizuotos ir net 97–100 % turėjo sekos panašumų

su 8 žinomų bakterijų padermėmis, tokiomis kaip: *Microbacterium aerolatum* padermė V – 73 ir *Paenibacillus tundra* padermė Ab10b. Iš 5 izoliuotų bakterijų buvo patvirtintas jų gebėjimas mineralizuoti tolueną [31].

Benzeno, tolueno, ksileno pašalinimo normos buvo padidėjusios kai augalai buvo pasėti su bakterijomis, kurios buvo paimtos iš augalų su dideliu šalinimo potencialu iš augimo terpės. Kai *Azalea indica* lapai buvo inokuliuoti, *Pseudomonas* TVA8, 95 % pašalinimo laikas sumažėjo lyginant be inokuliacijos. Kai inokuliacija buvo taikoma į substratą, pašalinimo efektyvumas tapo stabilus, todėl buvo pasiūlyta, kad lapų skaidymas, mikrobinė degradacija į šaknis ir filosferinių mikroorganizmų padidėjimas gali būti svarbūs faktoriai LOJ pašalinimui [32]. Taigi, šie pavyzdžiai rodo, kad mikroorganizmai yra svarbūs vazoninių augalų gebėjime šalinti LOJ.

1.4.3 Augalų rūšys

Gerai žinoma, kad LOJ pašalinimo kiekiai taip pat priklauso nuo augalo rūšies. Buvo atlikti du tyrimai, kuriuose buvo tiriamas santykis tarp augalų taksonomijos ir LOJ pašalinamo kiekio [33]. Tyrime naudotos 28 augalų rūšys iš 15 šeimų, kad būtų nustatytas benzeno, tolueno, octano, trichloretileno pašalinimas. Nors reikšmingų skirtumų tarp *Araliaceae* ir *Araceae* šeimų nėra, tyrimas atskleidė, kad *Araliaceae* šeimos nariai turi aukštesnes pašalinimo normas nei *Araceae* šeimos narių šalinimo normos. Kim ir kt. [25] tyrė formaldehido pašalinimą iš skirtingų 86 rūšių augalų, kurie buvo suskirstyti į penkias kategorijas.

Iš vaistažolių kategorijos, paparčiai, pasižymėjo didžiausia formaldehido pašalinimo norma. Sumedėję lapiniai augalai, žoliniai augalai ir korėjiečių gimtieji augalai yra panašūs tarpusavyje, tačiau jų šalinimo normos yra mažesnės nei paparčių ir vaistinių augalų [25]. Kadangi pokytis kiekvienoje grupėje buvo ganėtinai didelis, užtikrintai tvirtinti, kad rezultatai yra reikšmingi, negalima.

Ankščiau minėtos grupės yra per plačios, kad būtų galima išskirti skirtumus tarp augalo rūšių. Tačiau pagrindiniai diferenciacijos faktoriai tarp augalų rūšių gali būti: 1) lapo parametrai, tokie kaip: žiotelių parametrai, vaško sluoksnis ar plaukeliai, kurie daro įtaką LOJ difuzijai į lapus; 2) gebėjimas saugoti ir kaupti LOJ. Jin ir kiti pranešė, kad didesnis žiotelių tankumas ir didėjantis katalazės aktyvumas po formaldehido poveikio buvo pagrindinė priežastis didesniai formaldehido pašalinimui vaistinėje melisoje lyginant su Angliškąją gebene [34].

1.4.4 Šviesos įtaka LOJ skaidymui

Šviesa – vienas svarbiausių gyvybinių veiksnių augalams. Tai ne tik vienintelis natūralus energijos šaltinis fotosintezei – įvairūs šviesos fizikiniai parametrai augalus veikia kaip informacijos šaltinis, nulemiantis jų augimo ir vystymosi kryptingumą. Sudėtinga ir kompleksinė

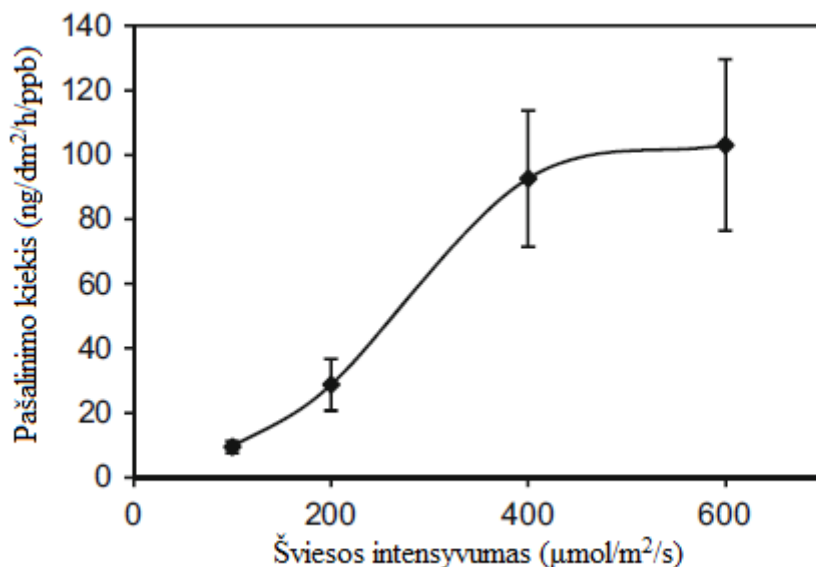
fotoreceptorių sistema (chlorofilai, karotinoidai, fitochromai, kriptochromai, fototropinai ir kt. receptoriai) reaguoja į šviesos spektro kitimus, srauto intensyvumą, spindulių kritimo kampą, fotoperiodo trukmę ir kt. Šviesos parametrų kitimas sukelia įvairius morfogenetinius pokyčius, daro įtaką fotosintezės sistemos veiklai, metabolizmo reakcijoms, tačiau šis skirtingų rūšių augalų efektas skiriasi [35]. Yra duomenų, kuriais remiantis galima daryti prielaidą, kad šviesos intensyvumas turi teigiamą įtaką LOJ pašalinimo efektyvumui, pavyzdžiui: Indijos oleandras (*Nerium indicum*) parodė aiškius formaldehido pašalinimo kiekius didėjant šviesos intensyvumui (1.3 pav.) [36].

Šviesos intensyvumo poveikis ne visada yra tiesiškas. Didėjantis šviesos intensyvumas ir didėjantis LOJ šalinimo efektyvumas pastebimas esant ant žemai tolueno koncentracijai 8,669 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Priešingai, esant didelei 43,345 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tolueno koncentracijai, didėjantis šviesos intensyvumas, įtaką LOJ pašalinimo sumažėjimą nuo 12,62 % iki 5,11% per 3 val. periodą. Daroma prielaida, kad toks LOJ pašalinimo sumažėjimas gali būti susijęs su toksiškumu ar augalo apribotu metaboliniu našumu. Šviesos intensyvumui esant žemesnėse koncentracijose nei 9 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, formaldehido šalinimo efektyvumas nepakito.

Šviesa daugeliu atvejų suteikia teigiamą rezultatą šalinant LOJ. Didėjant šviesos intensyvumui iki prisotinamumo, didėja žiotelių laidumas ir tuomet į augalą pro žioteles gali patekti didesnis kiekis LOJ [37]. LOJ taip pat turi gerą patekimą į augalą pro kutikulę, bet didėjantis šviesos intensyvumo poveikis gali būti mažiau akivaizdus nei patekimas į kutikulę, kuomet ji nepaveikta šviesos. Nepaisant to yra tikimasi, kad LOJ pašalinimas padidėja kuomet didėja žiotelių laidumas ir jos daugiau prasivėrusios, nes tuomet teršalų įsisavinimas yra didesnis. Tačiau yra atlikta keletas tyrimų, kuriuose aprašoma apie augalus, kuriems šviesa neturėjo jokio žymaus poveikio. Šis šviesos atsako trūkumas, manoma, yra susijęs su mikroorganizmų veikla, kuri yra pagrindinė veikla šalinant LOJ [38]. Taip pat yra tikimybė, kad toks lakusis organinis junginys kaip formaldehidas gali būti fotochemiškai degraduotas, ko pasėkoje gali būti sudėtingiau gauti teisingus šviesos poveikio tyrimo rezultatus šalinant LOJ.

Šviesos poveikis uždaroje patalpose yra ribojamas, nes paprastai jis siekia maždaug 9–14 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ [39]. Ši šviesos norma daugeliui augalų yra per žema fotosintezės veiklai palaikyti, todėl uždaroje patalpose yra svarbi augalo buvimo vieta. Toje vietoje, kurioje šviesos srautas yra didesnis, didėja augalo gebėjimas šalinti LOJ tiek tiesioginiu būdu per žioteles, tiek netiesioginiu

būdu – mikroorganizmais, kurie sukelia šaknų sunkimąsi dėl padidėjusios fotosintezės.



1.3 pav. Šviesos intensyvumo poveikis formaldehido pašalinimo kiekiui Indijos oleandre [24]. Vidurkis \pm SD, n=4

1.4.5 Temperatūros įtaka LOJ skaidymui

Augalų fiziologiniai procesai yra tiesiogiai susiję su temperatūros ir drėgmės režimu bei jų kaita. Tai vieni pagrindinių aplinkos veiksnių, nuo kurių priklauso augalų augimo ir vystymosi procesai bei produktyvumas. Aukštesnė temperatūra jau savaime sukelia stresa. Net keliais laipsniais aukštesnė nei įprasta temperatūra veikia daugelio fermentų funkcijas ir sukelia baltymų ekspresiją. Aukštesnė temperatūra pagreitina augalo augimą ir vystymąsi. Pirmasis ir jautriausias augalų atsakas į vandens deficitą yra turgoro sumažėjimas ir augimo procesų sulėtėjimas. Dėl vandens trūkumo sumažėja anglies pasisavinimas, kuris priklauso nuo žiotelių varstymosi [40]. Be to, vandens trūkumas ir aukšta temperatūra gali skatinti laisvųjų radikalų bei aktyvių deguonies darinių formavimąsi, kurie pažeidžia augalų metabolizmo procesus. Augalų reakcija į temperatūros bei drėgmės pokyčius priklauso nuo augalų rūšies, veislės, genetinių savybių, amžiaus ir išsivystymo lygio. Skirtingai išsivystę augalai į stresą sukeliančius veiksnius reaguoja skirtingai. Pastebėta, kad augalai, prisitaikę prie vieno stresoriaus, tampa atsparesni ir kompleksiniam kelių stresorių poveikiui [41].

Didėjanti temperatūra turi įvairų poveikį teršalų šalinimui. Atliktas tyrimas su žemaūge palme (*Phoenix roebelenii*), kuri buvo veikiamą formaldehidu 21–26 °C temperatūroje. Gauta tendencija, kad šalinimo efektyvumas didėja didėjant temperatūrai [36], tačiau paveikus formaldehidu 21–27 °C temperatūroje, pašalinimo efektyvumas tabako augaluose (*Nicotiana tabacum*) nepasikeitė. Velnio gebenė (*Epipremnum aureum*) paveikta formaldehidu 12–25 °C

temperatūroje parodė ir sumažėjimą, ir nuolatinį šalinimo efektyvumą. Nustatyta, kad optimali šalinimo temperatūra yra 21°C [42].

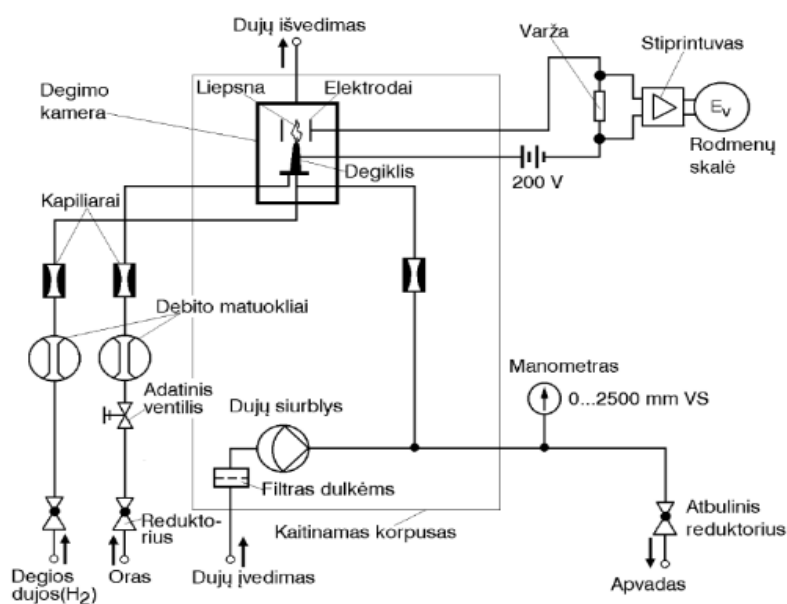
Didėjanti temperatūra padidina kutikulės laidumą, o to pasekoje tai gali turėti įtakos LOJ šalinimo efektyvumui, nes padidėja LOJ difuzijos koeficientas augale. Didėjanti temperatūra taip pat turi įtakos mikroorganizmų augimui dirvožemyje, kurie suvartoja atitinkamą kiekį LOJ [43].

1.5 LOJ matavimo būdai

1.5.1 LOJ matavimas liepsnos jonizacijos metodu

Analizuojant lakiuosius organinius junginius yra atliekamas jų molekulių jonizavimas liepsnoje. Organinės molekulės galima jonizuoti ir radioaktyviuoju švitinimu, kuris yra naudojamas kai kurių dujinių chromatografo detektoriuose.

Liepsnos jonizacinis detektorius (LJD) anksčiau buvo taikomas dujų chromatografijoje. Šiuo metu jis naudojamas kaip svarbiausias prietaisas bendro organinių teršalų kiekio nustatymui aplinkos ore ar išmetamosiose dujose. LJD schema pavaizduota 1.4 pav. Metaliniame degiklyje dega vandenilio liepsna. Jis kartu yra ir jonizacijos kameros katodas. Liepsna, supanti žiedą, yra anodas. Degant tiriamiesiems komponentams susidarę jonai keičia pastovios srovės grandinėje stiprumą, kurio pokytis matuojamas, naudojant varžą W . Prie pat degiklio į deginamas dujas yra įvedamos analizuojamos dujos, o deginimui svarbus oras yra gaunamas tiekiant jį į tarpą tarp vidinio ir išorinio degiklio vamzdžių.



1.4 pav. LJD taikymo dujų analizei schema

Labai svarbu palaikyti visų dujų – vandenilio, oro, analizuojamų dujų debitų pastovumą. Norint užtikrinti visą tai, visi srautai leidžiami pro sistemoje esančius sandarius kapiliarus. Slėgis kapiliaruose taip pat prisideda prie srautų pastovumo. Kad slėgis kapiliaruose išliktų, įmontuota mažo slėgio reduktoriai vandeniliui ir orui. Tiriamųjų dujų į detektorių pro kapiliarą paduodama nedaug, likusi dalis išeina pro apvadą. Būtinai ypač tikslus srautų reguliavimas siekiant išlaikyti analizės duomenų tikslumą.

Norint išvengti analizuojamų junginių kondensavimosi, detektoriai kaitinami iki 150 – 200 °C. Tuo pačiu yra šildomi dulkių filtrai bei tiriamųjų dujų siurblys.

Liepsnoje, organiniai junginiai, oksiduojami susidarant tarpiniams produktams – jonams. Jonizacinės srovės stiprumas lygiagretus anglies atomų skaičiui sudeginto junginio molekulėje. Jonizacijos energija priklauso ne tik nuo liepsnos energijos, bet ir nuo anglies oksidacijos junginyje energijos.

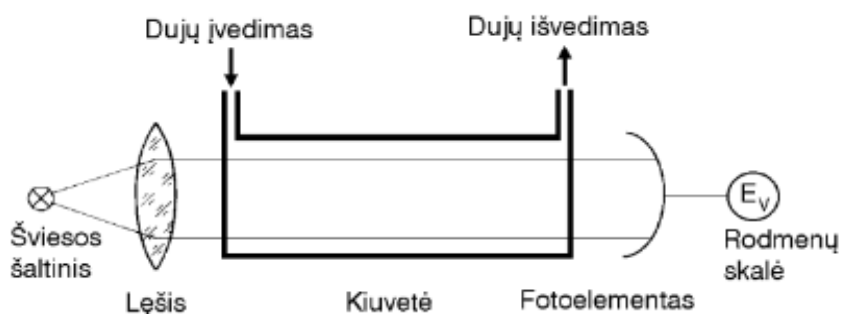
1.5.2 Fotometriniai metodai

Šiuo metodu pagrįsta analizė paremta infraraudonos (IR), matomos arba ultravioletinės (UV) elektromagnetinių bangų spektro dalies absorbcija. Kiekviena šių spektro dalių apima šiuos bangų ilgių intervalus:

- UV – 200 – 400 nm;
- matomoji – 400 – 800 nm;
- IR – 1000 – 10000 nm.

Matomojoje ir UV spektro dalyse, sužadinant atomus ir elektronams pereinant į aukštesnį energetinį lygmenį, spinduliai absorbuojami, o tuo tarpu IR spindulių absorbcijos išdava yra molekulių svyravimas ir rotacija.

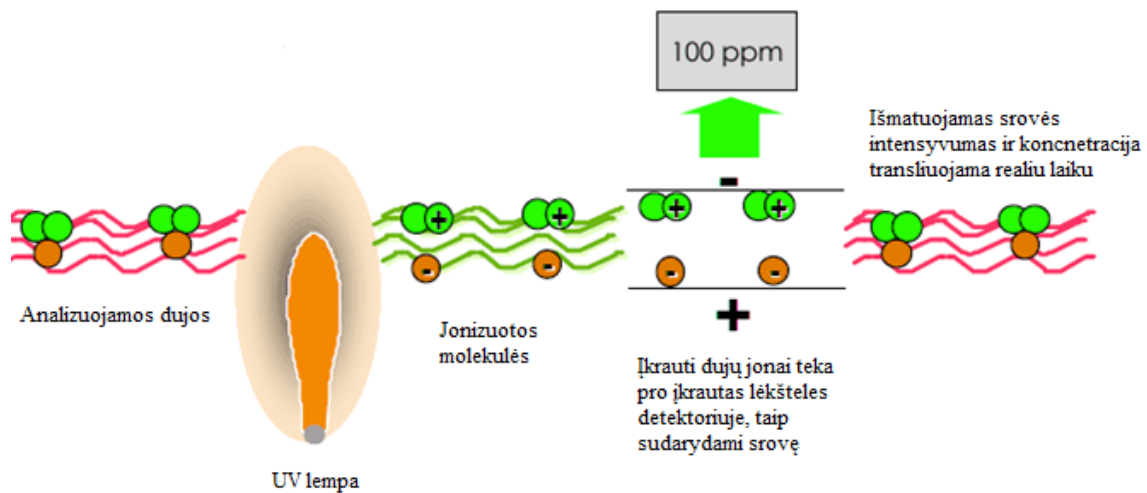
1.5 pav. pavaizduota principinė fotometro schema. Šviesos spinduliai, prasiskverbia pro lęšį, praeina pro kiuvetę, kuria yra leidžiamas analizuojamų dujų srautas ir krinta į fotoelementą, kuriame jų energija paverčiama elektriniu signalu. Spinduliavimo intensyvumo sumažėjimas proporcingas analizuojamos medžiagos koncentracijai [44].



1.5 pav. Fotometro veikimo principinė schema

Vienas iš greičiausių ir ekonomiškiausių metodų lakiųjų organinių junginių koncentracijų stebėjimams vykdyti, naudoti fotojonizacijos detektorius (PID). Darbe naudojamas prietaisas „Aeroqual IQM60“ jau su integruotu PID.

PID susideda iš trumpų UV bangų, spinduliuojančių į mažą kamerą, kurioje yra analizuojamos dujos. Kameros viduje yra elektrodų rinkinys, kuris turi elektrinį potencialą. UV šviesa jonizuoja organinių junginių komponentus ir elektronai formuojasi, kaip teigiamai įkrautos molekulės. Molekulėms suteikiamas jonizacinis potencialas (JP), kurio reikia, kad molekulės būtų išsklaidytos, kaip jonai. Cheminės medžiagos esančios kietos ar skystos kambario temperatūroje, neturi JP. Tik medžiagos kambario temperatūroje esančios dujų pavidalu turi JP. Jei JP yra didesnė nei energija, kurią ultravioletinė lempa gali perduoti molekulei, molekulė nebus suskaidoma. PID yra atrankinė priemonė įvairiems organiniams ir kai kuriems neorganiniams junginiams aptikti. PID lakiųjų teršalų aptikimo riba paprastai yra paprastai yra nuo 0,01 iki 10 000 ppm [45].



1.6 pav. Bendroji PID jutiklio schema

2. MEDŽIAGOS IR TYRIMŲ METODAI

Ekspertas buvo atliktas Kauno technologijos universiteto, Aplinkosaugos technologijos katedroje, Aplinkos chemijos mokymų laboratorijoje.

2.1 Tiriamieji augalai

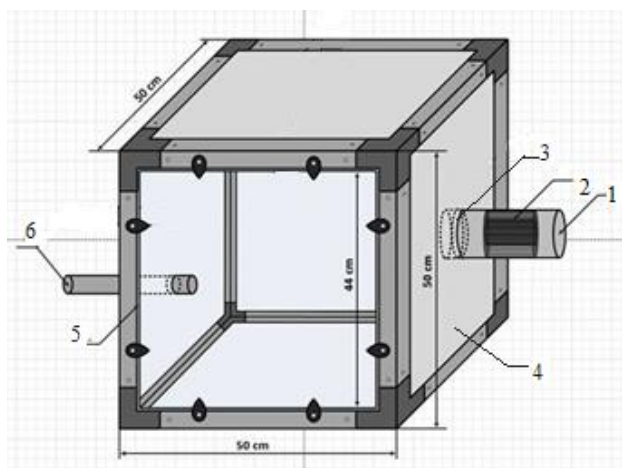
Tiriamieji augalai gebenė lipikė (lot. *Hedera helix*) ir Benjamino fikusas (lot. *Ficus benjamin*) buvo gaunami iš specializuotos parduotuvės UAB „Kesko Senukai Lithuania“. Augalai ir jų lapai buvo vizualiai įvertinti, ar jie gyvi, žaliuojantys, nenuvytę ar lapuose nesimato ligos požymių (juodų, geltonų dėmių). Augalai buvo laikomi tuose pačiuose vazonuose bei dirvožemyje, kuriame užaugo, periodiškai laistomi bei tręšiami, jų gyvybingumą visam eksperimento laikotarpiui užtikrinti. Eksperimento rezultatams gauti, buvo svarbi augalų lapija, todėl jų vazonai ir dirvožemis buvo apdengtas aliuminio folija, norint išvengti dirvožemio ir jame esančių mikroorganizmų daromos įtakos rezultatams. Gebenės lipikės lapų paviršiaus plotas 0,138 m² smulkiojo fikuso lapų paviršiaus plotas 0,139 m²

2.2 Tiriamos cheminės medžiagos

Šiame eksperimente naudoti lakieji organiniai junginiai: >99.5% grynumo toluenas ir trichloretilenas (TCE). Jie buvo laikomi traukos spintoje.

2.3 Tyrimo eiga

Ekspertui atlikti buvo pasinaudotas modifikuotas Gabriela Soreanu (47) ir kt. metodas. Specialiai tyrimui atlikti buvo sumontuota 50*50*50 cm matmenų, maksimaliai sandari nerūdijančio plieno kamera (2.1 pav.), talpa – 85 litrai. Į kamerą pirmiausiai patalpinamas augalas, tuomet stiklinė Petri lėkštelė. Traukos spintoje, automatinė „Microman“ pipetė, paimamas tam tikros koncentracijos lakusis organinis junginys ir užšvirkščiamas ant stiklinės Petri lėkštelės esančios kameroje.



2.1 pav. Kameros brėžinys. 1 – Įtekantis aplinkos oras; 2 – integruotas anglies filtras; 3 – į kamerą pratekantis išvalytas oras; 4 – kameroje esantis ventiliatorius; 5 - varstomas kameros dangtis; 6 – traukiamas LOJ garais užterštas oro srautas

Iš išorės į kamerą patenkantis oras pirmiausia prateka pro anglies filtrą, kuriame yra išvalomas. Kameroje, veikiant ventiliatoriui, LOJ yra tolygiai išsklaidomas vienodai paskirstomas kameros erdvėje. Kamera sujungta su dujinių teršalų ir dalelių matuokliu „Aeroqual IQM 60“ (2.2 pav.), kuris 1l/min greičiu siurbia oro ir lakiojo junginio mišinį. Šiame matuoklyje yra integruotas fotojonizacijos detektorius, kuris realiu laiku fiksuoja (matavimo intervalas 1 min) LOJ įkrautų dalelių skleidžiamą atitinkamo stiprumo srovę ir registruoja koncentracijas ppm vienetais. Prietaiso LOJ matavimo ribos yra 0-20 ppm, mažiausia aptikimo riba 0.01 ppm [46]. Realizuojant rezultatus, matome kompiuterio ekrane naudojant programą „Aeroqual Air Quality Monitor v6.2“, taip pat duomenys automatiškai saugomi atminties kortelėje.



2.2 pav. Aeroqual IQM 60

Ekspertas buvo atliekamas skirtingomis sąlygomis: tamsoje, dirbtinėje šviesoje, naudojant papildomą lempą bei natūralioje aplinkos šviesoje. Aplinkos temperatūra buvo palaikoma 20–25 °C drėgmė neviršijo 45 %.

Pradinės teršalų koncentracijos $122 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ir $303 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siurbimo greitis $1 \text{ l}/\text{min}$. Eksperimentai buvo atliekami 1,5 val bei 6,5 val. Kiekvienas matavimas buvo kartojamas po 3 kartus.

2.4 Rezultatų apdorojimas

Gauti duomenys buvo apdorojami MS Excel ir ANOVA programomis.

Organinių junginių koncentracijoms perskaičiuoti iš ppm į $\mu\text{g}/\text{m}^3$ taikoma formulė pateikta higienos normoje „Cheminių medžiagų profesinio poveikio ribiniai dydžiai. Matavimo ir poveikio vertinimo bendrieji reikalavimai“ (HN 23:2011):

$$C_{(\mu\text{g}/\text{m}^3)} = \frac{C_{(\text{ppm})} \cdot M}{24,04}, \quad (2.1)$$

čia C – cheminės medžiagos koncentracija; M – molekulinė cheminės medžiagos masė (g/mol); 24,04 molinis tūris (l/mol), kai temperatūra 20°C ir atmosferos slėgis $101,3 \text{ kPa}$ (760 mmHg).

Nustačius tiriamų organinių medžiagų koncentracijas eksperimento pradžioje ir pabaigoje, apskaičiuotas lapijos valymo efektyvumas:

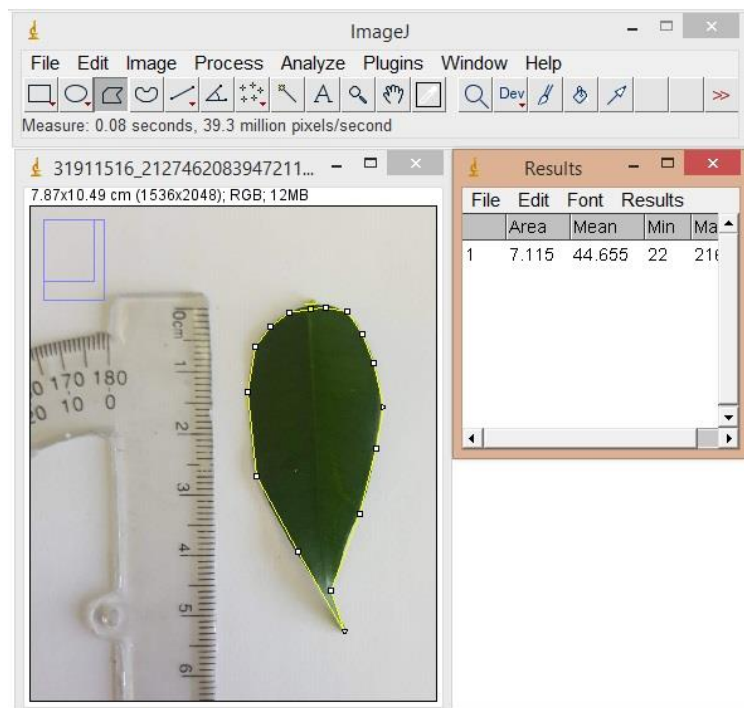
$$E = \frac{C_0 - C}{C} \cdot 100, \% \quad (2.2)$$

čia C_0 – koncentracija prieš įkrovą, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; C – koncentracija po įkrovos, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; E – efektyvumas, %.

2.5 Augalų lapų ploto apskaičiavimas

Gebenės lipikės (lot. *Hedera helix*) ir Benjamino fikuso (lot. *Ficus benjamin*) lapų plotas buvo apskaičiuotas naudojantis ImageJ programa. Kiekvienas augalo lapelis buvo nuskintas ir vienoje nuotraukoje nufotografuotas kartu su matavimo liniuote, tam kad būtų žinomas nuotraukos mastelis ir tiksliai apskaičiuojamas lapo paviršiaus plotas (2.3 pav).

Pradedant naudoti programą pirmas žingsnis, naudojantis ilgio nustatymo įrankiu, ant liniuotės, esančios nuotraukoje, pažymėti tikslią matavimo skalę centimetrais. Po to, naudojant ploto apskaičiavimo įrankį, apvedamas, nuotraukoje esančio, lapo kontūras. Programos pagalba apskaičiuotus visų lapų plotus sudedame ir gauname bendrą augalo lapų paviršiaus plotą. Gebenės lipikės gautas lapų paviršiaus plotas $0,138 \text{ m}^2$, Benjamino fikuso $0,1391 \text{ m}^2$.

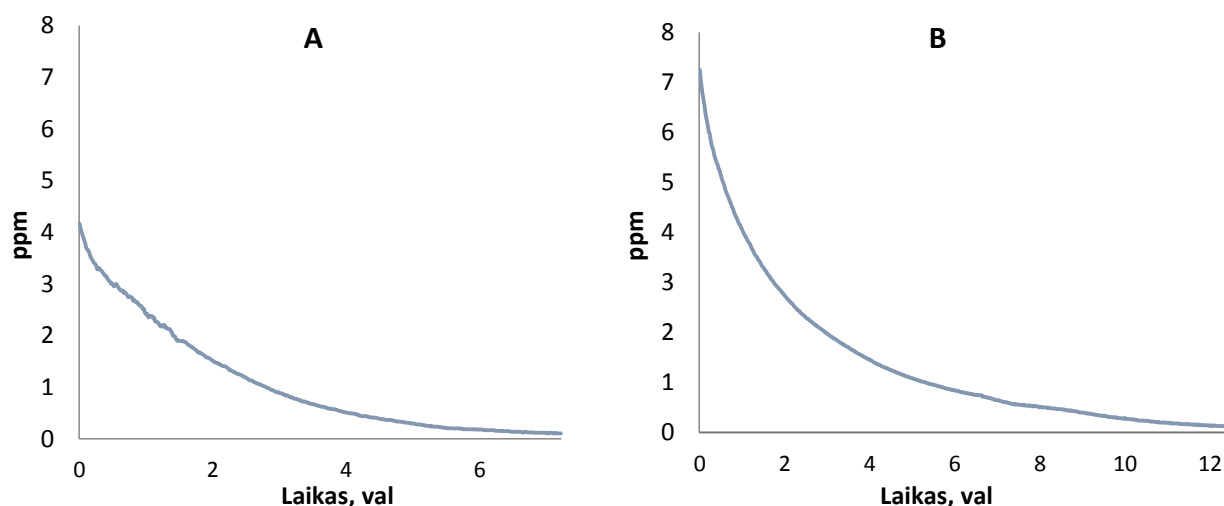


2.3 pav. Lapo ploto apskaičiavimas ImageJ programa

3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

3.1 Kameros išsivėdinimas

Šio tyrimo metu buvo siekiama atlikti kontrolinį eksperimentą, kurio tikslas nustatyti lakiojo junginio, nenaudojant jokių papildomų sąlygų, išsivėdinimo laiką iš kameros, bei apskaičiuoti išsivėdinimo kiekius per valandą. Tyrimui atlikti buvo naudojama $122 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ir $303 \mu\text{g}/\text{m}^3$ koncentracijų TCE. Rezultatų kreivė pateikta 3.1 pav.

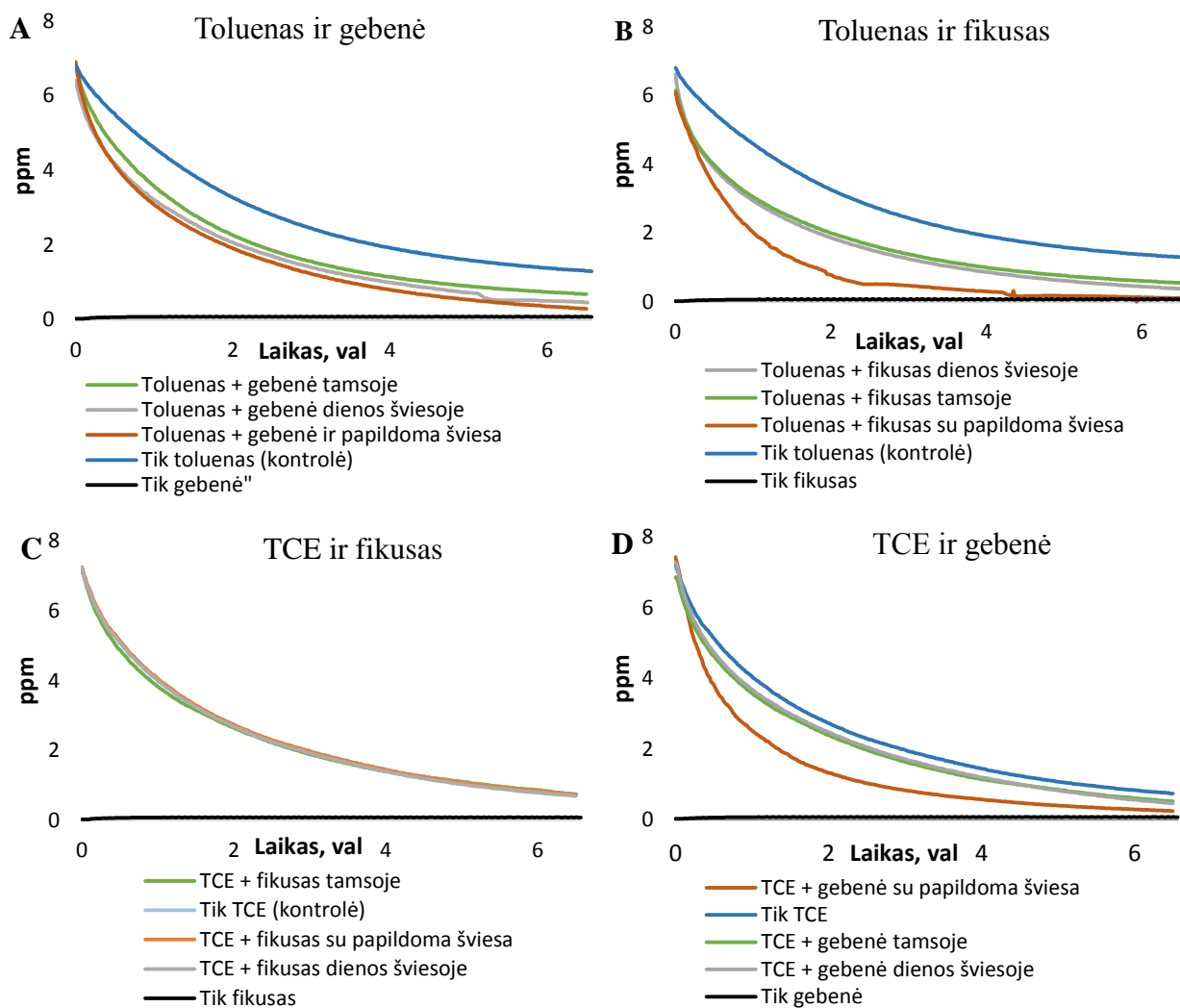


3.1 pav. Tolueno išsivėdinimo iš kameros kreivės, A – $122 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Tolueno koncentracija, B – $303 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tolueno koncentracija

Oras iš kameros yra siurbiamas $1 \text{ l}/\text{min}$ greičiu. Tad esant didesnei lakiojo junginio koncentracijai pilnam kameros išsivėdinimui reikalingas ilgesnis laikas. Esant $122 \mu\text{g}/\text{m}^3$ TCE koncentracijai, kamera išsivėdina per $6,5 \text{ val.}$, esant $303 \mu\text{g}/\text{m}^3$ reikalingas beveik dvigubai ilgesnis laikas – $12,5 \text{ val.}$ Naudojant mažesniąją koncentraciją išsivėdinimo kiekis $16,873 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{val}$ ir esant didesnei TCE koncentracijai – $42,62 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{val}$.

3.2 Bioskaidymo efektyvumas

Tyrimai buvo atliekami naudojant skirtingus augalus (gebenė lipikė (lot. *Hedera helix*) ir Benjamino fikusas (lot. *Ficus benjamin*)), skirtingus apšvietimus (dienos šviesa, papildomas apšvietimas naudojant pridėtinę fluorescencinę (CFL) 15 W elektros lemputę ir tamsa) ir $303 \mu\text{g}/\text{m}^3$ koncentracijos lakiuosius junginius tolueną arba TCE. Visi eksperimentai buvo vykdomi $6,5 \text{ val.}$, tomis pačiomis sąlygomis. Koncentracijų mažėjimo kreivės pavaizduotos 3.2 pav.



3.2 pav. LOJ koncentracijų mažėjimas naudojant skirtingus augalus ir apšvietimo sąlygas. Visų matavimų metu SD ± 17,1-22,3 %.

3.2 pav. a, b ir d grafikuose pastebimas teigiamas augalų poveikis LOJ skaidymui. Šiuose grafikuose didžiausias koncentracijos kritimas yra naudojant augalą su papildoma elektros lempute. Galime daryti prielaidą, kad tai priklauso nuo intensyvesnės fotosintezės, bei labiau prasiplėtusių augalo lapuose esančių žiotelių.

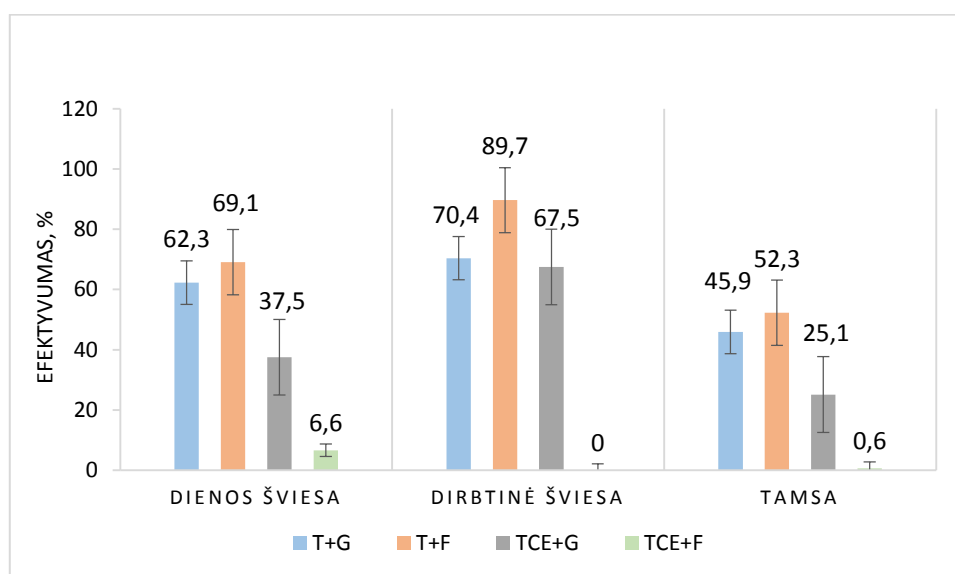
Per 6,5 val. tolueno koncentracija krito nuo $303 \mu\text{g}/\text{m}^3$ iki $57,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ir jo kontrolinis efektyvumas yra 80,91 % (3.4 pav.), tuo tarpu naudojant tą pačią tolueno koncentraciją ir kameroje esant gebenei su papildoma elektros apšvietimu koncentracija sumažėja iki $12,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ t.y. net $45,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mažiau. Vietoje gebenės naudojant fikusą, koncentracija, nuo pradinės, sumažėja iki $5,97 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Naudojant lakujį junginį TCE ir gebenę su papildomu apšvietimu koncentracija sumažėja iki $10,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Lyginant šiuos rezultatus naudojant papildomą apšvietimą fikusas tolueną absorbuoja dvigubai geriau nei gebenė.

Esant paprastam dienos apšvietimui ar esant tamsai, taip pat yra matoma LOJ absorbcija. Dėl augaluose vykstančios, mažiau spartesnės, nei esant papildomai šviesai, fotosintezės, augalų

absorbicija yra efektyvesnė, nei absorbicija tamsoje. Nors esant tamsai fotosintezė nevykta, augaluose įsijungia kitas procesas, kurio dėka yra vykdoma LOJ absorbicija – kvėpavimas. Tolueno ir gebenės koncentracija dienos šviesoje sumažėja iki 21,78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, tamsoje iki 31,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, tolueno ir fikuso 18,31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 27,59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, bei TCE ir gebenė 19,56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 23,44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, atitinkamai.

Mūsų gauti eksperimento duomenys sutampa su B.C. Wolverton ir kitų (14) atliktais tyrimais, kurie parodė, kad fikusas neskaido lakiojo junginio TCE. Tai atsispindi C grafike, esančiame 3.2 pav., kuomet visos kreivės praktiškai yra vienoje tiesėje, kaip kontrolinis lakusis junginys TCE.

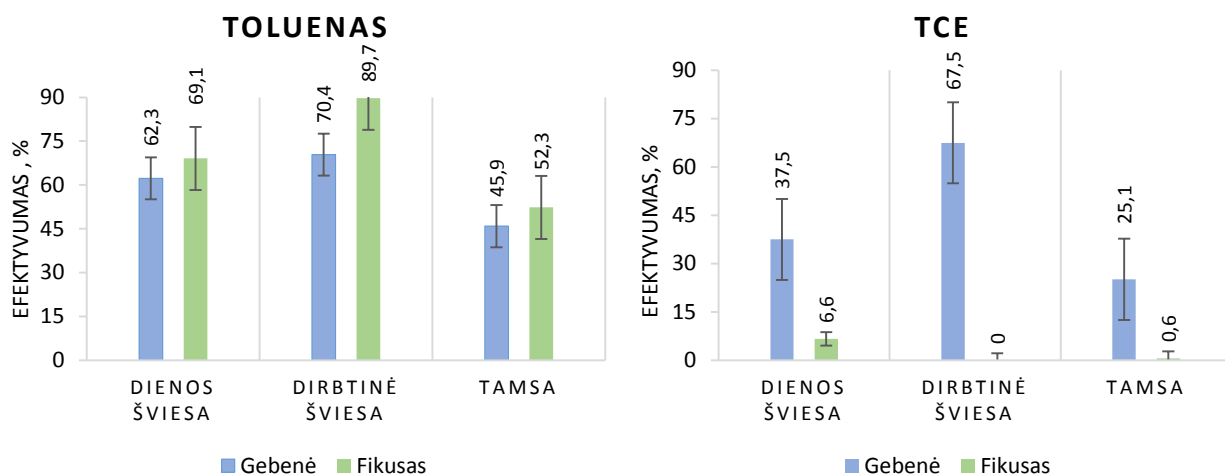
Į kamerą patalpinę tik fikusą arba gebenę praktiškai nepastebėtas lakių organinių junginių išsiskyrimas.



3.3 pav. Pateiktas grafikas su augalų absorbicijos efektyvumu išreikštais procentais.

Efektyviausiai tolueną skaidė fikusas dirbtinėje šviesoje – 89,7 %. Antroje vietoje pagal efektyvumą – gebenės skaidomas TCE dirbtinėje šviesoje – 67,5 %, trečioje - gebenės skaidomas toluenas taip pat dirbtinėje šviesoje – 70,4 %. Nežymus 1,3 % mažesnis efektyvumas nustatytas tiriant tolueno skaidymą fikusu esant dienos šviesai. Kaip anksčiau minėta, fikusas neskaido TCE visose apšvietimo sąlygose.

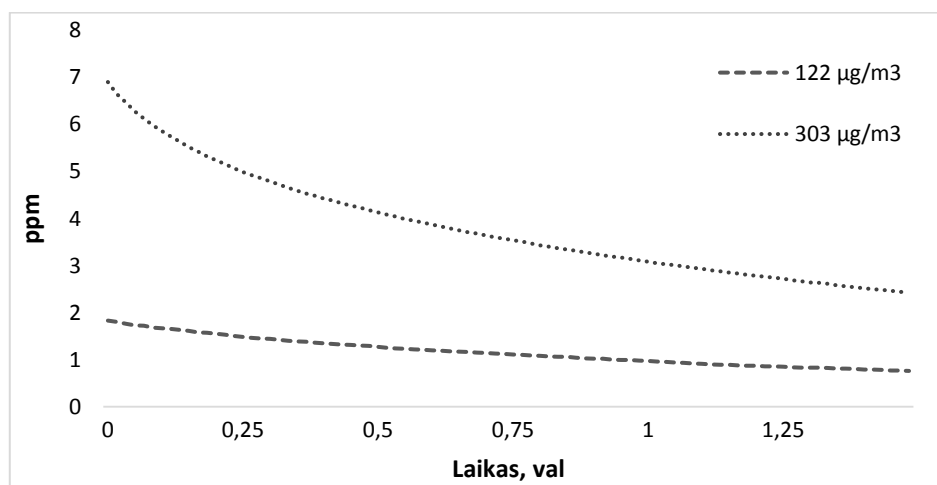
3.4 pav. Pateiktas gebenės ir fikuso skaidymo efektyvumo palyginimas. Visomis apšvietimo sąlygomis tolueną geriau skaido fikusas, o TCE atžvilgiu – gebenė.



3.4 pav. Augalų efektyvumas esant skirtingiems LOJ ir skirtingiems šviesos šaltiniams

Yera R ir kt. (37) savo tyrime teigė, kad šviesos intensyvumo poveikis ne visada yra tiesiškas. Eksperimento metu jie nustatė, kad tik esant žemoms tolueno koncentracijoms LOJ pašalinimo efektyvumas didėja, kuomet stiprėja ir apšvietimas. Priešingai, esant beveik 4 kartus didesnei koncentracijai, didėjantis šviesos intensyvumas padarė neigiamą įtaką LOJ pašalinimui. Daroma prielaida, kad toks LOJ pašalinimo sumažėjimas gali būti susijęs su toksiškumu ar augalo apribotu metaboliniu našumu.

Norėdami patvirtinti Yera R ir kt. gautą hipotezę, atlikome panašų eksperimentą. 3.5 pav. pateiktas skirtingų koncentracijų palyginamasis grafikas. Buvo naudojamos $88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ir $303 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tolueno koncentracijos, taip pat gebenė lipikė bei papildoma dirbtinė šviesa, eksperimentas vykdomas 1,5 val. Mūsų gauti rezultatai negali patvirtinti Yera R ir kt. gautos hipotezės, nes esant mažesnei koncentracijai absorbcijos efektyvumas yra 25,19 %, o esant $303 \mu\text{g}/\text{m}^3$ koncentracijai efektyvumas lygus 31,65 %.



3.5 pav. Efektyvumų palyginimas esant skirtingoms koncentracijoms.

Buvo atliktas eksperimentinis tyrimas, kurio tikslas buvo palyginti augalo absorbciją esant pilnai augalo lapijai ir pašalinus visus augalo lapus (3.1 lentelė). Šiuo eksperimentu norėjome įsitikinti, ar tikrai didžioji dalis absorbcijos vyksta per lapus.

3.1 lentelė. Tolueno pašalinimas dienos šviesoje per 6,5 val.

	Pradinė koncentracija (ppm)	Galutinė koncentracija (ppm)	Efektyvumas (%)
<u>Gebenė</u>			
Pilna lapija	6,4	0,46	62,3
Pašalinti lapai	6,31	1,05	12,83
<u>Fikusas</u>			
Pilna lapija	6,62	0,4	69,1
Pašalinti lapai	6,54	1	19,9

Pagal 3.1 lentelėje pateiktus rezultatus, galime daryti dvi prielaidas: 1. Esant pilnai lapijai valymo efektyvumas geresnis, tad galime likti prie savo hipotezės, kad tai dėl vykstančios fotosintezės/ kvėpavimo bei žiotelių. 2. Nesant lapijos, skaidymas vis tiek vyksta, todėl daroma prielaida, kad tam daro įtaka dirvožemyje esantys mikroorganizmai.

3.3 Skaidymo reakcijos greitis

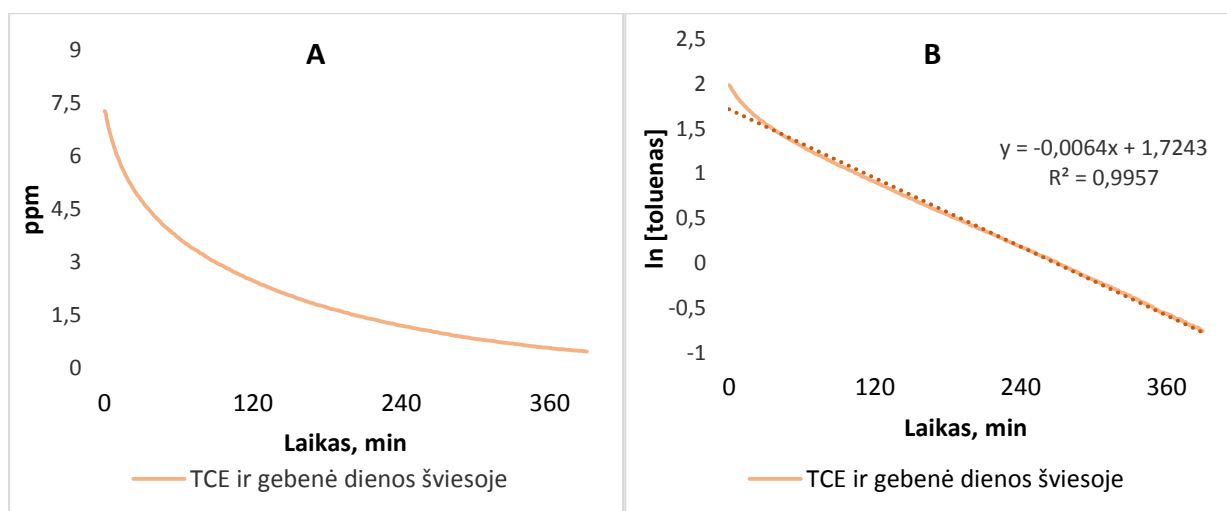
Iš turimų duomenų galime sužinoti reakcijos greitį. Reakcijos greičio sumažėjimo koeficientas apskaičiuojamas iš pirmo laipsnio regresijos lygties:

$$\ln[A]=\ln[A]_0 - kt \quad (3.1)$$

t – laiko tarpas nuo matavimų pradžios;

$\ln[A]_0$ ir $\ln[A]$ - atitinkamai pradinė ir momentinė teršalo koncentracijos;

K – reakcijos greičio sumažėjimo koeficientas, min^{-1}



3.6 pav. Skaidymo reakcijos greitis. A – koncentracijos mažėjimo priklausomybė nuo laiko, B – logaritmuotas A grafikas

3.6 pav. pavaizduotas pavyzdys, kaip logaritmuojant yra ištiesinamas koncentracijos mažėjimo polinkis. Logaritmuojant rezultatų grafikus, automatiškai yra apskaičiuojama linijinė regresijos lygtis. Iš lygties taip pat gauname ir mums reikiamą reakcijos greičio konstantą (3.2 lentelė)

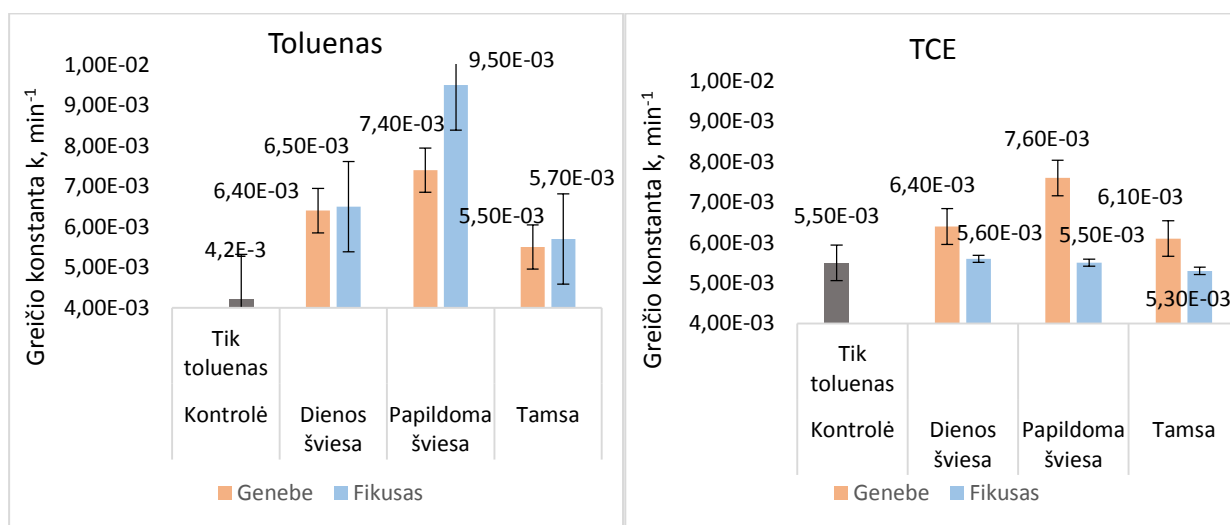
3.2 lentelė. Reakcijų sąlygos ir greičio konstantos.

Sąlyga	Lygtis	Greičio konstanta, k (min^{-1})	Skirtumas nuo kontrolės
Kontrolė			
Toluenas	$y = -0,0042x + 1,7364$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	
TCE	$y = -0,0055x + 1,7256$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	
Dienos šviesa			
Toluenas ir gebenė	$y = -0,0064x + 1,5614$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$
TCE ir gebenė	$y = -0,0064x + 1,7243$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$0,9 \cdot 10^{-3}$
Toluenas ir fikusas	$y = -0,0065x + 1,4861$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$
TCE ir fikusas	$y = -0,0056x + 1,7245$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$
Dirbtinė šviesa			
Toluenas ir gebenė	$y = -0,0074x + 1,5944$	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
TCE ir gebenė	$y = -0,0076x + 1,3756$	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
Toluenas ir fikusas	$y = -0,0095x + 1,189$	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$
TCE ir fikusas	$y = -0,0055x + 1,7256$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	0
Tamsa			
Toluenas ir gebenė	$y = -0,0055x + 1,5689$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
TCE ir gebenė	$y = -0,0061x + 1,6581$	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$
Toluenas ir fikusas	$y = -0,0057x + 1,454$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
TCE ir fikusas	$y = -0,0055x + 1,6678$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	0

Iš 3.2 lentelėje pateiktos informacijos, matome, kad didžiausias reakcijos greitis vyksta fikusui absorbuojant tolueną esant dirbtinei šviesai, jos greičio konstanta lygi $9,5 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$.

Nežymus skirtumas, $0,2 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$, tarp toluenas su gebene ir TCE su gebene esant papildomai šviesai, reakcijos greičio konstantų. Lėčiausiai reakcija vyksta gebenei lipikei absorbuojant tolueną dienos šviesoje.

3.7 pav. reakcijų greičių konstantų palyginimas pateiktas grafiškai. Matoma aiški tendencija, kad reakcijos greičiai absorbuojant tolueną, prie visų apšvietimo sąlygų, yra didesni naudojant fikusą. Kadangi fikusas neskaido TCE, šio junginio skaidymo reakcijos greičio konstantos didesnės naudojant gebenę.



3.7 pav. Reakcijos greičių konstantų palyginimai esant skirtingom sąlygom.

3.4 Botaninės filtracijos sistemos taikymas patalpoje

Iš gautų tyrimo rezultatų, galime paskaičiuoti kokio ploto augalinio filtro reikia norint pilnai išvalyti ar ženkliai sumažinti, naujai pastatytų namų ar biurų patalpų orą.

Remiantis H. Jarnstro ir kt. autorių ir mūsų gautais eksperimento duomenimis [48], šiame skyriuje pateikiamas rekomendacinis skaičiavimas 12 m^2 , $32,5 \text{ m}^3$ dydžio patalpai (3.3 lentelė). LOJ išsiskyrimas buvo matuotas iš PVC grindų, gipsinių sienų ir nudažytų lubų po 12 mėn. nuo pastatymo.

3.3 Lentelė. Patalpos duomenys.

Nr.	Paviršiaus tipas	Plotas	LOJ kiekiai
1.	PVC grindys	12,5 m ²	17 µg/m ³ /val
2.	Dažytos lubos	14 m ²	82 µg/m ³ /val
3.	Gipso sienos	24 m ²	11 µg/m ³ /val

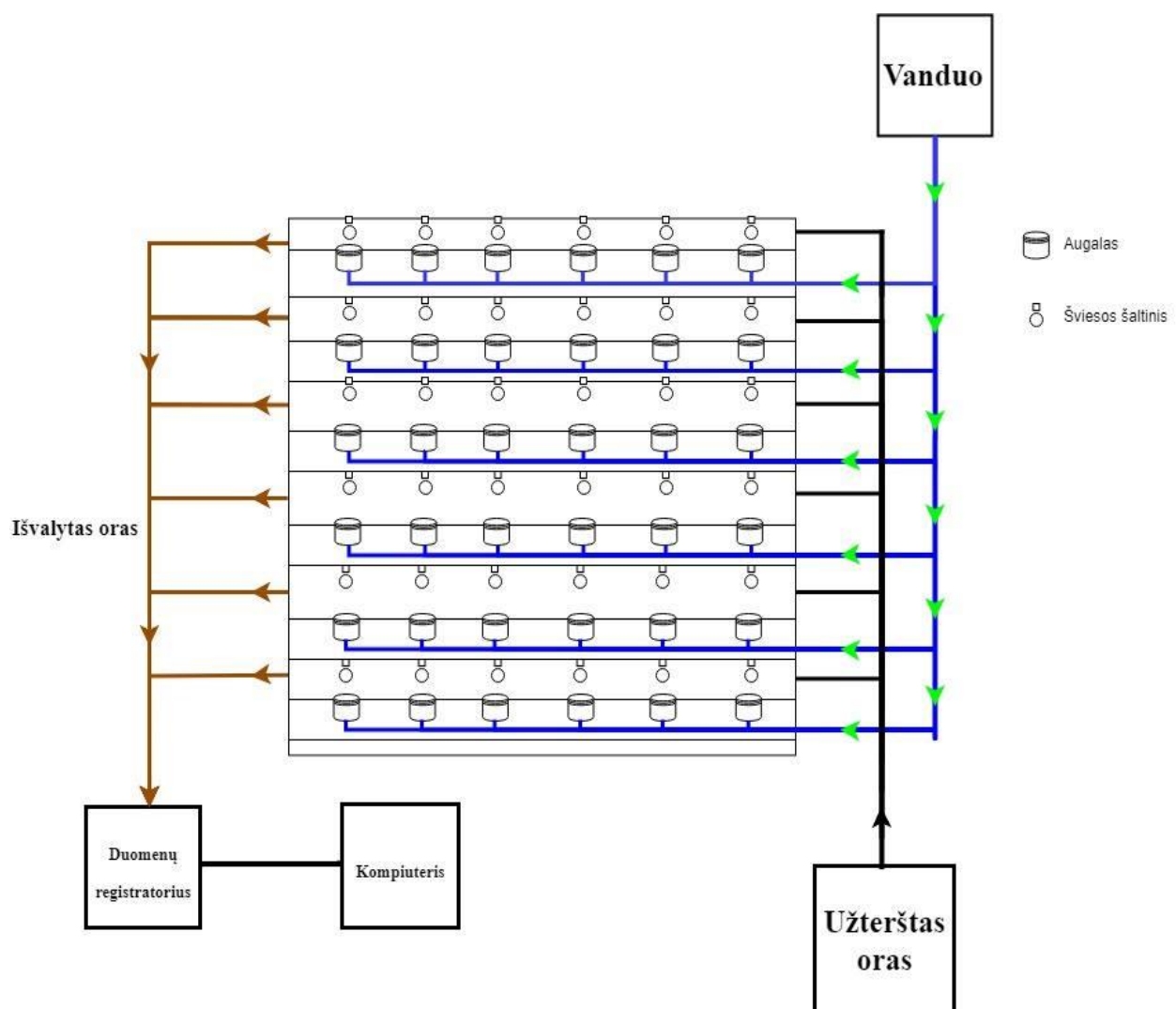
Pagal pateiktus duomenis iš 32,5 m³ tūrio kambario išsiskiria ir augaliniam filtrui iš kambario pravalyti reikia 110 µg LOJ esant 1 val⁻¹ oro srautui. Gebenės skaidymo efektyvumas dienos šviesoje - 5.55 µg/m³/val. Tad esant tokioms sąlygoms, per valandą, orui išvalyti, iš sienų, grindų ir lubų išsiskiriančiam LOJ, reikės 20 vnt. vidutinio dydžio (lapijos plotas 0,14 m²) arba 142 m² gebenės lipikės lapijos ploto.

Pateikti skaičiavimai rodo, kad duotojo kambario oro išvalymui pakanka pasyvios augalų sienelės ar vazoninių augalų. Norint botaninės filtracijos sistemą pritaikyti darbo aplinkos orui valyti, reikia įvertinti, kad teršalų koncentracijos paprastai būna didesnės, taip pat didesni valomo oro tūriai. Tokiu atveju siūlytina (1.2 pav.) paveiksle pateikta rekomendacinė schema, kurioje valomas oras būtų priverstinai cirkuliuojamas per botaninę filtracijos sistemą, taip pat taikoma automatiškai valdoma drėkinimo sistema. Tokios sistemos technologiniai parametrai turėtų būti projektuojami pagal konkrečias sąlygas.

4. REKOMENDACIJŲ DALIS

Norint pritaikyti mūsų tyrimą pramonėje, pirmiausia reikėtų nustatyti kokius teršalus ir kokius jų kiekius yra aplinkos ore. Nuo to priklausys kiek, kokio dydžio ir kokių augalinių biofiltrų reikės oro valymui. Aparatūrinė schema pavaizduota 4.1 pav.

Žinant visus matavimo rodiklius padaroma atitinkamo dydžio spinta/kamera, kurioje bus patalpinti vazonuose esantys augaliukai. Kameros priekinės durys yra nuimamos jei esant poreikiui reikėtų pakeisti augalą nauju. Į kiekvieną vazonėlio dugną nuvedami vamzdeliai, kuriais tekės nustatytas kiekis vandens su jame ištirpintomis trąšomis. Virš augaliukų pakabinami šviesos šaltiniai (fluorescencinės lemputės). Šviesos matuokliu nustatoma ar šviesa sklindanti į augalą nėra per intensyvi ar per silpna. Kiekvienos kameros lentynoje yra anga pro kurią atitinkamu greičiu traukiamas LOJ užterštas oras. Kitoje lentynos pusėje, pro angą, vamzdeliais keliauja jau išvalytas oras, kuris patenka į duomenų registratorių. Jame yra registruojami išvalyto oro rodikliai ir kompiuterio ekrane matomi rezultatai realiu laiku.



4.1 pav. Eksperimento struktūrinė schema

IŠVADOS

1. Efektyviausiai tolueną visomis sąlygomis skaidė fikusas, o TCE – gebenė. Didžiausias tolueno skaidymo efektyvumas buvo naudojant fikusą ir apšviečiant jį dirbtine šviesa. Šiuo atveju koncentracija sumažėja 9 kartus, lyginant su kontrole ir pasiekė 89,7 % efektyvumą. Gebenei dirbtinėje šviesoje skaidant tolueną koncentracija sumažėja iki $12,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (70,4 % efektyvumas). Nustatyta, kad fikusas TCE neskaido.
2. Didžiausias reakcijos greitis nustatytas fikusui skaidant tolueną dirbtinėje šviesoje, reakcijos greičio konstanta buvo $9,5 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$. Lėčiausiai reakcija vyko gebenei lipikei absorbuojant tolueną dienos šviesoje.
3. Norint pilnai išvalyti 12 m^2 , $32,5 \text{ m}^3$ dydžio naujos statybos patalpą nuo lakių organinių junginių, išsiskiriančių iš statybinių medžiagų, pakanka 20 vnt. vidutinio dydžio (lapijos plotas $0,14 \text{ m}^2$) gebenės lipikės arba $2,8 \text{ m}^2$ gebenės lipikės lapijos ploto sienelės.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. B.F. Yu, Z.B. Hu, M. Liu, H.L. Yang, Q.X. Kong, Y.H. Liu, Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health, *Int. J. Refrig.* 32 (2009) 3–20. Prieiga per doi: 10.1016.
2. A. Aydogan, L.D. Montoya, Formaldehyde removal by common indoor plant species and various growing media, *Atmos. Environ.* 45 (2011) 2675–2682. Prieiga per doi: 10.1016.
3. C.H. Ao, S.H. Lee, Removal of indoor air ppb level volatile organic compounds (VOCs) and NO_x by heterogenous photocatalysis, in: *Proceeding of Better Air Quality in Asian and Pacific Rim Cities*, 16–18 December, Hong Kong, 2002 (PS-37-1-5). ISSN 0926-3373.
4. K.R. Smith, Indoor air pollution in developing countries: *recommendations for research*, *Indoor Air* 12 (2002) 198–207. ISSN 0905-6947.
5. M. Burchett, F. Torpy, J. Brennan, A. Craig, Greening the Great Indoors for Human Health and Wellbeing, *Final Report*, Project NY06021, 2010, 28p.
6. Bone A., Murray V., Myers I., Dengel A., Crump D. (2010). Will drivers for home energy efficiency harm occupant health? *Royal Society for Public Health* 2010 SAGE Publications ISSN 1757-9139.
7. Bekö, G., Fadeyi, M.O., Clausen, G., Weschler, C.J. (2009). Sensory pollution from bag type fiber glass ventilation filters: conventional filter compared with filters containing various amounts of activated carbon. *Building and Environment* 44, p. 2114 - 2120. ISSN 0360-1323.
8. Parmar, S.S., Grosjean, D. (1991). Sorbent removal of air pollutants from museum display cases. *Environment International* 17, p. 39-50. ISSN 0160-4120.
9. Kwong, C.W., Chao, C.Y.H., Hui, K.S., Wan, M.P. (2008b). Catalytic ozonation of toluene using zeolite and MCM-41 materials. *Environmental Science & Technology* 42, p.8504 - 8509. ISSN 0013-936X.
10. Van Durme, J., Dewulf, J., Demeestere, K., Leys, C., Van Langenhove, H. (2009). Postplasma catalytic technology for the removal of toluene from indoor air: effect of humidity. *Applied Catalysis B: Environmental* 87, p. 78 - 83. ISSN 0926-3373.
11. B.C. Wolverton, A. Johnson, K. Bounds, Interior Landscape Plants for Indoor Air Pollution Abatement, *Final Report NASA* (NASA-TM-101760), National Aeronautics and Space Administration, 1989. ISSN 0717-6163.
12. US Environmental Protection Agency (EPA), Introduction to Phytoremediation, ISBN: EPA/600/R-99/107, 2000.

13. A.B. Darlington, J.F. Dat, M.A. Dixon, The biofiltration of indoor air: air flux and temperature influences the removal of toluene, ethylbenzene and xylene, *Environ. Sci. Technol.* 35 (2001) 240–246. ISSN 0013-936X.
14. B.C. Wolverton, A. Johnson, K. Bounds, Interior Landscape Plants for Indoor Air Pollution Abatement, *Final Report NASA* (NASA-TM-101760), National Aeronautics and Space Administration, 1989. ISSN 0717-6163.
15. <https://www.lovethegarden.com/community/fun-facts/nasa-guide-air-filtering-houseplants> [žiūrėta 2018-04-17].
16. J.S. Deviny, M.A. Deshusses, T.S. Webster, *Biofiltration for Air Pollution Control*, CRC Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 1999. ISBN 9781566702898.
17. D. Llewellyn, M.A. Dixon, *Can plants really improve indoor air quality*, in: B. Grodzinski, W.A. King, R. Yada (Eds.), *Comprehensive Biotechnology*, in: M.M. Young, (Ed.), *Agricultural and Related Biotechnologies*, second ed., vol. 4, Elsevier, Oxford, 2011, pp. 331–338. ISBN 9780080885049.
18. B.C. Wolverton, R.C. McDonald, Foliage plants for indoor removal of the primary combustion gases carbon monoxide and nitrogen dioxide, *J. Miss Acad. Sci* XXX (1985) 1–8. ISSN 0076-9436.
19. Yera R, Davis S, Frazer J, Tallman G (1986) Responses of adaxial and abaxial stomata of normally oriented and inverted leaves of *Vicia faba* L. to light. *Plant Physiol* 82:384–389. ISSN 0032-0889.
20. D.S. Yang, S.V. Pennisi, Ki-C. Son, S.J. Kays, Screening indoor plants for volatile organic pollutant removal efficiency, *HortScience* 44 (5) (2009) 1377–1381. ISSN 0018-5345.
21. A. Darlington, Living wall biofilters: putting nature to work cleaning indoor air, AIA 2012 *National Convention and Design Exposition*, May 17–19, 2012, ex 128.
22. J. Yang, J.W. Kloepper, C.M. Ryu, Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress, *Trends Plant Sci.* 14 (1) (2008) 3p. ISSN 1360-1385.
23. B.S. Saharan, V. Nehra, Plant growth promoting rhizobacteria: A critical review, *Life Sci. Med. Res* LSMR-21 (2011) 1–30. DOI: 10.4172/2157-7471.1000266.
24. Kondo T, Hasegawa K, Uchida R, Onishi M, Mizukami A, Omasa K (1995) Absorption of formaldehyde by oleander (*Nerium indicum*). *Environ Sci Technol* 29:2901–2903. ISSN 1520-5851.
25. Kim KJ, KilMJ, Song JS, Yoo EH, Son KC, Kays SJ (2008) Efficiency of volatile formaldehyde removal by indoor plants: contribution of aerial plant parts versus the root zone. *J Am Soc Hortic Sci* 133:521–526. ISSN 0003-1062.

26. Godish T, Guindon C (1989) An assessment of botanical air purification as a formaldehyde mitigation measure under dynamic laboratory chamber conditions. *Environ Pollut* 62:13–20. ISSN 0269-749.
27. Ugrekhelidze D, Korte F, Kvesitadze G (1997) Uptake and transformation of benzene and toluene by plant leaves. *Ecotoxicol Environ Saf* 37:24–29. ISSN 0147-6513.
28. Su YH, Liang YC (2013) The foliar uptake and downward translocation of trichloroethylene and 1,2,3-trichlorobenzene in air–plant–water systems. *J Hazard Mater* 252–253:300–305. ISSN 0304-3894.
29. Irga PJ, Torpy FR, Burchett MD (2013) Can hydroculture be used to enhance the performance of indoor plants for the removal of air pollutants? *Atmos Environ* 77:267–271. ISSN 1352- 2310.
30. Wolverton BC, Wolverton JD (1993) Plants and soil microorganisms: removal of formaldehyde, xylene, and ammonia from the indoor environment. *J Miss Acad Sci* 38:11–15. ISSN 0076-9436.
31. Zhang H, Pennisi SV, Kays SJ, Habteselassie MY (2013) Isolation and identification of toluene-metabolizing bacteria from rhizospheres of two indoor plants. *Water Air Soil Pollut* 224:1–14. ISSN 0049-6979.
32. De Kempeneer L, Sercu B, VanbrabantW, Van Langenhove H, Verstraete W (2004) Bioaugmentation of the phyllosphere for the removal of toluene from indoor air. *Appl Microbiol Biotechnol* 64:284–288. ISSN 0175-7598.
33. Yang DS, Pennisi SV, Son KC, Kays SJ (2009) Screening indoor plants for volatile organic pollutant removal efficiency. *Hortscience* 44: 1377–1381. ISSN 0018-5345.
34. Jin CL, Zhou XJ, Zhao HT, Liu XM, Feng K (2013) Comparison of removal of formaldehyde capacity between *Hedera helix* and *Melissa officinalis*. *Asian J Chem* 25:3823–3826
35. Devlin P. F., Christie J. M., Terry M. J. 2007. Many hands make light work. *Journal of Experimental Botany*, 58: 3 071–3 077. ISSN 0970-7077.
36. Baosheng K, Shibata S, Sawada A, Oyabu T, Kimura H (2009) Air purification capability of potted *Phoenix roebelenii* and its installation effect in indoor space. *Sensor Mater* 21:445–455. ISSN 0914-4935.
37. Yera R, Davis S, Frazer J, Tallman G (1986) Responses of adaxial and abaxial stomata of normally oriented and inverted leaves of *Vicia faba* L. to light. *Plant Physiol* 82:384–389. ISSN 0032-0889.
38. Orwell RL, Wood RL, Tarran J, Torpy F, Burchett MD (2004) Removal of benzene by the indoor plant/substrate microcosm and implications for air quality. *Water Air Soil Pollut* 157:193–207. ISSN 0049-6979.

39. Akashi Y, Boyce PR (2006) A field study of illuminance reduction. *Energy Build* 38:588–599. ISSN 0378-7788.
40. Jenkins M. E., Suzuki T. C., Mount D. W. 1997. Evidence that heat and ultraviolet radiation activate a common stress-response program in plants that is altered in the *uvh6* Mutant of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology*, 115: 1351–1358. ISSN 0032-0889.
41. Duchovskis P., Juknys R., Brazaitytė A., Zukauskaitė I. 2003. Plant response to integrated impact of natural and anthropogenic stress factors. *Russian Journal of Plant Physiology*, 50: 147–154. ISSN 1021-4437.
42. Sawada A, Oyabu T (2008) Purification characteristics of pothos for airborne chemicals in growing conditions and its evaluation. *Atmos Environ* 42:594–602. ISSN 1352-2310.
43. Baur P, Schönherr J (1995) Temperature dependence of the diffusion of organic compounds across plant cuticles. *Chemosphere* 30:1331–1340. ISSN 0045-6535.
44. DENAFAS, Gintaras, *Atmosferos apsauga: aplinkos oro tarša ir kontrolė 1 dalis*. Kaunas: Technologija, 2000. ISBN 9786090200513.
45. The PID Handbook Theory and Applications of Direct-Reading Photoionization Detectors (PIDs) ISBN 0976816210.
46. <https://apcis.ktu.edu/lt/site/katalogas?more=642> [žiūrėta 2018-03-15].
47. Soreanu G, Dixon M, Darlington A. Botanical biofiltration of indoor gaseous pollutants—a mini-review. *Chem Eng J*. 2013;229:585–594. ISSN 1385-8947.
48. H. Jarnstro, K. Saarelaa, P. Kalliokoski A.-L. Pasanen 2008. The Impact of Emissions from Structures on Indoor Air Concentrations in Newly Finished Buildings – Predicted and On-Site Measured Levels. *Indoor and Built Environment*, 17(4), 313–323. ISSN 1420-326X.