



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Lukas Grigaliūnas

**SUVIRINIMO AEROZOLIO VALYMO ŠLAPIUOJU METODU EFEKTYVUMO
TYRIMAS**

**RESEARCH OF CLEANING WELDING AEROSOL WITH WET METHOD
EFFICIENCY**

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H33001

Aplinkos apsaugos įrenginių projektavimo ir gamybos specializacija

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2018

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Tvirtinu

Katedros vedėjas

(Parašas)

prof. Mindaugs Jurevičius

(Vardas, Pavardė)

(Data)

Lukas Grigaliūnas

**SUVIRINIMO AEROZOLIO VALYMO ŠLAPIUOJU METODU EFEKTYVUMO
TYRIMAS**

**RESEARCH OF CLEANING WELDING AEROSOL WITH WET METHOD
EFFICIENCY**

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H33001

Aplinkos apsaugos įrenginių projektavimo ir gamybos specializacija

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. Ina Tetsman

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantė

lekt. Angelika Petrėtienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2018

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Tvirtinu

Katedros vedėjas

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H33001

Aplinkosaugos įrenginių projektavimas ir gamyba specializacija

(Parašas)

prof. Mindaugs Jurevičius

(Vardas, Pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

2017–01–13 .Nr. 01

Vilnius

Studentui (ei) Lukui Grigaliūnui.

Baigiamojo darbo tema: Suvirinimo aerozolio valymo šlapiuoju metodu efektyvumo tyrimas

Research of Cleaning Welding Aerosol with Wet Method Efficiency

patvirtinta 2016 m. lapkričio 24 d. dekanų potvarkiu Nr. 325

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2018 m. gegužės 28 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Apžvelgti susidarančių suvirinimo aerozolių savybes, valymo metodus bei jų įtaką aplinkai ir žmogaus sveikatai. Išanalizuoti suvirinimo aerozolių valymo šlapiuoju metodu pagrindines charakteristikas įtakojančias valymo efektyvumą ir sudaryti algortimą efektyvumui nustatyti. Sukurti eksperimentinį stendą suvirinimo aerozolių valymo šlapiuoju metodu efektyvumui tirti. Išanalizuoti gautus rezultatus ir suformuluoti išvadas

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....
.....
.....

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas

.....
(Paraša)

.....doc. dr. Ina Tetsman.....

(Moksl. laipsnis/pedag.vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....

(Parašas)

Lukas Grigaliūnas

(Vardas, pavardė)

2017–01–12

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Mechanikos fakultetas
Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra

ISBN _____ ISSN _____
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Mechanikos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas 4

Pavadinimas **Suvirinimo aerosolio valymo šlapiuoju metodu efektyvumo tyrimas**

Autorius **Lukas Grigaliūnas**

Vadovas **Ina Tetsman**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas suvirinimo aerosolio valymas šlapiuoju metodu. Išanalizuoti aerosolio susidarymo šaltiniai bei poveikis žmogaus organizmui. Nustatyti įrangos parametrai ir pagrindinės charakteristikos įtakančios valymo efektyvumą šlapiuoju metodu. Sudarytas skaičiuojamas absorberio modelis. Eksperimentinėje dalyje aprašytas sukurtas eksperimento stendas, parinkti matavimo įrenginiai, bandymų metodika. Pateikti eksperimento metu gauti ir apdoroti rezultatai. Parengtos rezultatų išvados.

Darbą sudaro 3 dalys: įvadas, analitinė literatūros apžvalga, teorinio metodo dalis, eksperimentinio metodo dalis, išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 60 p. teksto be priedų, 32 iliustr., 8 lent., 28 bibliografinių šaltinių.

Atskirai pridedami priedai.

Prasminiai žodžiai: suvirinimas, aerosolis, šlapiasis metodas, absorbcija, absorberiai, išvalymo efektyvumas.

TURINYS

IVADAS	11
1. ANALITINĖ LITERATŪROS APŽVALGA.....	13
1.1. Suvirinimo aerozolio taršos susidarymas, pagrindinės charakteristikos ir įtaka žmogaus organizmui	13
1.2. Šlapiasis suvirinimo aerozolio valymo būdas	16
1.2.1. Absorbcinis valymo būdas. Absorberiai.....	16
1.2.2. Pagrindiniai fizikiniai procesai vykstantys absorbcijos metu	17
1.2.3. Balansinė masės pernešimo lygtis.....	22
1.2.4. Pagrindiniai absorberio parametrai	24
1.2.5. Sukurinio srauto judėjimo įtaka valymo procesui.....	26
1.3. Akustinio lauko panaudojimas valymo procese	27
1.4. Pirmosios dalies apibendrinimas.....	29
2. SKAIČIUOJAMO METODO PAGRINDIMAS	30
2.1. Kraštinių sąlygų skaičiuojamam modeliui projektuoti nustatymas	30
2.2. Pagrindiniai skaičiuojamo modelio parametrai.....	32
2.3. Skaičiuojamo modelio sudarymas	33
2.4. Antros dalies apibendrinimas	36
3. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI IR REZULTATŲ ANALIZĖ.....	37
3.1. Eksperimentinės įrangos parinkimas	37
3.2. Eksperimento stendo sudarymas	44
3.3. Eksperimento atlikimo eiga	46
3.4. Eksperimento rezultatai.....	47
3.4.1. Oro slėgio pasiskirstymas absorberyje.....	47
3.4.2. Tyrimas suvirinimo aerozolio koncentracijai nustatyti	50
3.4.3. Tyrimas be akustinio lauko ir be sukurinio srauto	50
3.4.4. Tyrimas su akustiniu lauku ir be sukurinio srauto	52

3.4.5. Tyrimas be akustinio lauko ir su sukūriniu srautu	54
3.5. Trečios dalies apibendrinimas	56
IŠVADOS	57
LITERATŪROS SĄRAŠAS	58
PRIEDAI	60

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Pricipinė kryžminio srauto absorberio schema.....	16
2 pav. Masės perdavimas tarp dujinės G ir skystos L fazių	18
3 pav. Absorbcijos procesas koncentracijų $\bar{Y} - \bar{X}$ koordinačių sistemoje	21
4 pav. Principinė absorbcinio proceso schema balansinei masės pernešimo lygčiai nustatyti	23
5 pav. Pagrindinių absorberio parametrų schema	24
6 pav. Eksperimente naudojamo absorberio su sukuriniu oro srautu schema.....	26
7 pav. Hartmano švilpukas	27
8 pav. Garso dažnio priklausomybė nuo rezonatoriaus ilgio ir tūtos skermens	28
9 pav. Principinė skaičiuojamo modelio schema su kraštinėmis sąlygomis	32
10 pav. Skaičiuojamo modelio skaičiuojamųjų parametrų schema	33
11 pav. Teorinis slėgio pasiskirstymas absorberyje pagal parinktus parametrus	35
12 pav. Skaičiuojamo modelio absorbcinio proceso darbinė ir pusiausvyros kreivės pagal parinktus parametrus	35
13 pav. Teorinis slėgio pasiskirstymas absorberyje prie skirtingų valomo oro debitų	36
14 pav. TESTO 340 dūmų analizatorius	37
15 pav. TESTO 452 daugiafunkcis matavimo įrenginys	38
16 pav. Svarstyklės KERN EG	38
17 pav. Kišeninis oro filtras	39
18 pav. Vandens skaitiklis	39
19 pav. Ventiliatorius su elektros pavara.....	40
20 pav. Naudojamas Hartmano švilpukas	40
21 pav. Eksperimente naudojamas absorberis.....	41
22 pav. Mentys sukūriniam oro srautui pagaminti	42
23 pav. Bruel & Kjaer 2250 garso matuoklis.....	43
24 pav. Šoninis siurbtuvas.....	43
25 pav. Pagamintas eksperimento stendas	44
26 pav. Eksperimentinio stendo veikimo schema	45
27 pav. Slėgio matavimo pozicijos absorberio konstrukcijos viduje	46
28 pav. Oro srauto slėgio pasiskirstymas absorberio viduje	48
29 pav. Teorinis ir tikrasis oro slėgio pasiskirstymas absorberyje	49
30 pav. Valymo proceso efektyvumo, be akustinio lauko ir be sukūrinio srauto, teorinės ir eksperimentinės priklausomybės nuo absorbento kiekio.....	51

31 pav. Valymo proceso efektyvumo, su aksutiniu lauku ir be sukūrinio srauto, eksperimentinės priklausomybės nuo absorbento kiekio.....	53
32 pav. Valymo proceso efektyvumo, be aksutinio lauko ir su sukūrinio srautu, eksperimentinės priklausomybės nuo absorbento kiekio.....	55

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Suvirinimo aerozolio kietųjų dalelių medžiagų šaltiniai ir jų poveikiai žmogaus organizmui	14
2 lentelė. Suvirinimo aerozolio dujų susidarymo šaltiniai ir poveikis žmogaus organizmui	15
3 lentelė. Pradiniai skaičiuojamo modelio parametrai	31
4 lentelė. Oro slėgio ir greičio pasiskirstymas absorberyje	47
5 lentelė. Tyrimo suvirinimo aerozolio koncentracijai nustatyti rezultatai	50
6 lentelė. Tyrimo be akustinio lauko ir be sukūrinio srauto rezultatai	50
7 lentelė. Tyrimo su akustiniu lauku ir be sukūrinio srauto rezultatai	52
8 lentelė. Tyrimo be akustinio lauko ir su sukūriniu srautu rezultatai	54

IVADAS

Suvirinimo procesas yra labiausiai paplitęs neišardomųjų jungčių gamybos būdas. Suvirinimas naudojamas didelių gabaritų detalių gamyboje, gaminių sujungimui tarpusavyje, taip pat ir detalių remontui atlikti. Suvirinimo metu susidaro suvirinimo aerosolis – tai polidispersinė heterogeninė sistema: dujinėje terpėje pasiskirsto smulkios kietosios ir skystos dalelės. Tiek kietosios dalelės, tiek susidarančios dujos proceso metu yra pavojingos žmogus organizmui ir yra priskiriamos prie cheminės ir mechaninės taršos.

Tam, kad apsaugoti žmogų nuo suvirinimo aerosolio žalingo poveikio yra įvairių asmeninių apsaugos priemonių, tačiau nevaloma tarša niekur nedingsta, kaupiasi ir gali sukelti žmogui sveikatos sutrikimus bei profesines ligas. Todėl suvirinimo aerosolį yra svarbu tinkamai ir efektyviai pašalinti iš darbo aplinkos ir neutralizuoti.

Baigiamojo darbo tyrimo objektas – absorberis su sukuriniu srautu valantys šlapiuoju metodu ir akustinės koaguliacijos efektu.

Baigiamojo darbo tikslas – išnagrinėti sukurinio srauto parametrų įtaką aerosolio, susidarančio suvirinimo metu, išvalymo efektyvumui valant šlapiuoju metodu su akustinės koaguliacijos efektu ir suformuluoti jų tyrimo metodiką.

Darbo tikslui pasiekti reikia išspręsti šiuos **uždavinius**:

1. Atlikti mokslinės literatūros analizę apie suvirinimo aerosolio susidarymo šaltinius, valymo šlapiuoju metodu pagrindiniais charakteristikas ir dėsnius.
2. Sudaryti skaičiuojamąjį modelį, kurio galima apskaičiuoti ir nustatyti preliminarų aerosolio valymo efektyvumą.
3. Sukurti eksperimentinį stendą suvirinimo aerosolio valymo šlapiuoju metodu efektyvumui ištirti.
4. Išanalizuoti gautus rezultatus ir pateikti išvadas.

Baigiamojo darbo temos aktualumas. Tam, kad išvengti poveikio aplinkai ir žmogaus sveikatai suvirinimo metu susidarančią taršą reikia lokalizuoti darbo vietoje šalinant siurbtuvais užterštą oro srautą, kuris vėliau turi būti išvalytas iki leistinų koncentracijų. Aerosolio mažinimas yra pagrindinė aplinkos apsaugos problema, nes dėl sukeliančių sveikatos sutrikimų žmogus gali susirgti ir tai yra ekonomiškai nenaudinga. Todėl svarbu užtikrinti sklandų teršalų surinkimo ir valymo efektyvumą naudojant mažesnius energijos sąnaudas.

Baigiamojo darbo naujumas. Užterštas oro srautas į absorberį tiekiamas sukuriniu srautu, kuomet pasėkoje padidinamas išvalymo efektyvumas. Šis būdas leidžia pigiai ir be kitų papildomų energijos sąnaudų padidinti oro išvalymą. Paveikiant valomą oro srautą akustiniu lauku sukeliamą dalelių koaguliaciją.

Baigiamojo darbo tyrimo metodai. Rengiant darbą buvo remiamasi teoriniais, praktiniais ir lyginamaisiais metodais.

Darbo struktūra. Magistro baigiamąjį darbą sudaro įvadas, trys dalis ir išvados, Kiekviena darbo dalis suskirstyta į skyrius ir poskyrius, kuriuose analizuojami to paties klausimo skirtingi aspektai.

1. ANALITINĖ LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Suvirinimo aerolio taršos susidarymas, pagrindinės charakteristikos ir įtaka žmogaus organizmui

Suvirinimas – gamybinis procesas, kurio metu dvi detalės arba ruošiniai yra neišardomai sujungiami. Šis procesas vyksta, kai jungties vietoje dvi medžiagos yra įkaitinamos iki didesnės negu jų lydymosi temperatūros. Litavimas, nors jame ir vyksta tokie patys cheminiai procesai, skiriasi nuo suvirinimo, kadangi litavimo metu lydymosi temperatūra yra neviršijama (Adamonis *et al.* 2003).

Egzistuoja daug suvirinimo būdų, kurios galima išskirstyti pagal šias kategorijas (Adamonis *et al.* 2003):

1. Pagal medžiagos būvį. Suvirinimo būdai, kurie yra klasifikuojama pagal šią kategoriją išskiriami į dar dvi grupes. Pirmąją grupę sudaro slėginis suvirinimas. Tokiam būdai priskiriami: kontaktinis, dujinis presinis, termitinis presinis, ultragarsinis, detonacinis, šaltasis, suvirinimas trintimi. Antrąją grupę sudaro lydomieji suvirinimo būdai. Šiai grupei priskiriami: lankinis, elektrošlakinis, suvirinimas elektronų spinduliais, dujinis suvirinimas.
2. Pagal suvartojamos energijos rūšį. Pagal šią kategoriją suvirinimo būdai skirstomi į mechaninius, cheminius, elektrinius, elektromechaninius, cheminius mechaninius. Suvirinant mechaniniu būdu, sujungiamas plastiškai deformuotas metalas. Šiai grupei priklauso šaltasis, trintinis ir detonacinis suvirinimas. Cheminio suvirinimo procese cheminė energija paverčiama šiluma. Suvirinimo zonoje metalas išsilydo, jam sustingus gaunamas susijungimas. Elektrinio suvirinimo procese elektros energija paverčiama šiluma. Elektros energiją paversti šiluma galima elektros lanku, indukuojant metale srovę ir kitais įvairiais būdais. Elektromechaninio suvirinimo procese metalas įkaitinamas iki plastinio būvio, paskui spaudžiant iš išorės, įvyksta plastinė deformacija kurios metu metalai susijungia.

Pagrindiniai suvirintųjų jungčių privalumai (Dambrauskas *et al.* 2004):

1. Galima gauti didelių gabaritų detales gerokai pigiau palyginti su kitais gamybos procesais.
2. Sumažinus sienelių storius ar užlaidas mechaniniam apdirbimui galima gauti mažesnę detalės sumažėjimą palyginti su lietais gaminiais.
3. Suvirinimo proceso automatizavimas.
4. Suvirinimas gali būti atliekamas lauko aplinkoje, po vandeniu, taip pat ir vakuume.

Pagrindiniai suvirintųjų jungčių trūkumai (Dambrauskas *et al.* 2004):

1. Praktiškai neišvengiama sujungimo defektų, kurie sumažina jungties stiprumą.
2. Pagrindinių mechaninių charakteristikų pokytis suvirinimo jungties zonoje.

3. Gaunami liekamieji įtempiai, todėl suvirinimo jungtis turi būti papildomai mechaniškai apdirbama.

Universaliausias ir labiausiai paplitęs suvirinimo būdas yra lankinis (Kim *et al.* 1993). Lankinio suvirinimo metu detalės, kurias reikia suvirinti, yra sujungiamos prilydant kitą medžiagą, pernešamą iš elektrodo. Elektrodai sujungiami prie nuolatinės arba kintamosios elektros srovės šaltinio. Suvirinant susidaro įtampa tarp dviejų elektrodų, kurių vienas yra naudojamas elektrodas, o kitas – suvirinamasis metalas. Palietus elektrodu suvirinamąjį metalą, suvirinimo grandinėje įvyksta trumpasis jungimas. Srovė elektrodo su metalu susilietimo vietoj būna labai didelė ir metalai išsilydo.

Labiausiai paplitę lankinio suvirinimo būdai (Kim *et al.* 1993):

1. MMA – suvirinimo būdas glaistytais elektrodais.
2. MIG – suvirinimas apsauginių inertinių dujų aplinkoje.
3. SAW – suvirinimo po fluso procesas.
4. TIG – suvirinimas volframinio elektrodo apsauginių dujų aplinkoje.

Galima išskirti pagrindinius lankinio suvirinimo būdo trūkumus (Kim *et al.* 1993):

1. Lankinio suvirinimo procesas yra gana lėtas.
2. Suvirinimo kokybė priklauso nuo suvirintojo patirties.
3. Šis būdas netinka labai plonų matmenų metalo gaminiams.

Suvirinimo aerosolis – dūminė aerosolio sistema, susidaranti iš kietųjų dalelių, kurių sudėtis priklauso nuo suvirinamų medžiagų, ir dujų, susidarančių suvirinimo metu. Dalelių dydis dūmuose būna 0,001–10 µm. Suvirinimo procese gali susidaryti šių tipų dujos (Johansson *et al.* 1981):

1. Anglies dioksidas.
2. Anglies monoksidas.
3. Azoto oksidai.
4. Vandenilio chloridas ir fosgenas.

Suvirinimo aerosolis yra kensminga medžiaga žmogaus organizmui, patenkanti per plaučius. Toliau pateiktose lentelėse aprašomi suvirinimo aerosolio susidarymo šaltiniai ir galimas jų poveikis įkvepiant.

1 lentelė. Suvirinimo aerosolio kietųjų dalelių medžiagų šaltiniai ir jų poveikiai žmogaus organizmui (Kim *et al.* 1993) (Singh *et al.* 2016) (Sultan *et al.* 2005)

Medžiaga	Šaltinis	Poveikis žmogaus organizmui
Aliuminis	Lydiniai, kuriuose yra aliuminio	Kvėpavimo dirginimas
Berilis	Grūdinimo agentas randamas varyje, magnyje, aliuminio lydiniuose	Karščiavimas, kvėpavimo takų pažeidimai
Cinkas	Cinkuoti ir dažyti metalai.	Karščiavimas

Medžiaga	Šaltinis	Poveikis žmogaus organizmui
Chromas	Nerūdyjantis plienas, kuriame yra daug legiruotos medžiagos	Padidėjusi rizika susirgti palučių vėžiu, kartais sukeliamas odos dirginimas
Fluoridas	Dažna elektrodo dangos ir fluso medžiaga elektrodams, skirtiems legiruotiems plieno lydiniams	Akių, nosies ir burnos dirginimas, ilgalaikis kontaktas gali sukelti kaulų ir sąnarių problemas
Kadmis	Nerūdijantis plienas kuriame yra kadmio; nerūdijantis plienas padengtas cinko lydiniu	Kvėpavimo sistemos dirginimas, gerklės džiovimas, skausmas krūtinėje, sunkumas kviepuoti
Geležis	Geležies ir nerūdyjančio plieno suvirinimo procesas	Geležies ir nerūdyjančio plieno suvirinimo procesas
Manganas	Didelės stiprumo ribos plienai	Lėtinis nervų sistemos poveikis, karščiavimas
Molibdenas	Plieno lydiniai, geležis, nerūdijantis plienas, nikelio lydiniai	Dusulys, akių, nosies ir gerklės dirginimas
Nikelis	Monelmetalas, nikelio lydinys „Inconel“	Akių, nosies ir burnos dirginimas, retesniais atvejais dertmatitas ir plaučių problemos
Švinas	Lydmetalas, žalvario ir bronzos lydiniai	Lėtinis nervų sistemos, inkstų, virškinimo sistemos ir psichologinis poveikis, švino apsinuodijimas
Vanadis	Kai kurie plieno lydiniai, geležis, nerūdijantis plienas, nikelio lydiniai	Ūminis poveikis yra akių, odos ir kvėpavimo takų dirginimas. Lėtinis poveikis gali sukelti bronchitą, tinklainės uždegimą, skystį plaučiuose ir pneumoniją.
Varis	Žalvaris, bronzos	Akių, nosies ir burnos dirginimas, pykinimas, karščiavimas

2 lentelė. Suvirinimo aerozolio dujų susidarymo šaltiniai ir poveikis žmogaus organizmui (Kim *et al.* 1993) (Singh *et al.* 2016) (Sultan *et al.* 2005)

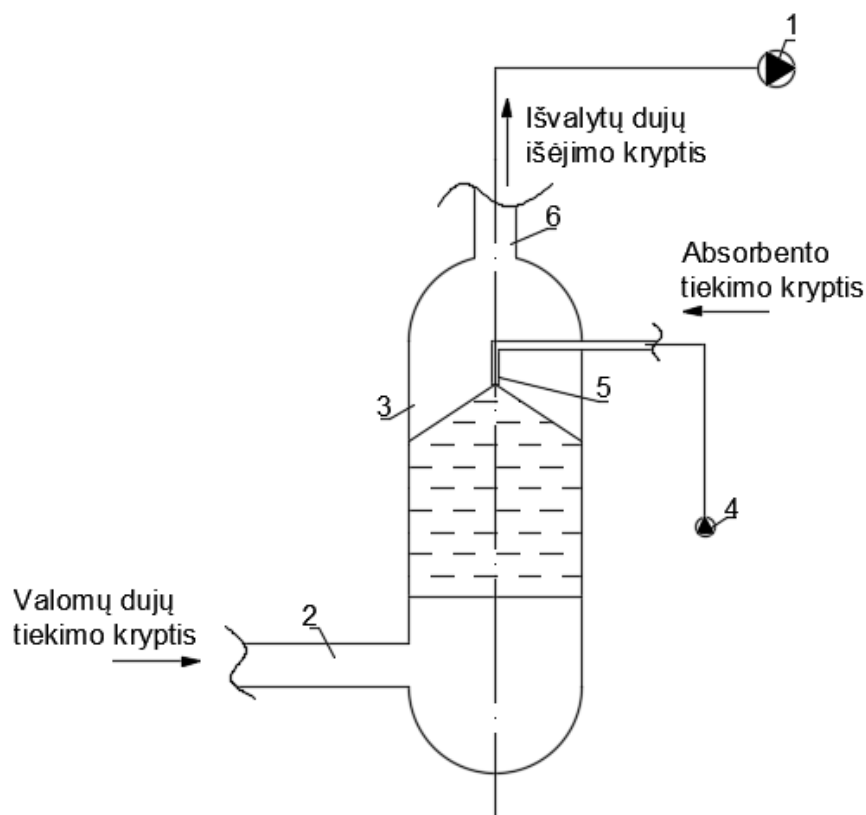
Mesžiaga	Šaltinis	Poveikis žmogaus organizmui
Anglies monoksidas	Susiformuoja elektros lanke	Patenką į kraujotaką sukeldamas galvos skausmą, svaigulį ir raumenų silpnėjimą. Didelė koncentracija sukelia sąmonės netekimą ir mirtį.
Vandenilio fluoridas	Susidaro įrant elektrodo dangai	Dirgina akis ir kvėpavimo takus. Ilgalaikis poveikis sukelia plaučių, inkstų, kaulų ir kepenų pažeidimus. Lėtinis poveikis gali sukelti lėtinį nosies, gerklės ir bronchų dirginimą
Azoto oksidas	Susiformuoja elektros lanke	Mažos koncentracijos sukelia akių, nosies ir gerklės dirginimas. Didesnės koncentracijos sukelia skysčio kaupimąsi plaučiuose
Ozonas	Susiformuoja elektros lanke, dažniausiai MIG ir TIG tipuose	Labai mažos koncentracijos sukelia galvos skausmą ir sausina akis. Lėtinis poveikis sukelia nepagydomą plaučių funkcijos pokytį.

Apibendrinant matoma, kad suvirinimo procesas yra plačiai taikomas gamyboje. Suvirinimas leidžia sujungti detales tarpusavyje, gauti įvairių gabaritų gaminius ir t. t. Tačiau šio proceso metu susidaro kenksminga medžiaga – suvirinimo aerosolis. Aerosolis susidaro iš kietųjų dalelių ir dujų. Kietosios dalelės neigiamai veikia žmogaus organizmą, o kenksmingos dujos, susidarantys suvirinimo metu, sukelia sunkias ligas ar net mirtį. Atsižvelgiant į tai matyti, kad daug dėmesio naudojant suvirinimo procesą reikia skirti aerosolio koncentracijai ore kontroliuoti ir užtikrinti optimalų šios medžiagos valymą iš oro.

1.2. Šlapiasis suvirinimo aerosolio valymo būdas

1.2.1. Absorbcinis valymo būdas. Absorberiai

Absorbcija – procesas, kurio metu kietieji kūnai arba skysčiai sugeria (arba absorbuoja) kitas medžiagas. Kitaip tariant, absorbcija yra valomos medžiagos sugėrimas absorbentu. Absorbentu dažniausiai būna skystoji medžiaga, kuri pasižymi cheminėmis savybėmis sugerti arba ištirpinti reikiamą taršą. Absorberis – oro valymo įrenginys, naudojantis absorbcijos principą. Principinė absorberio konstrukcija pateikta 1 paveiksle.



1 pav. Principinė kryžminio srauto absorberio schema:

1 – ventiliatorius, 2 – dujų įėjimo vamzdis, 3 – absorberio korpusas, 4 – vandens siurblys, 5 – purkštukas, 6 – dujų išėjimo vamzdis (Weiner *et al.* 2003)

Valomų dujų srautas traukiamas ventiliatoriaus 1 patenką į įrenginio korpusą 3 per įėjimo vamzdį 2. Viduje dujų srautas yra traukiamas aukštyr ventiliatoriaus. Tuo tarpu absorbentas (šiuo atveju skystoji medžiaga) siurbliu 4 tiekiamas į įrenginį. Absorbentas tiekiamas kryžminiu srautu į dujų srautą ir yra išpurškiamas į įrenginio vidų purkštuku 5. Vykstant absorbcijai, absorbentas sugeria arba ištirpina iš valomų dujų kenksmingas medžiagas. Išvalytos dujos iš įrenginio pašalinamos per išėjimo vamzdį 6.

1 paveiksle matome, kad absorbentas yra tiekiamas purkštuku. Purkštukas gali būti vienas arba sudaryta kelių purkštukų sistema, svarbiausia kad absorbentas būtų paskirstytas per visą įrenginio skerspjūvio plotą. Absorberiai taip pat yra gaminami su viduje įrengta įkrova. Kaip pavyzdys, įkrova gali būti pusapvaliai Rašigo žiedai. Įkrova yra įrengiama po purkštukais. Judant absorbentui žemyn Rašigo žiedai verčia jį judėti aplink save. Absorbentui judant aplink žiedus, kurie išdėstyti vienas šalia kito, susidaro plėvelė, kuri padidina kontakto paviršiaus plotą, kadangi valomos dujos juda per plėvelę, o ne per lašus.

Pagrindiniai absorberio privalumai (Weiner *et al.* 2003):

1. Nesudėtinga ir paprasta korpuso konstrukcija.
2. Mažas hidraulinis pasipriešinimas.
3. Absorbcija išvalo dujas ir kietasias daleles kartu (nereikia nusodintuvų kietosios dalelės ar kitų įrenginių dujų išvalymui).

Pagrindiniai absorberio trūkumai (Weiner *et al.* 2003):

1. Efektyviausia yra kryžminio srauto konstrukcija, todėl konstrukcijos turi būti stačios kryžminiam srautui užtikrinti.
2. Esant kryžminiam srautui yra tikimybė purkštukams užsikimšti.

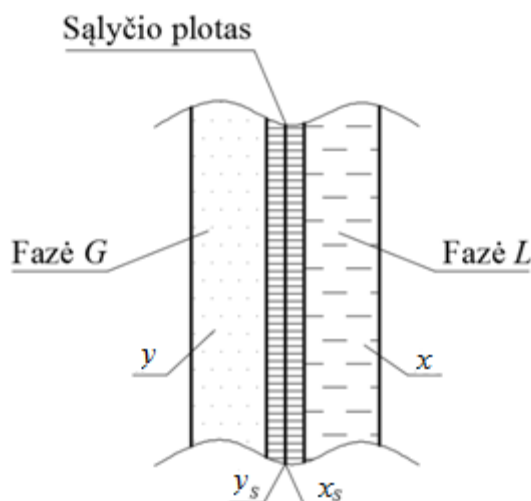
Atsisžvelgiant į minėtus privalumus ir trūkumus, matoma kad optimaliausias šlapiojo valymo būdas yra absorberis su kryžminio srauto valymu.

1.2.2. Pagrindiniai fizikiniai procesai vykstantys absorbcijos metu

Absorbcinis procesas dar gali būti vadinamas masės perdavimu tarp dviejų fazių. Išskiriamos dvi masės perdavimo rūšys (Bin *et al.* 2016):

1. Masės mainai tarp kietojo kūno ir dujų.
2. Masės mainai tarp skystosios medžiagos ir dujų.

Masės perdavimas tarp skyščio ir dujinės fazės parodytas 2 paveiksle. Medžiaga, kuri yra dujinė fazėje G su moline koncentracija y , pereina į skystąją fazę L , kurioje medžiagos molinė koncentracija pasikeitė į x . Masės perdavimas vyksta tol, kol medžiagos molinės koncentracijos fazių sąlyčio vietoje nebus lygios, k.t. kol $y_s \neq x_s$. Kai koncentracijos prie sąlyčio plotų susilygina absorbcija nebevyksta (Bin *et al.* 2016).



2 pav. Masės perdavimas tarp dujinės G ir skystos L fazių:

y – medžiagos molinė koncentracija dujinėje fazėje G , y_s – medžiagos molinė koncentracija dujinėje fazėje prie fazių sąlyčio ploto, x – medžiagos molinė koncentracija skystoje fazėje L , x_s – medžiagos molinė koncentracija skystoje fazėje prie fazių sąlyčio ploto (Bin *et al.* 2016)

Kai koncentracijos susilygina įvyksta pusiausvyra. Pusiausvyra yra nusakoma Henrio dėsnio – ištirpusių dujų kiekis yra proporcingas daliniam slėgiui dujų fazėje. Henrio dėsnio matematinė išraiška (Sander 2015):

$$P_p = k_H \cdot \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

čia

P_p – parcialinis slėgis, Pa;

C – tirpale nusistovėjusi ištirpusių dujų koncentracija per laiko tarpą;

k_H – proporcingumo koeficientas.

Proporcingumo koeficientas k_H yra vadinamas Henrio konstanta, kuris kiekvienai medžiagai yra skirtingas (Sander 2015).

Norint panaudoti Henrio dėsnį reikia žinoti medžiagos parcialinį slėgį. Parcialinis slėgis yra komponento, kuris yra susimaišęs su kitomis medžiagomis, slėgis. Matematinė šio dydžio išraiška (Mayers *et al.* 1965):

$$P_{full} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

čia

P_{full} – bendras dujų srauto slėgis, Pa;

P_i – parcialinis komponento slėgis, Pa.

Kadangi parcialinių slėgių suma lygi bendram srauto su skirtingais komponentais slėgiui, ši parametrai reikia nustatyti. Bendrą dujų srauto slėgį sudaro dinaminio ir statinio slėgio suma (Mayers *et al.* 1965):

$$P_{full} = P_D + P_S \quad (3)$$

čia

P_D – dinaminis srauto slėgis, Pa;

P_S – statinis srauto slėgis, Pa.

Dinaminis srauto slėgis randamas žinant dujų tankį ir tekėjimo greitį (Mayers *et al.* 1965):

$$P_D = \frac{\rho_{full}(T)}{2} \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \quad (4)$$

čia

$\rho_{full}(T)$ – bendras dujų mišinio tankis, kg/m³;

$\frac{dx}{dt}$ – srauto padėties kitimas laike (srauto greitis), m/s.

Statinis slėgis lygus trinties ir vietinių slėgių nuostolių sumai (Zapke *et al.* 2000):

$$P_S = R_S \cdot l_x + Z_s \quad (5)$$

čia

R_S – trinties nuostoliai, kg/m²s²;

l_x – atkarpos ilgis, kurioje juda srautas, m;

Z_s – vietiniai slėgio nuostoliai, Pa.

Statinį slėgį patogiau skaičiuoti pagal bendrąją formulę (Mayers *et al.* 1965):

$$P_S = \left(\frac{\lambda}{d_x} + \sum_{i=1}^n \zeta_i \right) \frac{\rho_{full}(T)}{2} \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \quad (6)$$

čia

λ – hidraulinė trinties koeficientas;

$\sum_{i=1}^n \zeta_i$ – vietinių nuostolių suma;

d_x – skersmuo vamzdžio, kuriuo juda dujų srautas, m.

Hidraulinės trinties koeficientas priklauso nuo vamzdžio, kuriuo juda srautas, paviršiaus šiurkštumo ir Reinoldso skaičiaus. Matematinė šio dydžio išraiška (Kamand 1988):

$$\lambda = 0,25 \cdot \left(\lg \frac{\Delta e}{3,71 d_x} + \frac{5,621}{Re^{1,09}} \right) \quad (7)$$

čia

Δe – vamzdžio paviršiaus šiurkštumas, mm;

Re – Reynolds'o skaičius.

Iš formulių 4–7 matoma, kad svarbu nustatyti dar du dydžius – bendrą dujų mišinio tankį ir Reynolds'o skaičių.

Bendras dujų mišinio tankis ρ_{full} randamas panašiu būdu kaip ir bendras srauto slėgis (Wilke 1950):

$$\rho_{full} = \sum_{i=1}^n C_i \rho_i \quad (8)$$

čia

C_i – komponento koncentracija dujų mišinyje;

ρ_i – komponento tankis, kg/m^3 .

Reynolds'o skaičiaus matematinė išraiška (Wilke 1950):

$$\text{Re} = \frac{d_x}{\mu_d} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (9)$$

čia

μ_d – bendra dujų srauto dinaminė klampa, Pa·s.

Bendra dinaminė klampa preliminarai gali būti apskaičiuojama taip pat kaip ir bendras dujų srauto tankis (Wilke 1950):

$$\mu_{Dfull} = \sum_{i=1}^n C_i \mu_i \quad (10)$$

Tikslesniam dinaminės klamos skaičiavimui galima naudoti formules (Wilke 1950):

$$\mu_{Dfull} = \frac{C_1 \mu_1}{C_1 + C_2 \phi_{12}} + \frac{C_2 \mu_2}{C_2 + C_1 \phi_{21}} \quad (11)$$

$$\phi_{12} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^{\frac{1}{4}} \right]}{\left[8 \times \left[1 + \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (12)$$

$$\phi_{21} = \phi_{12} \times \frac{\mu_2}{\mu_1} \times \frac{M_1}{M_2} \quad (13)$$

čia

M_1 ir M_2 – molinės komponentų masės, kg/mol ;

ϕ_{12} ir ϕ_{21} – koeficientai.

Galima pastebėti, kad patogiau naudoti 10 formulę. 11 formulė tinkamiausia kai mišinį sudaro du komponentai. Kitu atveju reikia sudaryti mišinio medžiagų kombinacijas.

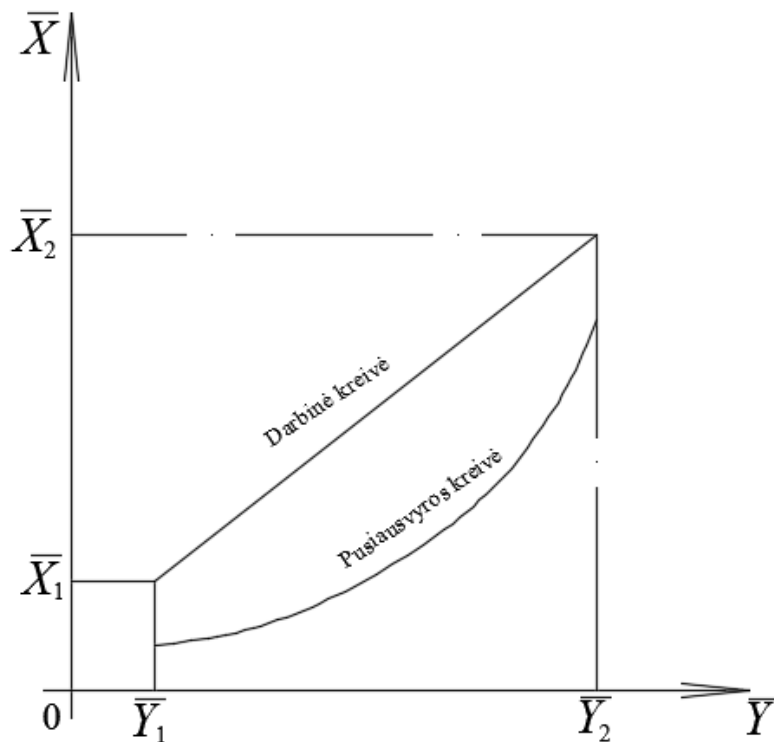
Kol absorbcijos procese nenusistovi pusiausvyra, masės pernešimas vyksta įveikus pasipriešinimą, susidariusį fazių sąlyčio plote. Jėga, kuriai veikiant medžiaga iš dujinės fazės pernešama į skystąją fazę, vadinama varos jėga (Kunze *et al.* 2015). Varos jėgai nustatyti reikia pavaizduoti

absorbcijos procesą. Procesui pavaizduoti patogiu naudoti bedimensėmis koncentracijų koordinatėmis $\bar{Y} - \bar{X}$. Bedimensės koncentracijos apskaičiuojamos pagal formules (Lewis *et al.* 1924):

$$\bar{X} = \frac{x}{1-x} \quad (14)$$

$$\bar{Y} = \frac{y}{1-y} \quad (15)$$

Tariama, kad turimos valomos dujos, kuriose yra teršalu su koncentracija y_1 . Žinoma, kad po valymo teršalų koncentracija sumažės iki y_2 . Atitinkamai naudojamame absorbente teršalų koncentracija nuo pradinės x_1 pakis iki x_2 . Žinant šias reikšmes, galima apskaičiuoti bedimenses koncentracijų reikšmes ir tokiu būdu gauti du taškus. Žinant Henrio dėsnį taip pat galima nustatyti pusiausvyros koncentracijų reikšmes. Turint šią informaciją, galima nubrėžti absorbcinio proceso darbinį grafiką, pavaizduotą 3 paveiksle.



3 pav. Absorbcijos procesas koncentracijų $\bar{Y} - \bar{X}$ koordinačių sistemoje (Lewis *et al.* 1924)

Varos jėga, norint pernešti teršalų masę iš koncentracijos $\bar{Y}_1$ į bet kurio laiko momentu esančią koncentraciją $\bar{Y}_s$, lygi plotui, esančiui tarp darbinės ir pusiausvyros kreivės ties tašku $\bar{Y}_s$. Matematinė šio dydžio išraiška (Kunze *et al.* 2015):

$$F_V = \int_{\bar{Y}_1}^{\bar{Y}_s} \frac{dY}{(Y - Y^*)} \quad (16)$$

Integralą patogiau išreikšti per logaritminį vidurkį. Tokiu atveju lygtis 16 supaprastinama (Kunze *et al.* 2015):

$$F_V = \frac{\overline{Y}_S - \overline{Y}_1}{(Y - Y^*)_{\ln}} \quad (17)$$

Formulėse 16-17 Y laikome darbinės kreivės funkciją, o Y^* – pusiausvyros kreivės funkciją.

Varos jėga galima apskaičiuoti ir su molinėmis koncentracijų reikšmėmis. Tokiu atveju, lygtis 16 atrodytu taip (Kunze *et al.* 2015):

$$F_V = \int_{y_s}^{y_1} \frac{dy}{(y - y^*)} \quad (18)$$

Išreiškiama integralą per logaritminį vidurkį 17 formulės principu (Kunze *et al.* 2015):

$$F_V = \frac{y_{in} - y_s}{(y - y^*)_{\ln}} \quad (19)$$

Galima išskirti, kad pagrindiniai fizikiniai dydžiai, leidžiantys atlikti tolimesnius skaičiavimus absorbciniam procesui, yra:

1. Teršalų pradinės ir galinės molinės koncentracijos dujinėje ir skystoje fazėse.
2. Henrio konstanta.
3. Varos jėga.

1.2.3. Balansinė masės pernešimo lygtis

Absorbicinis procesas gali būti aprošomas lygtimi, kuri vadinama balansinė masės pernešimo lygtimi (Codolo *et al.* 2016):

$$G_{in} + L_{in} = L_{out} + G_{out} \quad (20)$$

čia

G_{in} – dujų srautas įeinantis į absorberį, kmol/m²s;

G_{out} – dujų srautas išeinantis iš absorberio, kmol/m²s;

L_{in} – skystojo srautas įeinantis į absorberį, kmol/m²s;

L_{out} – skystojo srautas išeinantis iš absorberio, kmol/m²s.

Tarkime, kad valomose dujose naikinama medžiaga yra komponentas A. Tuomet, pagal lygtį 20, balansinė lygtis komponentui A galime parašyti taip (Codolo *et al.* 2016):

$$G_{in} y_{Ain} + L_{in} x_{Ain} = L_{out} x_{Aout} + G_{out} y_{Aout} \quad (21)$$

čia

y_{Ain} – komponento A molinė koncentracija dujų fazėse įėjimo metu;

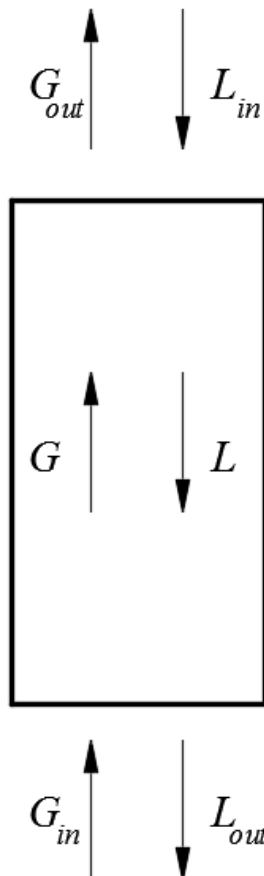
y_{Aout} – komponento A molinė koncentracija dujų fazėse išėjimo metu;

x_{Ain} – komponento A molinė koncentracija skystos fazės įėjimo metu;

x_{Aout} – komponento A molinė koncentracija skystos fazės išėjimo metu.

Balansinėje lygtyje taip pat galime naudoti bedimenses koncentracijų reikšmes, apskaičiuojamas pagal formules 14–15. Parašome lygtį 21 naudojama bedimenses koncentracijas (Codolo *et al.* 2016):

$$\bar{L}\bar{X}_{Ain} + \bar{G}\bar{Y}_{Ain} = \bar{L}\bar{X}_{Aout} + \bar{G}\bar{Y}_{Aout} \quad (22)$$



4 pav. Principinė absorbcinio proceso schema balansinei masės pernešimo lygčiai nustatyti (Codolo *et al.* 2016)

Išsireikškę komponento A dujų koncentraciją išėjimo vietoje, gauname darbinę absorbcinio proceso lygtį bet kuriame absorberio taške (Codolo *et al.* 2016):

$$\bar{Y}_{Aout} = \frac{\bar{L}}{\bar{G}} \bar{X}_{Aout} + \left(\bar{Y}_A - \frac{\bar{L}\bar{X}_A}{\bar{G}} \right) \quad (23)$$

Turint balansinę masės lygtį, o taip pat pusiausvyros priklausomybę pagal Henrio dėsnį, galima iš anksto nustatyti kokiame taške susikirs darbinė ir pusiausvyros kreivė. Gautas taškas rodo kada varos jėga lygi nuliui. Ši sąlyga reiškia minimalų tirpiklio kiekį norint išgauti norimą tirpinio kiekį, arba tirpiklio normą, reikalingą norint pašalinti didžiausią tirpinio kiekį (Kunze *et al.* 2015).

1.2.4. Pagrindiniai absorberio parametrai

Absorberio skersmuo gali būti nustatomas remiantis kriterijais, kad dujų, tekančių aukštyn, greitis turi būti pakankamai žemas, kad lašeliai galėtų laisvai kristi žemyn. Kai bokšto skersmuo D_{Abs} yra nustatytas, purškimo zonos aukštis gali būti nustatomas iš purkštuko įpurškimo kampo pagal formulę (Javed *et al.* 2006):

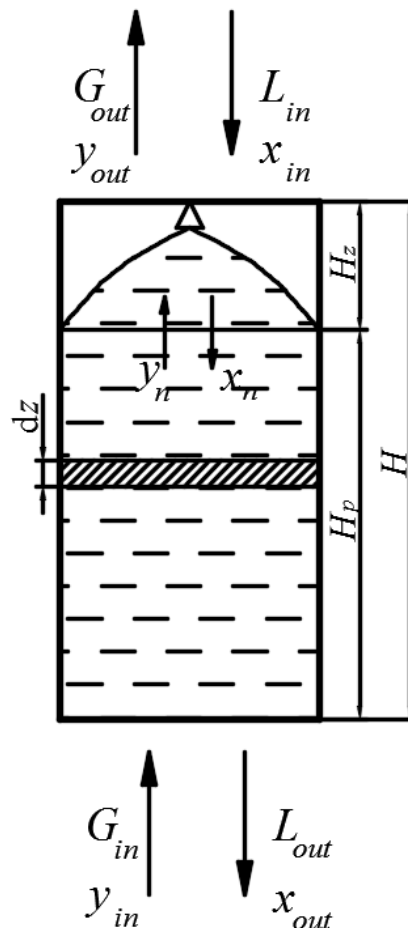
$$H_z = \frac{D_{Abs}}{2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (24)$$

čia

D_{Abs} – absorberio skersmuo, m;

H_p – purškimo zonos aukštis, m;

θ – purkštuko įpurškimo kampas, °.



5 pav. Pagrindinių absorberio parametrų schema (Javed *et al.* 2006)

Valomos medžiagos koncentracija dujų sraute paliekant drėkinamos sienos zoną y_n ir valomos medžiagos koncentracija skysčio sraute x_n , paliekant purškimo zoną (pavaizduota 5 paveiksle), galime apskaičiuoti per purškimo zonos aukštį (Javed *et al.* 2006):

$$H_z = \frac{G(y_n - y_{out})}{K_{gd} a \cdot P \cdot (y - y^*)_{lm}} \quad (25)$$

čia

K_{gd} – dujų fazės masės pernešimo koeficientas absorbcijai lašeliuose, $\text{kmol/m}^3\text{s}\cdot\text{atm}$;

P – bendras slėgis, atm;

a – fazių kontakto paviršiaus plotas, m^2 ;

y_n – valomos medžiagos koncentracija dujų sraute paliekant drėkinamos sienos zoną, mol/m^3 ;

y_{out} – valomos medžiagos koncentracija dujų fazėje absorberio išėjimo angoje, mol/m^3 .

25 formulėje naudojamas dydis $(y - y^*)_{lm}$ gali būti naudojamas skaičiuojant varos jėgą jau minėtais būdais.

Purškimo zonoje balansinė masės mainų lygtis aprašoma (Javed *et al.* 2006):

$$y_n = \frac{L}{G}(x_n - x_{in}) + y_{out} \quad (26)$$

čia

x_n – valomos medžiagos koncentracija skystojo sraute paliekant drėkinamos sienos zoną, mol/m^3 ;

x_{in} – valomos medžiagos koncentracija skystoje fazėje absorberio įėjimo angoje, mol/m^3 .

Drėkinamos sienos zonoje H_P vienu metu absorbuojamas tirpios dujos lašeliuose ir susidariusioje skystoje plėvelėje. Šio aukščio apskaičiavimas remiasi dviem masės perdavimo procesais. Stacionarioji masės pusiausvyra dujų fazei virš bokšto diferencinio aukščio dz gali būti apskaičiuojama pagal formulę (Javed *et al.* 2006):

$$G \frac{dy}{dz} = N_{Ad} a_d + N_{Aw} a_w \quad (27)$$

čia

N_{Ad} – masės srautas tarp dujų ir lašelių, $\text{kmol/m}^2\text{s}$;

N_{Aw} – masės srautas tarp dujų ir skystos plėvelės, $\text{kmol/m}^2\text{s}$;

a_d – dujų fazės kontakto paviršiaus plotas, m^2 ;

a_w – skystos plėvelės kontakto paviršiaus plotas, m^2 .

Daroma prielaida, kad tos pačios koncentracijos varomoji jėga tarp dujų ir lašelių bei dujų ir skystos plėvelės yra lygi, tuomet masės srautas gali būti išreikštas lygtimis (Javed *et al.* 2006):

$$N_{Ad} = K_{gd} P (y - y^*) \quad (28)$$

$$N_{Aw} = K_{gw} P (y - y^*) \quad (29)$$

čia

K_{gw} – dujų fazės masės perkėlimo koeficientas absorbcijai skystos plėvelės pagalba, $\text{kmol/m}^3\text{s}\cdot\text{atm}$

Sulyginamos lygtis 27–29 (Javed *et al.* 2006):

$$G \frac{dy}{dz} = (K_{gd}a_d + K_{gw}a_w)P(y - y^*) \quad (30)$$

Drėkianamos sienelės zonos aukštis H_p , reikalingas norint pakeisti tirpalo koncentraciją nuo y_{in} iki y_n , gali būti nustatoma integruojant lygtį (Javed *et al.* 2006):

$$H_p = \frac{G}{(K_{gd}a_d + K_{gw}a_w)P} \int_{y_n}^{y_{in}} \frac{dy}{(y - y^*)} \quad (31)$$

Iš formulių 28–31 matoma, kad dydį $\int_{y_n}^{y_{in}} \frac{dy}{(y - y^*)}$ galime užrašyti kaip varomąją jėgą F_v .

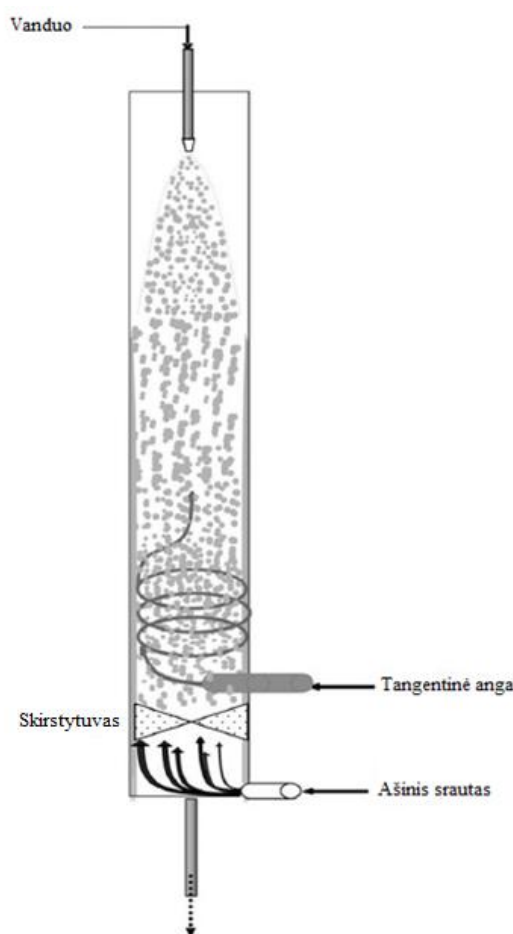
Bendras absorberio aukštis (Javed *et al.* 2006):

$$H = H_z + H_p \quad (32)$$

Iš formulių 24–31 matoma, kad svarbus absorberio parametras, kuris veikia išvalymo efektyvumą, yra masės pernešimo koeficientas. Būtent projektuojant įrenginius, kurie valo dujas absorbcijos principu, svarbiausiai parinkti kuo didesni sąlyčio plotą ir masės pernešimo koeficientą.

1.2.5. Sūkurinio srauto judėjimo įtaka valymo procesui

Mokslininkų komanda 2006 m. atliko tyrimą, kurio metu absorberyje srautas buvo tiekiamas sūkuriniu srautu (Javed *et al.* 2006). Eksperimente naudoto absorberio konstrukcija pateikta 6 paveiksle.



6 pav. Eksperimente naudojamo absorberio su sūkuriniu oro srautu schema (Javed *et al.* 2006)

Oro srautas, tiekiamas per angą, juda ašiniu srautu. Viduje srautas juda aukštyn per skirstytuvą. Skirstytuvą suteikia kryptį oro srautui, o papildomas oras, tiekiamas per tangentinę angą, sukelia sukurinį valomo srauto judėjimą.

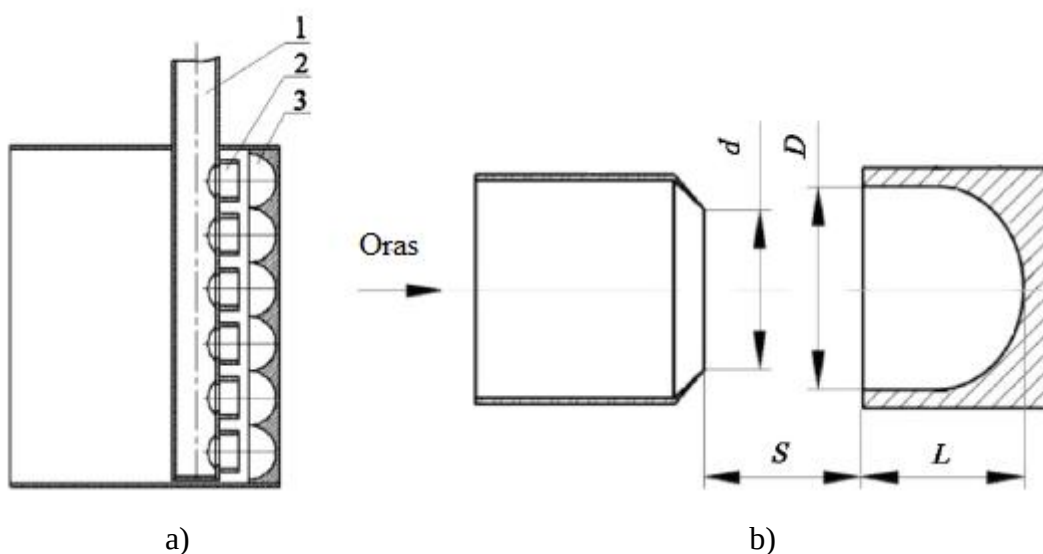
Judant sukuriniu srautu kietosios dalelės yra prispaudžiamos išcentrinėse jėgų arčiau konstrukcijos vidinių sienų. Dalelės trinasi į sienelę, ir dėl trinties nuostolių praranda energiją. Tokiu būdu kietosios dalelės netenka kinetinės energijos ir pradeda kristi žemyn.

Mokslininkų atlikto eksperimento metu buvo nustatyta, kad sukurinis oro srautas išvalymo efektyvumą absorberioje padidino 13-20 %. Tačiau reikia atsižvelgti kad sukurinis srautas padidina kietųjų dalelių pašalinimą iš valomo oro. Dujų valymui sukurinis srautas didelės įtakos neturi.

1.3. Akustinio lauko panaudojimas valymo procese

Vibroakustinis laukas, sukeltas įvairių šaltinių, gali paveikti kietąsias daleles aerozolyje ir sukelti dalelių koaguliaciją, t. y. dalelių sulipimą vieną prie kitos. Kietosioms dalelėms sulipus jų skermuo padidėja ir todėl jas lengviau surinkti arba išvalyti.

Akustinis laukas gali būti sukeliamas Hartmano švilpuko. Principinė schema pateikta 7 paveiksle.



7 pav. Hartmano švilpukas:

a – principinė schema: 1 – oro tiekimo vamzdelis, 2 – tūta, 3 – rezonatorius

b – pagrindiniai dydžiai: d – tūtos skersmuo, D – rezonatoriaus skersmuo, S – atstumas tarp rezonatoriaus ir tūtos, L – tūtos ilgis (Vekteris *et al.* 2017)

Oras, judėdamas per padavimovamzdelį, juda per tūtas ir atsimuša į rezonatorių. Sukeltos smūginės bangos sudaro akustinį lauką. Keičiant 7 paveiksle b) dalyje pateiktus parametrus galima išgauti įvairių skirtingų dažnių ir garso slėgių akustinius laukus.

Akustinio lauko, sukeliama Hartmano švilpuku, dažnis apskaičiuojamas pagal formulę (Vekteris *et al.* 2017):

$$f = (2n-1) \frac{c}{4(L+0,3d)} \quad (33)$$

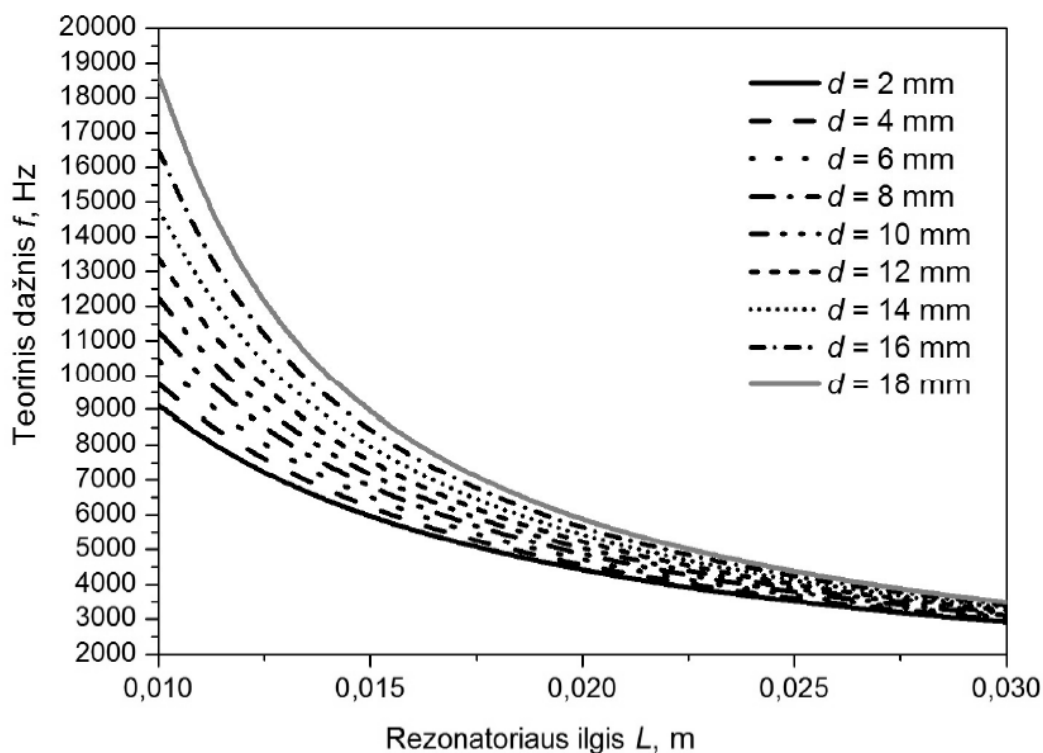
čia

n – sveikasis skaičius;

c – garso greitis, m/s;

L – rezonatoriaus ilgis, m;

d – tūtos skersmuo, m.



8 pav. Garso dažnio priklausomybė nuo rezonatoriaus ilgio ir tūtos skersmens (Vekteris *et al.* 2017)

Eksperimentiškai buvo nustatyta, kad kietųjų dalelių, kurių skersmuo yra mažesnis negu 10 μm , koaguliacija efektyviausiai vyksta esant 120 dB slėgiui ir 1-5 kHz dažniui. Norint gauti šį rezultatą, Hartmano švilpuko parametrai turi būti (Vekteris *et al.* 2017):

1. Rezonatoriaus ilgis $L = 15,7$ mm.
2. Atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus $S = 2$ mm.
3. Tūtos ir rezonatoriaus skersmenų santykis 1,66.

1.4. Pirmosios dalies apibendrinimas

Nagrinėjant suvirinimo aerozolio susidaro šaltinius pastebėta, kad visos kenksmingos dujos susidaro elektros lauke arba yrant elektrono dangai, todėl dujinė aerozolio sandara priklauso nuo naudojamo elektrodo. Kietosios dalelės susidaro lydantis jungiamoms detalėms ir jų šaltinis priklauso nuo detalių medžiagų.

Įvertinant visus procesus, kurie vyksta absorberiuose, svarbu žinoti arba nustatyti valomų dujų debitą, absorbento debitą ir slėgių kitimą absorberijoje. Žinant šiuos dydžius, galima apskaičiuoti kitus reikiamus parametrus ir nustatyti masės perdavimo koeficientą.

Sūkurinio srauto panaudojimas absorberijoje valymo efektyvumą gali pagerinti iki 13-20 %.

Sukeltas akustinis laukas efektyviausiai sukelia smulkių kietųjų dalelių koaguliaciją, kai lauko dažnis siekia 1-5 kHz ir garso slėgis siekia 130 dB.

2. SKAIČIUOJAMO METODO PAGRINDIMAS

2.1. Kraštinių sąlygų skaičiuojamam modeliui projektuoti nustatymas

Šlapiajam valymo metodui galima išskirti tris kategorijas, kuriomis remiantis sudaromos kraštinės sąlygos:

1. Valomų dujų parametrai.
2. Absorbuojančio skysčio charakteristikos.
3. Absorberio konstrukcijos pagrindiniai dydžiai.

Pagrindiniai valomų dujų parametrai:

1. Valomų dujų sudėtis. Nagrinėjamas oras, užterštas suvirinimo aerozoliu.
2. Taršos sudėtis. Šiuo atveju suvirinimo aerozolį sudaro kietosios dalelės ir dujos.
3. Bendra taršos arba jos sudaromųjų medžiagų koncentracija.
4. Valomo oro debitas.
5. Valomo oro temperatūra.

Žinant šiuos parametrus galima apskaičiuoti kitus dominančius dydžius, tarkim, oro tankį, pratekėjusią valomo oro masę ir pan.

Galima išskirti dvi pagrindines absorbento charakteristikas:

1. Absorbento sudėtis. Tai gali būti rūgštys, šarmai. Darbe nagrinėjamas vanduo kaip absorbentas.
2. Absorbento debitas. Jis nėra būtinas, bet galimi variantai, kai projektuojant absorberį svarbu neviršyti galimo skysčio kiekio.

Nagrinėjant 1 skyriuje aptartus absorberio parametrus, galima išskirti šiuos pagrindinius dydžius:

1. Absorberio įėjimo angos matmenys.
2. Absorberio išėjimo angos matmenys.
3. Absorberio bendras aukštis.
4. Naudojamų purkštukų įpurškimo kampas.
5. Įrenginio vidiniai geometriniai parametrai.
6. Absorberio pageidaujamas arba numatomas išvalymo efektyvumas.

Žinant šiuos absorberio dydžius galima apskaičiuoti įvairius parametrus, tokius kaip slėgis įrenginio viduje, įėjimo ir išėjimo angose, dujų greitis ir t. t.

Pradines sąlygas galima pasirinkti laisvai. Šiuo atveju skaičiuojamas modelis bus tikrinamas su realiomis eksperimento sąlygomis.

Visi reikalingi kraštinių sąlygų parametrai surašomi 3 lentelėje su nurodytais žymenimis ir matavimo vienetais.

3 lentelė. Pradiniai skaičiuojamo modelio parametrai

Dydis	Žymuo	Mat. vnt.
Valomo oro debitas	Q_{oro}	m^3/s
Valomo oro temperatūra	t_{oro}	$^{\circ}C$
Oro molinė masė	M_{oro}	kg/mol
Suvirinimo aerosolio koncentracija ore	y_1	mg/m^3
Vandens molinė masė	M_{H_2O}	kg/mol
Vandens tankis	ρ_{H_2O}	kg/m^3
Absorberio įėjimo angos skersmuo ¹	d_{A1}	m
Absorberio išėjimo angos skersmuo ¹	d_{A2}	m
Absorberio bendras aukštis ²	H	m
Absorberio konstrukcijos vidinis skersmuo ¹	D_A	m
Purkštuko purškimo kampas	θ	$^{\circ}$
Absorberio efektyvumas	η_{ef}	%
Pastabos: 1. Jei nurodyti dydžiai nėra apskritimo geometrijos, naudoti matmenys skerspjūvio plotui gauti. 2. Bendras aukštis šiuo atveju yra laikomas aukštis nuo absorberio apačios iki purkštuko.		

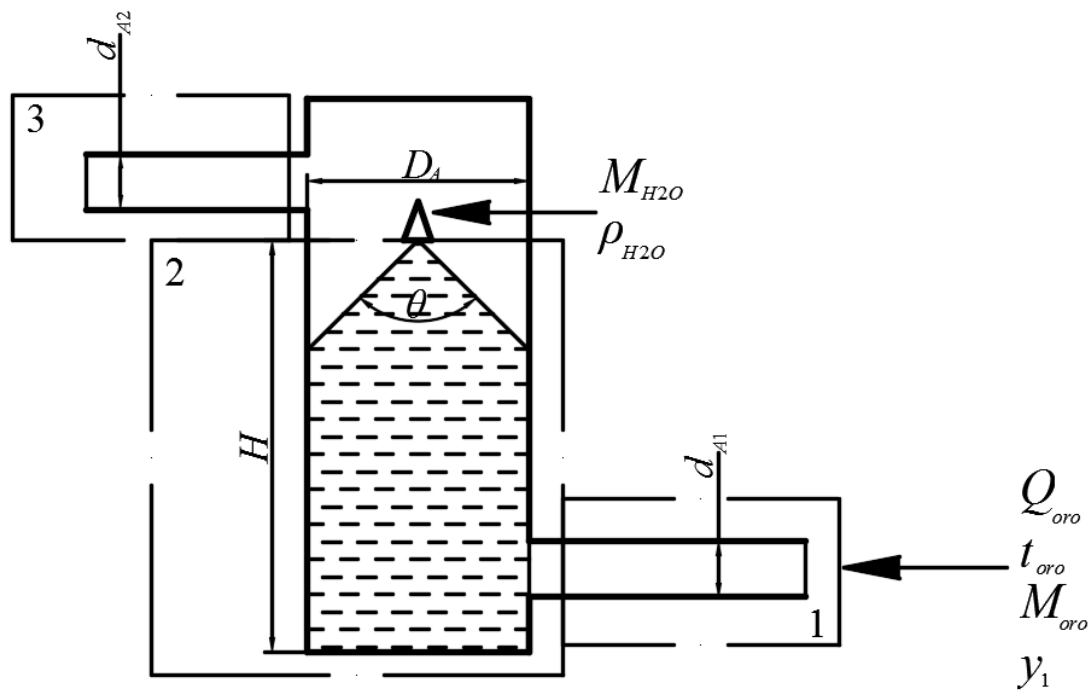
Pagal 1 skyriuje analizuota absorberio konstrukcija žinoma, kad valomas oras tiekiamas į įrenginį per įėjimo angą. Viduje oras traukiamas aukštyr ir valomas skysčiui absorbuojant taršą. Galiausiai išvalytas oras paliekia įrenginį per išėjimo angą, todėl galima išskirti trys grupes:

1. Procesai, vykstantys įėjimo angoje.
2. Procesai, vykstantys absorberio viduje.
3. Procesai, vykstantys išėjimo angoje.

Principinė schema pavaizduota 6 paveiksle. Schema suskirstyta į 3 zonas. Pirmoje zonoje valomas oras juda įėjimo angoje. Šioje vietoje turimos pradinės sąlygos, kurios nekinta (oro debitas, teršalų koncentracija, oro slėgis, oro greitis ir t.t.)

Antroje zonoje valomas oras juda absorberio viduje iki purkštukų. Šioje vietoje vyksta absorbcinis procesas. Viduje oro srauto greitis ir slėgis kinta kadangi pasikeičia skerspjūvio plotas. Pradžioje teršalų koncentracija žinoma iš kraštinių sąlygų, tačiau viršuje koncentracijos dydis bus pakitęs. Šioje vietoje taip reikia įvertinti skystį, kurio valomas oras.

Trečioje zonoje išvalytas oras paliekia įrenginį per išėjimo angą. Keičiasi oro srauto greitis, slėgis, teršalų koncentracija išlieka pastovi.



9 pav. Principinė skaičiuojamo modelio schema su kraštinėmis sąlygomis

Turint skaičiuojamo modelio schemą bei žinant kraštines sąlygas galima spręsti, kokie parametrai reikalingi tolimesniems skaičiavimams.

2.2. Pagrindiniai skaičiuojamo modelio parametrai

Nustatant pagrindinius parametrus naudojama principinė schema, parodyta 9 paveiksle, suskirstyta į tris zonas. Nagrinėjant kiekvienoje zonoje vystančius procesus parenkami reikalingi parametrai.

Pirmoje zonoje oro srautas juda įėjimo angoje. Pagal kraštinės sąlygas žinomi dydžiai: Q_{oro} , t_{oro} , M_{oro} , y_1 ir d_{A1} . Svarbu pabrėžti, kad reikalinga žinoti iš kokių medžiagų susidaro tarša, o taip pat kokios tų medžiagų koncentracijos. Naudojant formulę 8 galima apskaičiuoti bendrą oro srauto tankį ρ_{1oro} . Žinant įėjimo angos skersmenį nustatomas skerspjūvio plotas S_{A1} . Turint dydį S_{A1} randamas srauto greitis v_{1oro} ir pagal formules 1–13 slėgis P_{1oro} .

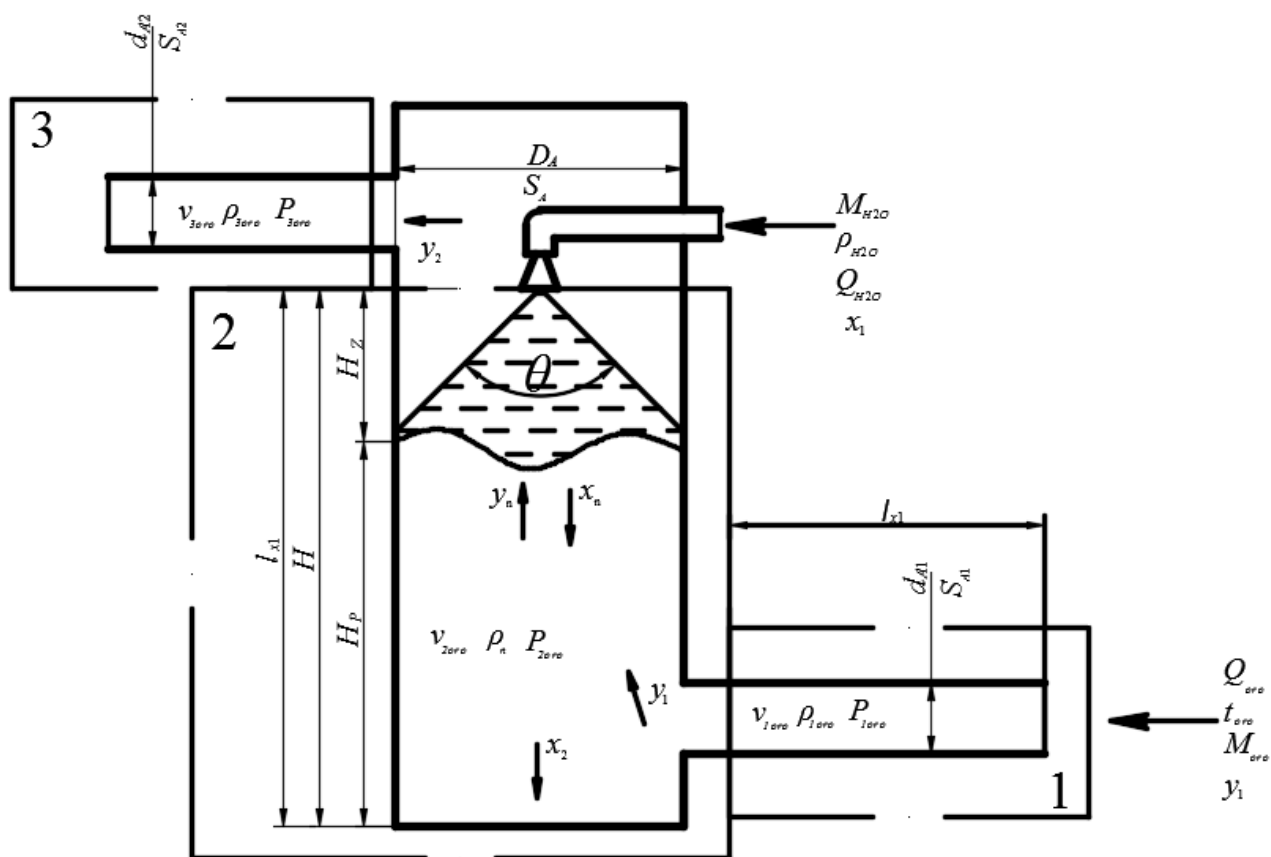
Antroje zonos dalyje vyksta absorbcijos procesas ir taršos koncentracija kinta nuo y_1 iki y_2 . Žinant įrenginio efektyvumą koncentraciją y_2 randame:

$$y_2 = (1 - \eta) \cdot y_1 \quad (34)$$

Įvedamas vandens debitas Q_{H2O} ir pradinės taršos koncentracijas skystoje fazėje x_1 . Naudojant balansinę masių lygtį (formulės 20–23) galima gauti darbinę absorbcijos kreivę. Kadangi bendras oro tankis priklauso nuo taršos koncentracijos, galima nustatyti tankio kitimą. Žinodami absorberio vidinį skersmenį randamas skerspjūvio plotas S_A (nebūtinai apvalus absorberio korpusas, gali būti ir kvadratinė

ar stačiakampinė forma). Daroma sąlyga, kad oro ir vandens debitas yra pastovus ir nekinta. Tuomet randamas oro greitis absorberio viduje v_{2oro} . Naudojant tankio ir greičio reikšmes galima rasti bendrą slėgį absorberio viduje P_{2oro} (skaičiuojant slėgio nuostolius, atkarpos ilgis laikomas toks pats kaip absorberio bendras aukšis H) ir parcialinius taršos medžiagų slėgius. Žinant parcialinius slėgius taikomas Henrio dėsnis ir nustatomos pusiausvyros koncentracijos. Turint darbinę ir pusiausvyros kreivę galima rasti varos jėga taršos koncentracijai pakeisti nuo y_1 iki y_n .

Trečioje zonoje, kaip ir pirmoje, išvalytas oro srautas juda išėjimo angoje. Atliekami tokie pat skaičiavimai, kadangi žinomi dydžiai atitinką pirmosios schemos dalies parametrus, tik yra kitokių reikšmių.



10 pav. Skaičiuojamo modelio parametrų schema

Žinant 10 paveiksle nurodytus parametrus galima apskaičiuoti visus pagrindinius absorbcinio proceso parametrus.

2.3. Skaičiuojamo modelio sudarymas

Nustatyti visi reikalingi dydžiai absorbcijos procesui apskaičiuoti. Sudaromas skaičiuojamas modelis MATLAB terpėje. Sudarant modelį, priimami šie supaprastinimai:

1. Slėgis tolygiai pasiskirsto po visą absorberio konstrukcijos skerspjūvio plotą (realiomis sąlygos tai nevyksta).
2. Teršalų pradinė koncentracija mažėja iki galinės proporcingai.
3. Kietųjų dalelių tankis yra laikomas 1 lentelėje išvardintų medžiagų tankių vidurkis¹ – $\rho_{dal} = 6703 \text{ kg/m}^3$.
4. Skaičiuojamame modelyje naudojamos šios konstantos:
 - Oro tankis $\rho_{oro} (15^\circ\text{C}) = 1,225 \text{ kg/m}^3$, klampa $\mu_{oro} (15^\circ\text{C}) = 1,810 \times 10^{-5} \text{ Pa}$, molinė masė $M(oro) = 28,970 \text{ g/mol}$ (Lemmon 2000).
 - Vandens tankis $\rho_{H_2O} = 997 \text{ kg/m}^3$, klampa $\mu_{H_2O} = 8,900 \times 10^{-4} \text{ Pa}$, molinė masė $M(H_2O) = 18,015 \text{ g/mol}$ (Gregory 2006).
 - Anglies dioksido tankis $\rho_{CO_2} = 1,980 \text{ kg/m}^3$, klampa $\mu_{CO_2} = 1,470 \times 10^{-5} \text{ Pa}$, molinė masė $M(CO_2) = 44,010 \text{ g/mol}$ (Vesovic *et al.* 1990).
 - Azoto dioksido tankis² $\rho_{NO_2} = 1,450 \text{ kg/m}^3$, klampa³ $\mu_{NO_2} = 1,470 \times 10^{-5} \text{ Pa}$, molinė masė $M(NO_2) = 46,001 \text{ g/mol}$ (Palmer *et al.* 1976).
 - Kietųjų dalelių molinė masė priimama 1 lentelėje išvardintų medžiagų molinių masių vidurkiu $M(dal) = 67,006$ (Jenkins *et al.* 2005).
 - Henrio dėsnio proporcingumo koeficientai dujinėms suvirinimo aerozolio medžiagoms⁴: $k_{HCO_2} = 0,035 \text{ mol/kg}\cdot\text{Pa}$, $k_{HNO_2} = 0,007 \text{ mol/kg}\cdot\text{Pa}$.

Pagal priimtus supaprastinamus, žinant reikalingas konstantas ir pagal formules 1-32 parašytas MATLAB algoritmas pateiktas priede nr. . Toliau 11-12 paveiksluose pateikti skaičiavimų rezultatai su šiais dydžiais:

- Suvirinimo aerozolio bendra koncentracija 25 mg/m^3 . Procentinės medžiagų koncentracijos: kietosios dalelės – 50%, CO_2 – 25%, NO_2 – 25%.
- Valomo oro debitas – $0,250 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Valymo laikas – 30 s.
- Absorbavimo efektyvumas – 80%.

¹ Engineering ToolBox. 2004. *Metals and Alloys – Densities*. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 balandžio 21d.]. Prieiga per internetą: https://www.engineeringtoolbox.com/metal-alloys-densities-d_50.html

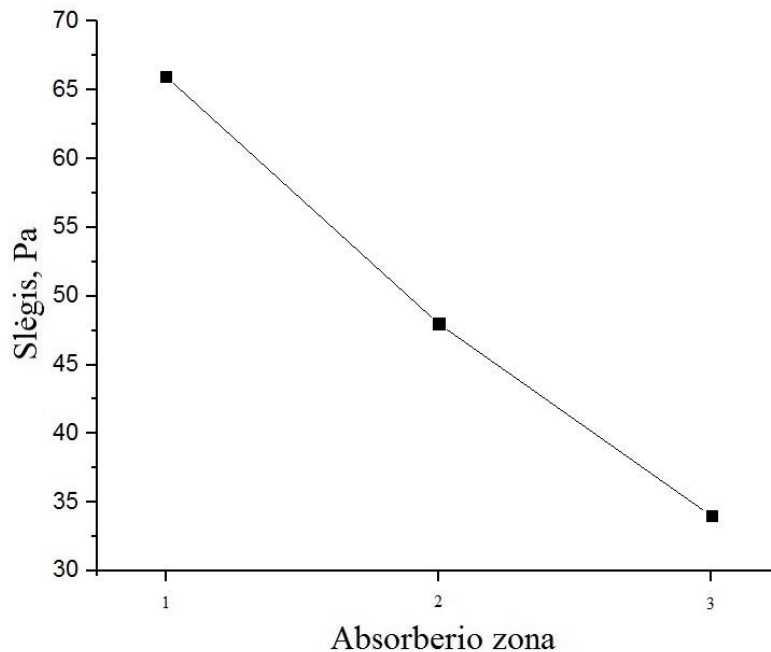
² Engineering ToolBox. 2004. *Gases – Densities*. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 balandžio 21d.]. Prieiga per internetą: https://www.engineeringtoolbox.com/gas-density-d_158.html

³ Engineering ToolBox. 2004. *Gases – Dynamic Viscosity*. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 balandžio 21d.]. Prieiga per internetą: https://www.engineeringtoolbox.com/gases-absolute-dynamic-viscosity-d_1888.html

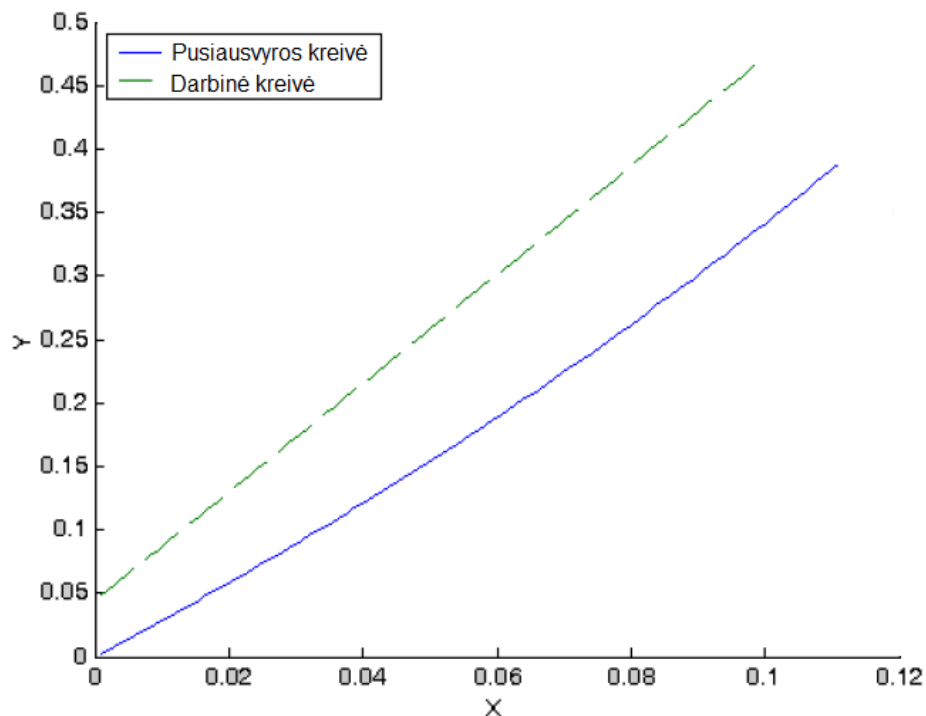
⁴ National Institute of Standards and Technology. 2017. *NIST Chemistry WebBook*. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 balandžio 22 d.]. Prieiga per internetą: <https://webbook.nist.gov/chemistry/name-ser/>

- Absorberio parametrai: įėjimo angos skersmuo – 100 mm, išėjimo angos skersmuo – 250 mm, absorberio skerspjūvio plotas yra stačiakampio formos, kurios ilgis – 600 mm, o plotis – 300 mm, absorberio aukštas – 800 mm.
- Naudojamas 180° purkštukas.

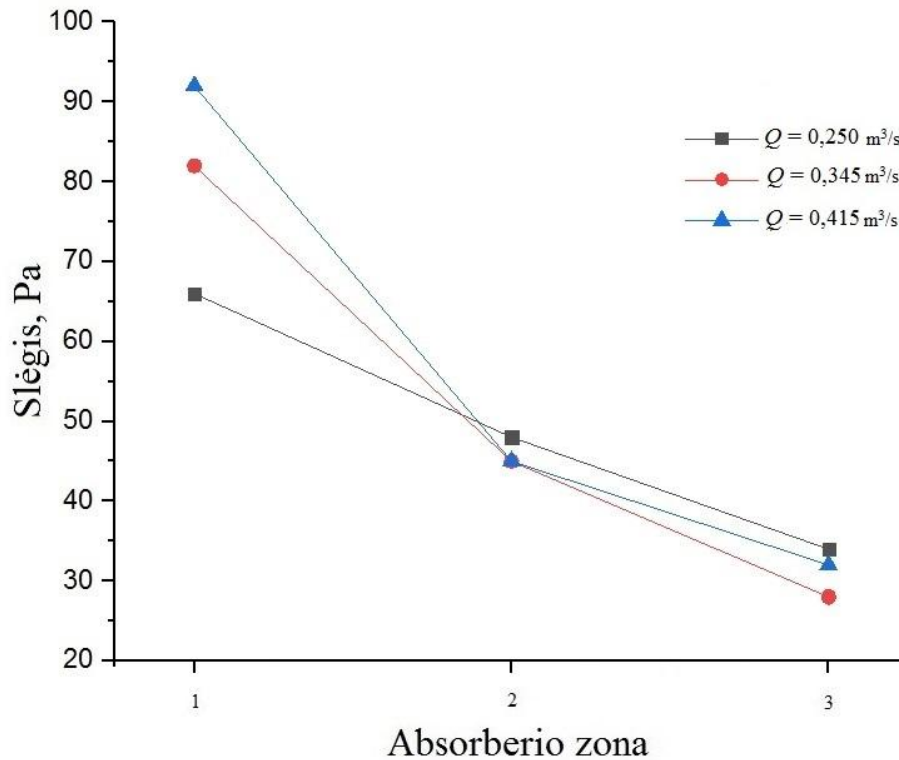
13 paveiksle pavaizduoti oro slėgiai prie skirtingų valymo debitų.



11 pav. Teorinis slėgio pasiskirstymas absorberyje pagal parinktus parametrus



12 pav. Skaičiuojamo modelio absorbcinio proceso darbinė ir pusiausvyros kreivės pagal parinktus parametrus



13 pav. Teorinis slėgio pasiskirtymas absorberioje prie skirtingų valomo oro debitų

Pagal 11 ir 13 paveikslus matoma, kad teoriniai absorberio slėgio nuostoliai siekia 30-50%. Absorberio zonos yra parinktos pagal 10 paveiksle pateikta skaičiuojamo modelio schemą: 1 zona yra slėgis įėjimo angoje, 2 zona yra slėgis absorberio viduje, 3 zona yra slėgis išėjimo angoje. 12 paveiksle pateiktos darbinė ir pusiausvyros kreivės bedimensėje koordinatinių sistemoje. Plotas, kurį sudaro darbinės kreivės, yra lygus varos jėgai, reikalingai pradinę teršalų koncentraciją sumažinti iki galinės.

2.4. Antros dalies apibendrinimas

Parinktos kraštinės sąlygos skaičiuojamam modeliui sudaryti. Šie dydžiai taip pat naudojami eksperimentinei įrangoms parinkime.

Sudaryta skaičiuojamo modelio parametrų schema. Pagal ją galima išskirti visi procesai į tris zonas: 1 zona – procesai, vykstantis įėjimo angoje iki įėjimo į absorberio konstrukciją, 2 zona – procesai, vykstantys absorberio viduje, 3 zona – procesai, vykstantis išėjimo angoje.

Pagal sudaryta skaičiuojamo modelio schemą parašytas algoritmas MATLAB paketu. Atlikti pradiniai skaičiavimai ir gauti preliminarūs rezultatai.

3. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI IR REZULTATŲ ANALIZĖ

3.1. Eksperimentinės įrangos parinkimas

2 skyriuje nustatytas kraštines sąlygas ir skaičiuojamą modelį matoma, kad reikalinga žinoti šių parametrų reikšmės:

1. Absorberio matmenys.
2. Teršalų pradinę koncentraciją ore.
3. Valomo oro srauto greitį įrenginyje.
4. Valomo srauto slėgį įrenginyje.
5. Naudojamo absorbento debitą valymo metu.
6. Teršalų koncentraciją po valymo proceso.

Pagal šiuos dydžius parenkami matavimo įrenginiai, kuriais galima nustatyti šių parametrų reikšmes.

1. TESTO 340 dūmų analizatorius. Šiuo įrenginiu galima matuoti NO_x ir CO_x dujų koncentraciją sraute. Įrenginys leidžia matuoti ir stebėti iki 4 skirtingų dujinių medžiagų vienu metu. TESTO dūmų analizatorius taip pat leidžia išmatuoti dūmų temperatūrą ir slėgį.



14 pav. TESTO 340 dūmų analizatorius

2. TESTO 452 daugiafunkcis oro matavimo prietaisas. Įrenginys gali matuoti srauto greitį ir slėgį su atitinkmais zondais. Prietaisas gali nustatyti vidutines dydžių reikšmes pagal nurodytą laiką.



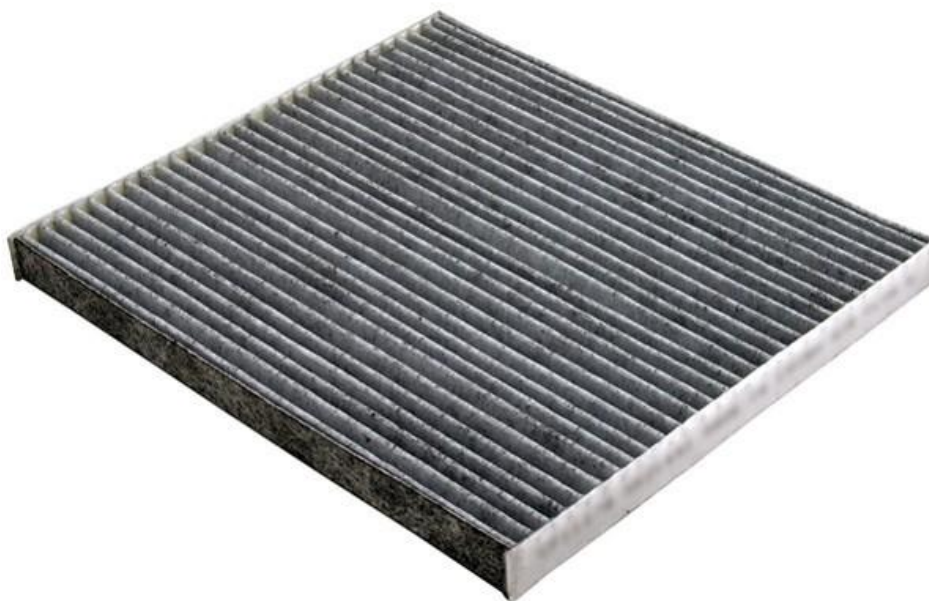
15 pav. TESTO 452 daigiafunkcis matavimo įrenginys

3. Svarstyklės KERN EG. Svarstyklėmis bus stebimas kietųjų dalelių svoris tiekiamame oro sraute. Pagal šiuos duomenis galima nustatyti kietųjų dalelių koncentraciją ore. Svarstyklės matuoja 0,001 g tikslumu.



16 pav. Svarstyklės KERN EG

4. Kišeninis oro filtras. Filtras naudojamas kietosioms dalelėms sugauti. Filtras efektyviai gaudo dulkes iki 10 μm skersmens.



17 pav. Kišeninis oro filtras

5. Vandens skaitiklis. Skirtas vandens debitui matuoti. Galima stebėti vandens kitimą 0,001 m^3 tikslumu.



18 pav. Vandens skaitiklis

6. Ventiliatorius su elektros pavara. Pavara ventiliatoriuje leidžia paduoti oro srautą skirtingais debitais.



19 pav. Ventiliatorius su elektros pavara

7. Hartmano švilpukas. Naudojamas švilpukas su 1 skyriuje nustatytais parametrais: rezonatoriaus ilgis – 15,7 mm, atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus – 2 mm, tūtos ir rezonatoriaus skersmenų santykis – 1,66.



20 pav. Naudojamas Hartmano švilpukas

8. Absorberis. Naudojamas absorberis, esantis VGTU Mechanikos fakulteto Aplinkos apsaugos laboratorije. Įrenginys buvo modifikuotas – išimta viduje buvusi įkrova, įstatytas naujas purkštukas su 180° purškimo kampu, pagamintos mentys sūkuriniam srautui pagaminti.

Absorberio matmenys:

- Įėjimo anga – 110 mm.
- Išėjimo anga – 245 mm.
- Absorberio aukštis – 800 mm (aukštis skaičiuojamas nuo apačios iki purštuko).
- Absorberio skerspjuvio ilgis ir plotis – 590 mm ir 300 mm.



21 pav. Eksperimente naudojamas absorberis

Mentys sukūriniam srautui pagaminti buvo sukonstruotos su galimybe jas išimti. Mentys įstatomos įėjimo angoje.



22 pav. Mentys sukūriniam oro srautui pagaminti

9. Suvirinimo elektrodai. Eksperimento metu atliekamas suvirinimo procesas taršai gauti. Suvirinimas atliekamas naudojant šiuos suvirinimo elektrodus:
 - AV1 AP60 elektrodai su rutilo baziniu glaistu aparatūros paviršiams aplydyti ir detalėms taisyti.
 - AV APL60 elektrodai su rutilo baziniu glaistu mašinų ir konstrukcijų dalims aplydyti.
 - AV24 elektrodai su rutilo glaistu, skirti mechanizmų, transporto priemonių ir kitų lengvų konstrukcijų iš mažaaanglių plienų virinimui.
10. Bruel & Kjaer 2250 garso matuoklis ir mikrofonas 4189. Su šiais įrenginiais galima pamatuoti akustinio lauko, sukeliama Hartmano švilpuku, slėgį ir dažnį.



23 pav. Bruel & Kjaer 2250 garso matuoklis

11. Šoninis siurbtuvas. Siurbtuvu surenkamas suvirinimo aerosolis ir tiekiamas į valymo įrenginį.

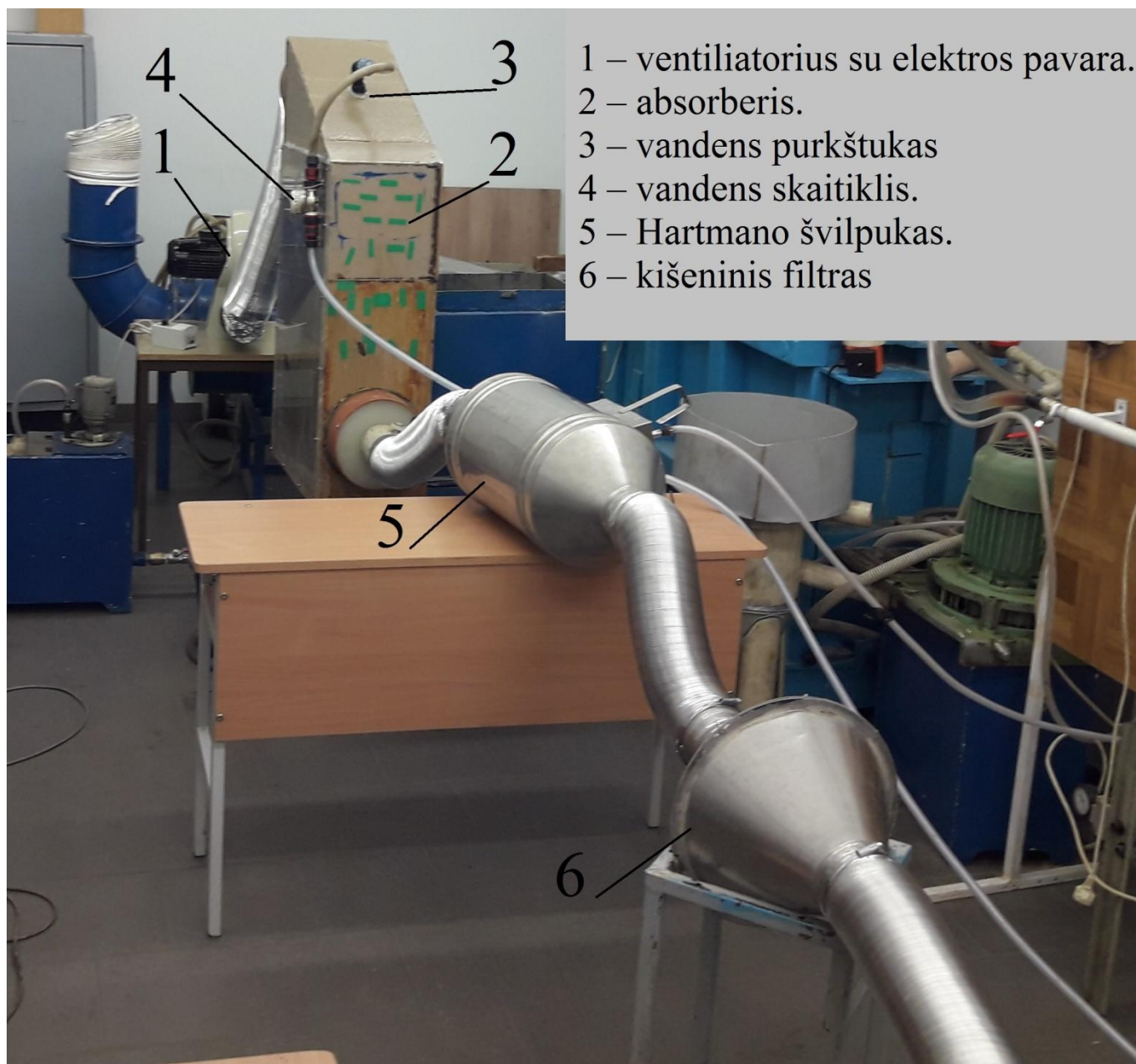


24 pav. Šoninis siurbtuvas

Parinkti įrenginiai, kuriais sudaroma suvirinimo aerozolio valymo sistema ir matuojami parametrai sistemos efektyvumui nustatyti.

3.2. Eksperimento stendo sudarymas

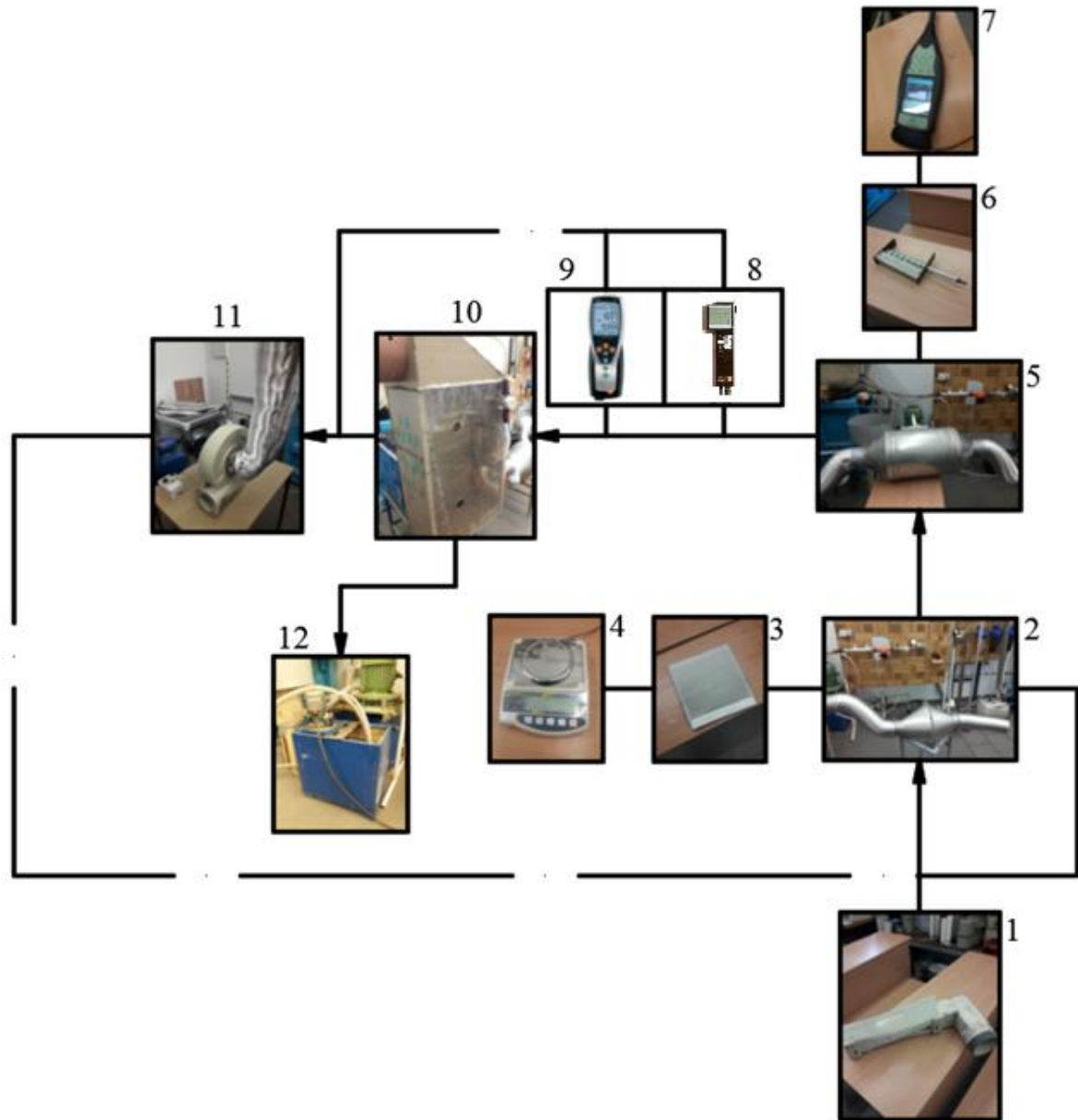
Eksperimentui atlikti pagamintas stendas pavaizduotas 25 paveiksle.



25 pav. Pagamintas eksperimento stendas

Stendo veikimo schema pavaizduota 26 paveiksle. Šoniniu siurbtuvu 1 surenkamas suvirinimo metu susidarantis aerozolis. Suvirinimo procesas atliekamas kartu su eksperimentu. Kišeninis filtras 3 įstatomas į lengvai išardomą kūginės formos cilindą 2, kadangi filtrą reikės išimti ir matuoti svorio kitimą svarstyklėmis 4. Hartmano švilpukas 6, įstatytas į cilindą 5, sukels akustinį lauką. Į švilpuką tiekiamas oras kompresoriaus pagalba. Bruel matavimo prietaisu 7 nustatomas tiekiamo oro kiekis

reikalingam slėgiui ir dažniui gauti. Valomas aerosolis patenka į absorberį 10, kuriame vyksta valymo procesas. Absorbentas tiekiamas į valymo įrenginį per laboratorijoje esančius vandens kranelius. Švarus oras yra išpučiamas ventiliatoriumi 11, kuris siurbia orą per visus minėtus įrenginius. Susikaupęs vanduo absorberyje surenkamas vandens kaupimo talpa 12.



26 pav. Eksperimentinio stendo veikimo schema

1 – šoninis siurbtuvas, 2 – kišeninio filtro jungimas prie sistemos, 3 – kišeninis filtras, 4 – KERN EG svartsyklės, 5 – Hartmano švilpuko jungimas prie sistemos, 6 –Hartmano švilpukas, 7 – Bruel & Kjaer 2250 garso matuoklis, 8 – TESTO daugiafunkcis matavimo prietaisas, 9 – TESTO dujų analizatorius, 10 – absorberis, 11 – ventiliatorius su elektros pavara, 12 – vandens surinkimo talpa

Absorberio įėjimo ir išėjimo angose išgręžtos skylės matavimams atlikti su zondais. Matavimai atliekami TESTO įrenginiais 8 ir 9.

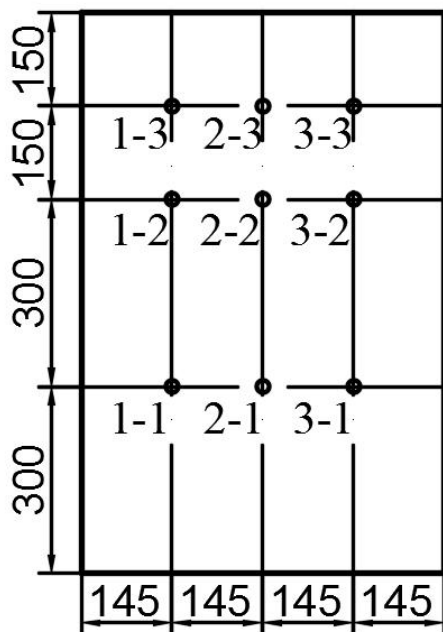
Punktyrinė linija žymi įrangos panaudojimą kitoje vietoje. Filtro sistema 2 sujungiama su ventiliatoriaus 11 oro išėjimo anga. TESTO įrenginiais matuojamos oro srauto charakteristikos absorberio išėjimo angoje.

3.3. Eksperimento atlikimo eiga

Pagamintam eksperimento stendui reikalinga bandymo eiga sklandžiam tyrimo atlikimui. Be tyrimo metodikos eksperimento metu gali atsirasti paklaidos, nesklandus dydžių matavimas t. t. Bandymo eiga sudaroma pagal 23 paveiksle pateiktą stendo veikimo schemą.

Bandymo eiga:

1. Absorberijoje turi būti išimtos sūkurinio srauto sudarymo mentys. Kompresorius, prijungtas prie Hartmano švilpuko, turi būti išjungtas.
2. Įjungiamas oro tiekimas į sistemą. Matuojamas srauto greitis ir slėgis įėjimo ir išėjimo angose. Viduje matuojamas greitis ir slėgis 27 paveiksle nurodytose taškuose. Matavimai atliekami su TESTO 452 daugiafunkčiu įrenginiu 30 sekundžių kiekvienai pozicijai stebint vidurkį.



27 pav. Slėgio matavimo pozicijos absorberio konstrukcijos viduje

3. Pamatuoti kišeninio filtro svorį svarstyklėmis KERN EG prieš bandymą. Filtrą sujungti su valymo sistema.
4. Pradėjus suvirinimo procesą įjungti valymo sistemą. Suvirinimas atliekamas 30 sekundžių. Matuoti dujų koncentracijas įėjimo angoje su TESTO 340 dūmų analizatoriumi. Baigiant suvirinimo procesą išjungti sistemą ir išimti filtrą. Matuoti filtro svorio kitimą. Gaunama pradinė

kietųjų dalelių ir dujų koncentracija. Pradinę koncentraciją nustatyti trimis naudojamiems elektrodams.

5. Atliekamas bandymas be akustinio lauko ir be sūkurinio srauto. Filtrą sujungti su ventiliatoriumi. Fiksuoti vandens skaitiklio duomenys. Pradėti suvirinimo procesą ir įjungti valymo sistemą. Suvirinimo procesas atliekamas 30 sekundžių. Matuoti dujų koncentracijas išėjimo angoje. Baigus suvirinimo procesą valymo sistemą išjungti. Stebėti vandens skaitiklio pokytį ir filtro svorio augimą. Bandymus atlikti su kiekvienu elektrodu keičiant oro ir vandens tiekimo debitus.
6. Įjungti kompresorių ir didinti oro tiekimą kol nebus pasiektas reikiamas akustinio lauko garso slėgis ir dažnis. Oro srautas didinamas matuojant garso analizatoriumi Bruel & Kjaer 2250.
7. Atliekamas bandymas su akustiniu lauku ir be sūkurinio srauto. Pakartoti 5 punkto nurodymus.
8. Išjungti kompresorių. Absorberyje įstatyti sūkurinio srauto sudarymo mentys.
9. Atliekamas bandymas be akustinio lauko ir su sūkuriniu srautu. Pakartoti 5 punkto nurodymus.

3.4. Eksperimento rezultatai

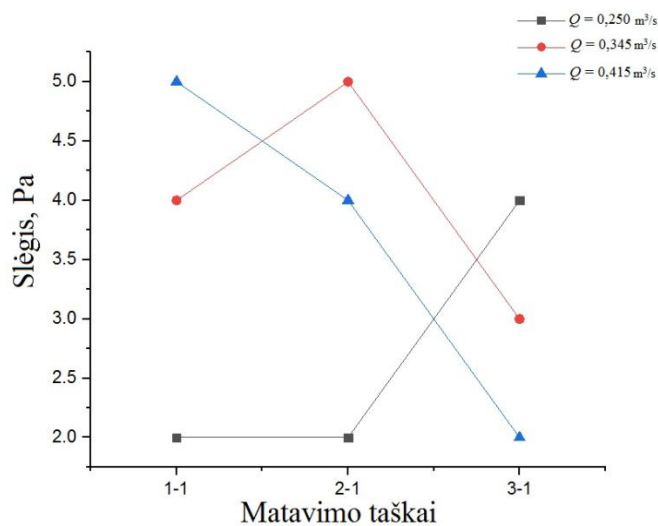
3.4.1. Oro slėgio pasiskirstymas absorberyje

Atlikti oro slėgio pasiskirstymo tyrimai. Rezultatai pateikti 4 lentelėje.

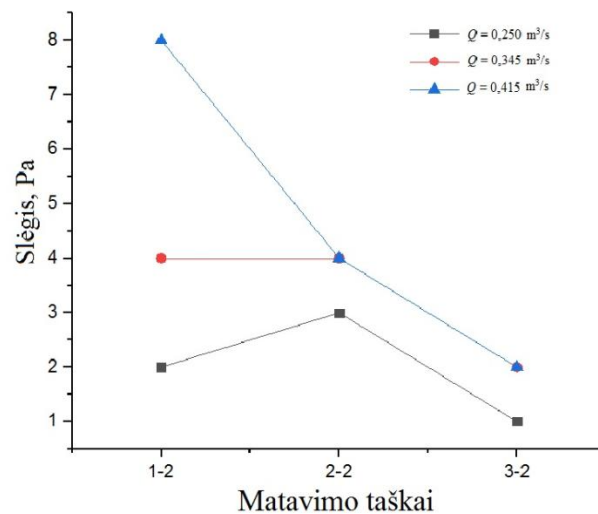
4 lentelė. Oro slėgio ir greičio pasiskirstymas absorberyje

Matavimo pozicijos	Oro debitas 0,250 m ³ /s		Oro debitas 0,345 m ³ /s		Oro debitas 0,415 m ³ /s	
	Srauto greitis, m/s	Srauto slėgis, Pa	Srauto greitis, m/s	Srauto slėgis, Pa	Srauto greitis, m/s	Srauto slėgis, Pa
1-1	2,0	2	2,4	4	3,5	5
2-1	0,8	2	2,4	5	2,5	4
3-1	1,1	4	0,8	3	2,1	2
1-2	1,7	2	2,3	4	2,5	8
2-2	1,7	3	2,5	4	2,2	4
3-2	1,8	1	1,4	2	1,2	1
1-3	1,5	3	2,3	4	2,3	7
2-3	1,8	2	1,6	3	2,1	2
3-3	1,6	4	1,5	2	1,7	2
Įėjimo anga	6,6	26	9,1	67	10,9	76
Išėjimo anga	4,4	6	3,5	10	4,1	15

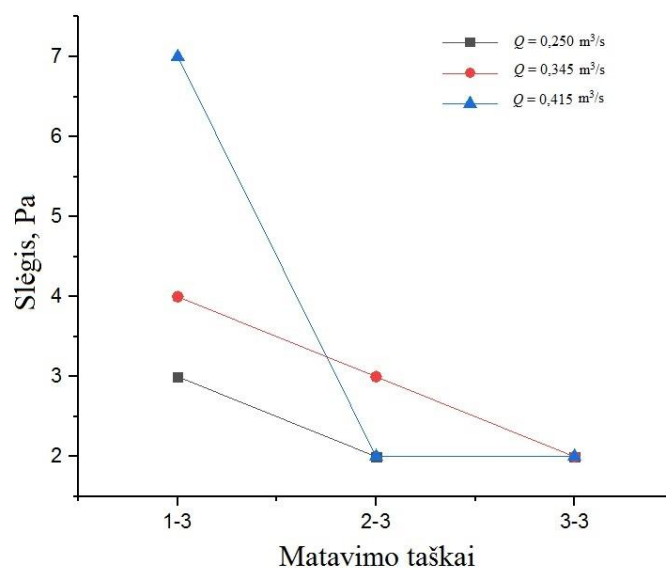
Srauto slėgio pasiskirstymas absorberio viduje pavaizduotas 28 paveiksle.



a)



b)

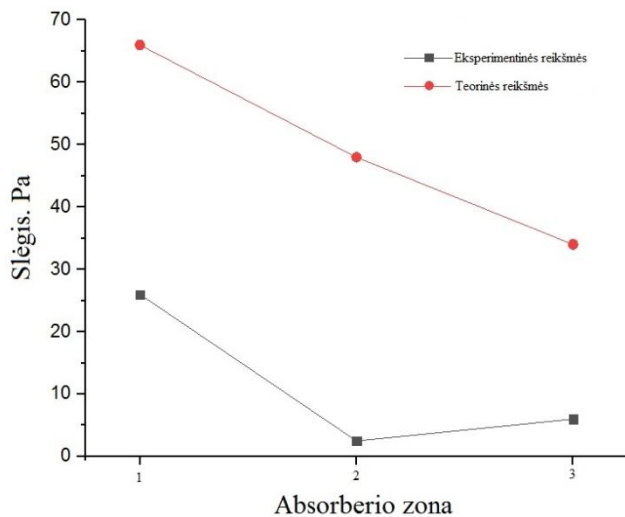


c)

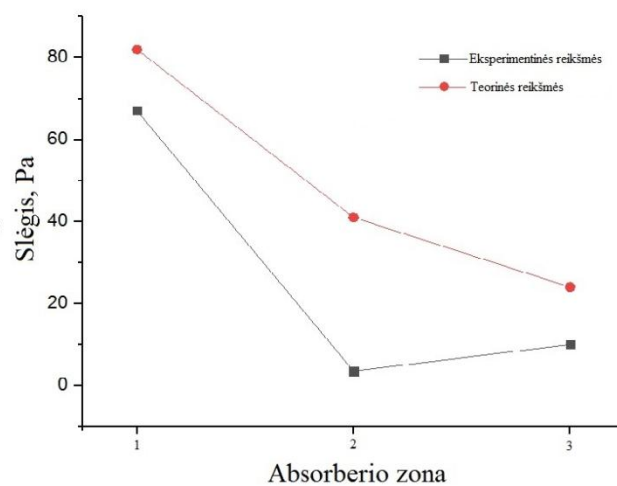
28 pav. Oro srauto slėgio pasiskirstymas absorberio viduje:

- a) pasiskirstymas matuojamojoje zonoje 1-1,
- b) pasiskirstymas matuojamojoje zonoje 2-2,
- c) pasiskirstymas matuojamojoje zonoje 3-3

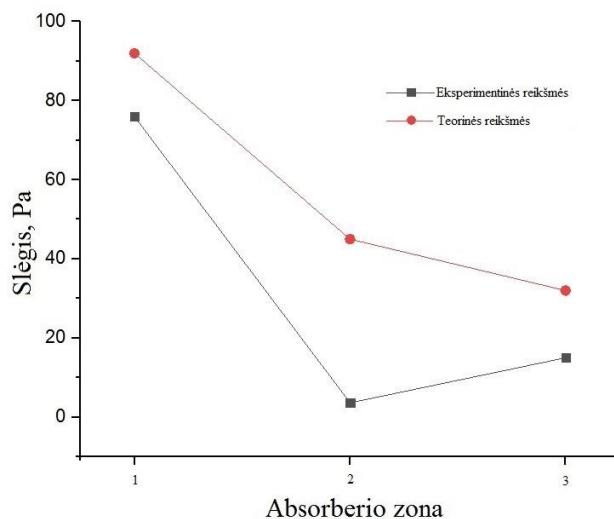
Tikrinamas skaičiuojamas modelis su realiomis reikšmėmis. Absorberio viduje slėgis priimamas kaip visų pozicijoje gautų reikšmių vidurkis. Skaičiuojamo modelio ir realių reikšmių priklausomybės pavaizduotos 29 paveiksle. Grafikai atidėti absorberio zonose, kurios nustatytos skaičiuojamame modelyje.



a)



b)



c)

29 pav. Teorinis ir tikrasis oro slėgio pasiskirstymas absorberyje:

- a) slėgiai prie valomo oro debito $0,250 \text{ m}^3/\text{s}$,
- b) slėgiai prie valomo oro debito $0,345 \text{ m}^3/\text{s}$,
- c) slėgiai prie valomo oro debito $0,415 \text{ m}^3/\text{s}$

Pagal 29 paveikslą matoma, kad prie oro debito $0,250 \text{ m}^3/\text{s}$ teorinės slėgio reikšmės yra didesnės 50-60%. Kitais debito atvejais teorinės vertės didesnės 10-40%. Skaičiuojamo modelio reikšmės yra labai netikslios, todėl daroma išvada, kad realios ir teorinės išvalymo efektyvumo reikšmės gali nesutapti iki 10-60%.

3.4.2. Tyrimas suvirinimo aerozolio koncentracijai nustatyti

Atliktas tyrimas, kai oro filtras įstatomas prieš absorberį, o dujos matuojamos įėjimo angoje. Rezultatai pateikiami 5 lentelėje. Tyrimas atliktas prie oro srauto debito 0,250 m³/s suvirinimo procesą atliekant 30 sekundžių.

5 lentelė. Tyrimo suvirinimo aerozolio koncentracijai nustatyti rezultatai

Elektrodas	C_{dal} , mg/m ³	C_{CO_2} , mg/m ³	C_{NO_2} , mg/m ³	Bendra suvirinimo aerozolio koncentracija, mg/m ³
AP60	0,122	2,691	7,051	9,864
APL 60	0,119	3,749	8,028	11,976
AV24	0,119	2,691	7,028	9,838

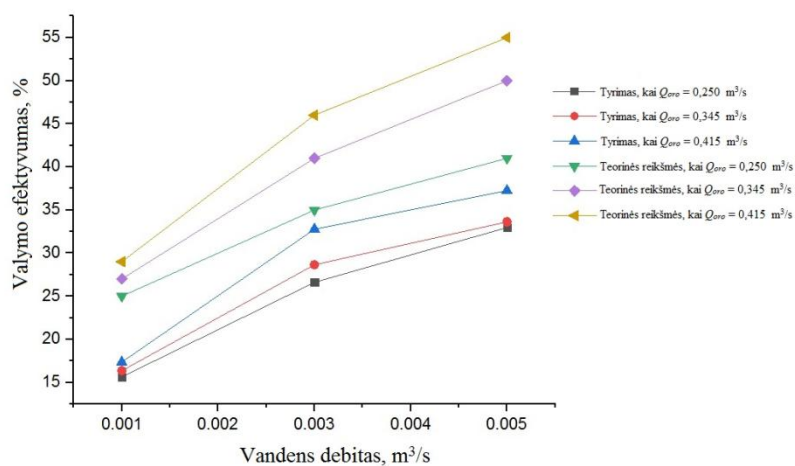
Gautos pradinės suvirinimo aerozolio koncentracijos ore vertės. Naudojant nustatytas reikšmes galima palyginti skaičiuojamą modelį su tikromis valymo proceso parametrų reikšmėmis.

3.4.3. Tyrimas be akustinio lauko ir be sukūrinio srauto

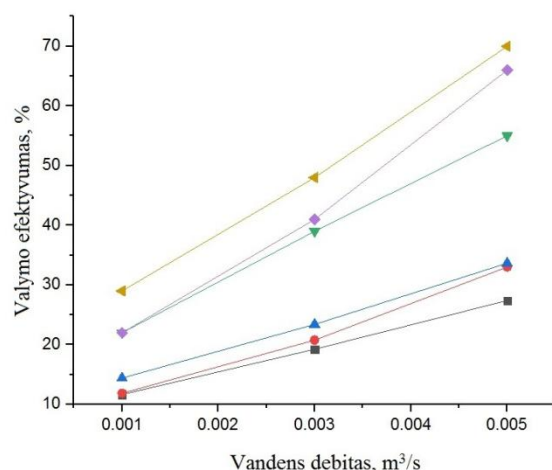
Atliktas tyrimas be akustinio lauko ir be sukūrinio srauto. Rezultatai pateikiami 6 lentelėje.

6 lentelė. Tyrimo be akustinio lauko ir be sukūrinio srauto rezultatai

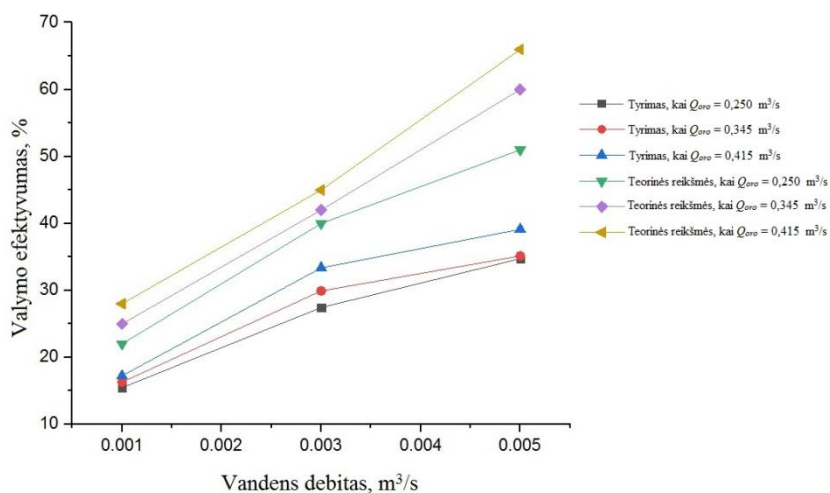
Elektrodas	Oro debitas, m ³ /s	Vandens debitas, m ³ /s	Filtro svorio augimas, mg	CO ₂ koncentracija po valymo	NO ₂ koncentracija po valymo	Bendra teršalų koncentracija po valymo	Valymo efektyvumas, %
AP60	0,250	0,001	0,069	1,993	6,267	8,322	15,6
		0,003	0,074	1,690	5,517	7,239	26,6
		0,005	0,083	1,582	5,019	6,613	33,0
	0,345	0,001	0,071	1,995	6,194	8,251	16,4
		0,003	0,075	1,687	5,319	7,038	28,6
		0,005	0,080	1,563	4,999	6,547	33,6
	0,415	0,001	0,081	1,992	6,098	8,152	17,4
		0,003	0,089	1,599	5,001	6,632	32,8
		0,005	0,093	1,543	4,634	6,189	37,3
APL60	0,250	0,001	0,071	2,993	7,521	10,583	11,6
		0,003	0,076	2,637	6,997	9,673	19,2
		0,005	0,085	2,005	6,671	8,695	27,4
	0,345	0,001	0,073	2,995	7,494	10,555	11,9
		0,003	0,077	2,597	6,864	9,490	20,8
		0,005	0,082	1,986	6,018	8,023	33,0
	0,415	0,001	0,079	2,993	7,191	10,253	14,4
		0,003	0,087	2,484	6,651	9,174	23,4
		0,005	0,091	1,973	5,953	7,945	33,7
AV24	0,250	0,001	0,071	1,995	6,252	8,316	15,5
		0,003	0,076	1,590	5,510	7,139	27,4
		0,005	0,085	1,387	5,015	6,421	34,7
	0,345	0,001	0,073	1,993	6,173	8,235	16,3
		0,003	0,077	1,548	5,308	6,895	29,9
		0,005	0,082	1,368	4,994	6,381	35,1
	0,415	0,001	0,079	1,992	6,081	8,142	17,2
		0,003	0,087	1,521	4,996	6,556	33,4
		0,005	0,091	1,342	4,628	5,989	39,1



a)



b)



c)

30 pav. Valymo proceso efektyvumo, be akustinio lauko ir be sukūrinio srauto, teorinės ir eksperimentinės priklausomybės nuo absorbento kiekio:

- a) elektrodas AP60,
- b) elektrodas APL60,
- c) elektrodas AV24

Pagal 30 paveikslą matoma, kad didėjant absorbento debitui, didėja absorberio išvalymo efektyvumas. Absorbento kiekiui padidėjus 3 kartus kiekvieno elektrodo atveju efektyvumas didėja 2-3 karto. Padidėjus vandens debitui 5 kartus, absorberio efektyvumas didėja 2-4 karto.

30 paveiksle pastebima, kad teorinės ir eksperimentinės reikšmės skiriasi 25-50%.

3.4.4. Tyrimas su akustiniu lauku ir be sukūrinio srauto

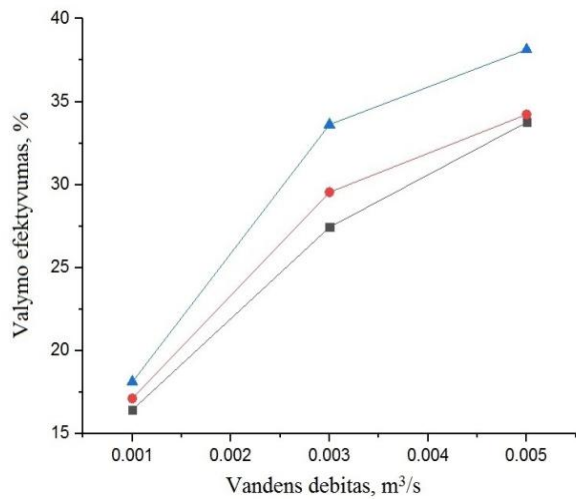
Atliktas tyrimas be akustinio lauko ir be sukūrinio srauto. Rezultatai pateikiami 7 lentelėje.

7 lentelė. Tyrimo su akustiniu lauku ir be sukūrinio srauto rezultatai

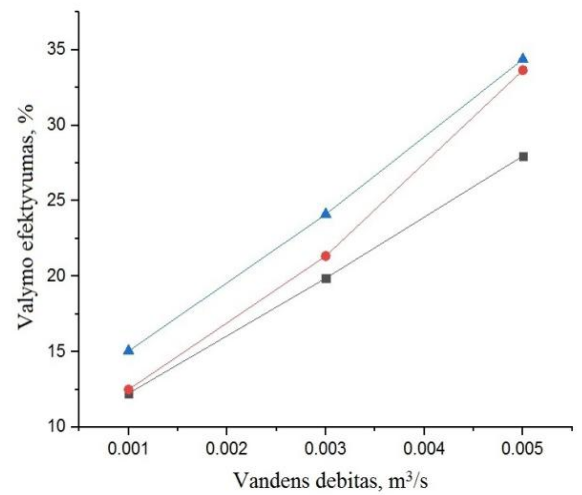
Elektrodas	Oro debitas, m ³ /s	Vandens debitas, m ³ /s	Filtro svorio augimas, mg	CO ₂ koncentracija po valymo	NO ₂ koncentracija po valymo	Bendra teršalų koncentracija po valymo	Valymo efektyvumas, %
AP60	0,250	0,001	0,119	1,991	6,259	8,243	16,4
		0,003	0,154	1,687	5,513	7,158	27,4
		0,005	0,173	1,579	5,016	6,534	33,8
	0,345	0,001	0,121	1,993	6,191	8,175	17,1
		0,003	0,163	1,686	5,314	6,949	29,6
		0,005	0,179	1,561	4,993	6,487	34,2
	0,415	0,001	0,119	1,990	6,094	8,077	18,1
		0,003	0,162	1,597	5,000	6,547	33,6
		0,005	0,182	1,542	4,629	6,101	38,1
APL60	0,250	0,001	0,117	2,991	7,517	10,510	12,2
		0,003	0,149	2,635	6,991	9,596	19,9
		0,005	0,162	2,001	6,668	8,626	28,0
	0,345	0,001	0,119	2,992	7,487	10,479	12,5
		0,003	0,152	2,594	6,859	9,420	21,3
		0,005	0,169	1,983	6,012	7,945	33,7
	0,415	0,001	0,123	2,991	7,187	10,174	15,0
		0,003	0,159	2,480	6,649	9,089	24,1
		0,005	0,174	1,969	5,945	7,859	34,4
AV24	0,250	0,001	0,122	1,991	6,251	8,239	16,3
		0,003	0,147	1,587	5,507	7,066	28,2
		0,005	0,153	1,384	5,005	6,355	35,4
	0,345	0,001	0,131	1,991	6,168	8,147	17,2
		0,003	0,159	1,544	5,301	6,805	30,8
		0,005	0,162	1,362	4,986	6,305	35,9
	0,415	0,001	0,139	1,987	6,072	8,039	18,3
		0,003	0,161	1,519	4,989	6,466	34,3
		0,005	0,173	1,337	4,620	5,903	40,0

Lyginant 6 ir 7 lenteles pastebima, kad išvalymo efektyvumas yra labai panašus. Tačiau jei lyginamas filtro svorio kitimas, akustikos panaudojimas yra 50-60% efektyvesnis kietųjų dalelių utilizavime.

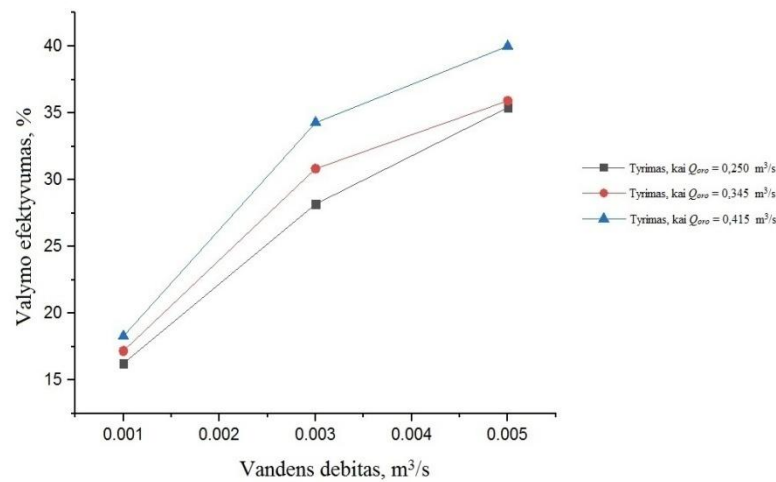
Pagal 6 ir 7 lenteles matoma, kad dujų valymui akustika neturi įtakos, reikšmės labai mažai skiriasi.



a)



b)



c)

31 pav. Valymo proceso efektyvumo, su akustiniu lauku ir be sukūrinio srauto, eksperimentinės priklausomybės nuo absorbento kiekio:

- a) elektrodas AP60,
- b) elektrodas APL60,
- c) elektrodas AV24

31 paveiksle parodytos absorberio valymo efektyvumo priklausomybės nuo absorbento kiekio panaudojus akustinį lauką. Pastebima, kad grafikai yra panašūs su tyrimu, atliktu be akustinio lauko. Absorbento kiekiui padidėjus 3 kartus kiekvieno elektrodo atveju efektyvumas didėja 2-3 karto. Padidėjus vandens debitui 5 kartus, absorberio efektyvumas didėja 2-3 karto. Pateiktos tik eksperimentinės reikšmės, kadangi skaičiuojamas modelis buvo sudaromas tik absorberiui be akustinio lauko ir be sūkurinio srauto.

3.4.5. Tyrimas be akustinio lauko ir su sukūriniu srautu

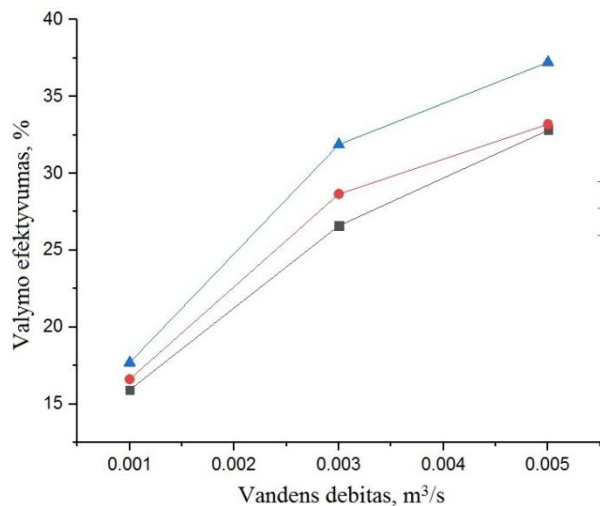
Atliktas tyrimas be akustinio lauko ir su sukūriniu srautu. Rezultatai pateikiami 8 lentelėje.

8 lentelė. Tyrimo be akustinio lauko ir su sukūriniu srautu rezultatai

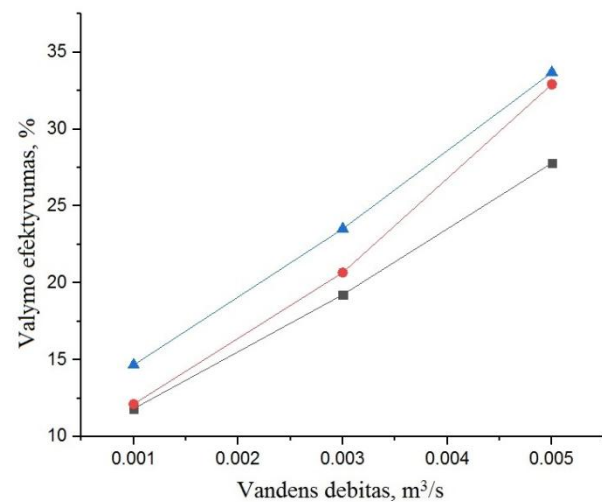
Elektrodas	Oro debitas, m ³ /s	Vandens debitas, m ³ /s	Filtro svorio augimas, mg	CO ₂ koncentracija po valymo	NO ₂ koncentracija po valymo	Bendra teršalų koncentracija po valymo	Valymo efektyvumas, %
AP60	0,250	0,001	0,071	1,991	6,261	8,293	15,9
		0,003	0,076	1,687	5,517	7,240	26,6
		0,005	0,084	1,579	5,021	6,628	32,8
	0,345	0,001	0,075	1,993	6,195	8,225	16,6
		0,003	0,078	1,686	5,317	7,037	28,7
		0,005	0,082	1,561	4,998	6,589	33,2
	0,415	0,001	0,084	1,99	6,101	8,119	17,7
		0,003	0,092	1,597	5,102	6,719	31,9
		0,005	0,095	1,542	4,632	6,191	37,2
APL60	0,250	0,001	0,074	2,991	7,525	10,561	11,8
		0,003	0,08	2,635	6,998	9,672	19,2
		0,005	0,089	2,001	6,615	8,646	27,8
	0,345	0,001	0,077	2,992	7,491	10,525	12,1
		0,003	0,079	2,594	6,866	9,500	20,7
		0,005	0,084	1,983	6,015	8,033	32,9
	0,415	0,001	0,082	2,991	7,192	10,220	14,7
		0,003	0,091	2,48	6,651	9,159	23,5
		0,005	0,095	1,969	5,948	7,941	33,7
AV24	0,250	0,001	0,076	1,991	6,252	8,286	15,8
		0,003	0,081	1,587	5,509	7,134	27,5
		0,005	0,089	1,384	5,006	6,420	34,7
	0,345	0,001	0,072	1,991	6,172	8,210	16,5
		0,003	0,078	1,544	5,306	6,891	30,0
		0,005	0,084	1,362	4,991	6,388	35,1
	0,415	0,001	0,01	1,987	6,078	8,174	16,9
		0,003	0,092	1,519	4,992	6,538	33,5
		0,005	0,099	1,337	4,624	5,981	39,2

Lyginant 6 ir 8 lenteles pastebima, kad išvalymo efektyvumas yra labai panašus. Taip pat matoma, kad sukūrinis srautas neturėjo įtakos kietųjų dalelių valymo efektyvumui, kadangi rezultatai yra labai panašus. Lyginant 6, 7 ir 8 lenteles mastoma, kad akustikos laukas turėjo didžiausią įtaką išvalymo efektyvumui.

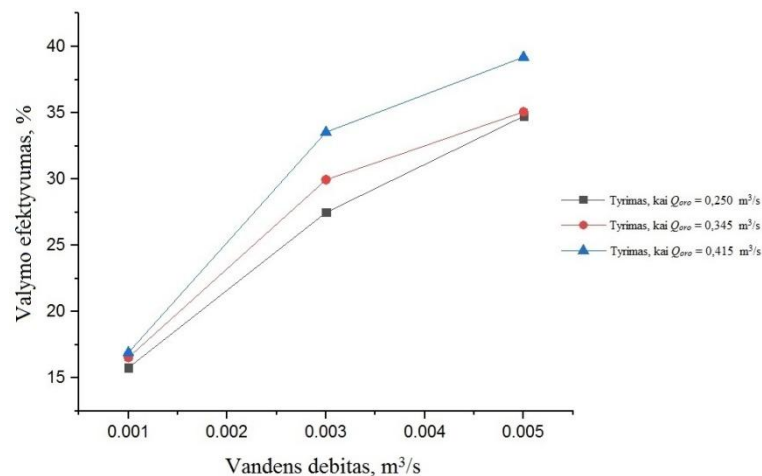
Pagal 6, 7 ir 8 lenteles pastebima, kad akustinis laukas ir sukūrinis srautas nepagerina dujų valymo absorberijoje. Visais tyrimų variantais dujų koncentracijos po valymo buvo labai panašios. Dujų valymui įtakos turi tik absorbento kiekio didinimas.



a)



b)



c)

32 pav. Valymo proceso efektyvumo, be akustinio lauko ir su sukūriniu srautu, eksperimentinės priklausomybės nuo absorbento kiekio:

- a) elektrodas AP60,
- b) elektrodas APL60,
- c) elektrodas AV24

32 paveiksle parodytos absorberio valymo efektyvumo priklausomybės nuo absorbento kiekio panaudojus sūkurinį srautą. Lyginant su grafikais, kai tyrimas atliktas su akustiniu lauku ir be gerinimo būdu, pastebima kad nei vienu atveju nėra didelio skirtumo. Skirtumas atsiranda tik panaudojus akustinį lauką, tačiau dėl aerozolyje esančių dujų skirtumas yra labai mažas. Absorbento kiekiui padidėjus 3 kartus kiekvieno elektrodo atveju efektyvumas didėja 2-3 karto. Padidėjus vandens debitui 5 kartus, absorberio efektyvumas didėja 2-3 karto. Pateiktos tik eksperimentinės reikšmės, kadangi skaičiuojamas modelis buvo sudaromas tik absorberiui be akustinio lauko ir be sūkurinio srauto.

3.5. Trečios dalies apibendrinimas

Parinkta įranga eksperimentui atlikti ir reikalingiems dydžiams matuoti ir stebėti. Matavimo prietaisai ir įrengimai parenkami panaudojant skaičiuojamą modelį, kadangi galima matyti kokie dydžiai reikalingi.

Pagamintas eksperimentinis stendas. Sudaryta tyrimų eiga. Atlikti tyrimo variantai: tyrimas oro srauto greičiui ir slėgiui nustatyti absorberyje; tyrimas nustatyti pradinę suvirinimo aerozolio koncentraciją; tyrimas, kai valymo sistemoje nepanaudojamas akustinis laukas ir sukūrinis srautas; tyrimas, kai panaudojamas tik akustinis laukas; tyrimas, kai panaudojamas tik sukūrinis srautas.

Gauti rezultatai pateikiami 4-8 lentelėse. Nubraižytos valymo efektyvumo priklausomybės nuo absorbento kiekio. Grafikai pateikiami 30-32 paveiksluose.

IŠVADOS

Atlikta mokslinės literatūros analizė. Išnagrinėti suvirinimo aerozolių susidarimo šaltiniai ir poveikiai žmogaus organizmui. Pastebėta, kad kietųjų dalelių sandara priklauso nuo sujungiamų detalių medžiagų, dujinė aerozolio sandara priklauso nuo elektrodo tipo. Aptarti pagrindiniai procesai vykstantys absorbciniame šlapiame valymo metodo. Nustatyti pagrindiniai absorbcinio įrenginio parametrai ir charakteristikos. Nagrinėjami konstrukcijos naujumo tobulinimai ir numatomi galimi rezultatai.

Sudarytas skaičiuojamas modelis, kurio pagalba galima apskaičiuoti visus įrenginio parametrus. Valymo sistema suskirstyta į tris zonas. Kiekvienoje zonoje nagrinėjant vykstančius procesus nustatyti parametrai, reikalingi skaičiavimams atlikti. Skaičiuojamas modelis aprašytas naudojant MATLAB paketą.

Įvertinant skaičiuojamą modelį parinkta įrangą, reikalinga eksperimentui atlikti. Pagamintas eksperimentinis stendas, sudaryta ekperimento metodika. Eksperimentai atlikti naudojant tris skirtingus elektrodus. Nustatyta suvirinimo aerozolio pradinė koncentracija, sudaroma kiekvieno elektrodo atveju (9,864, 11,976 ir 9,838 kg/m³). Atlikti tyrimai nustatyti oro srauto greičio ir slėgio pasiskirstymą absorberyje. Pastebėta, kad keičiant valomo oro debitą (0,250 , 0,315 ir 0,415 m³/s) slėgio nuostoliai absorberio viduje siekia 1-2 Pa. Slėgio nusotoliai visoje valymo sistemoje, didėjant oro debitui, auga: prie oro debito 0,250 m³/s slėgio nusotoliai siekia 20 Pa; prie oro debito 0,345 m³/s slėgio nuostoliai siekia 40 Pa; prie oro debito 0,415 m³/s slėgio nuostoliai siekia 60 Pa.

Bandymo metu, kai nenaudojamas akustinis laukas ir sukūrinis srautas, nustatytas išvalymo efektyvumas prie skirtingų oro ir vandens debitų. Nustatyti rezultatai palyginti su skaičiuojamu modeliu gautomis reikšmėmis. Skaičiuojamo modelio efektyvumo dydžiai skiriasi nuo eksperimentiškai gautų 25-50%. Matoma, kad skaičiuojamo modelio paklaida yra labai didelė. Tyrimo metu nustatytos valymo efektyvumo reikšmės panaudojant skirtingus elektrodus yra 10-50% ribose. Matoma, kad didėjant absorbento kiekiui nuo 0,001 m³/s iki 0,005 m³/s įrenginio efektyvumas didėja 25-50%.

Atlikus tyrimą panaudojant akustinį lauką kietųjų dalelių koaguliacijai sukelti pastebima, kad bendras valymo efektyvumas yra panašus su tyrimo rezultatais, kai akustinis laukas buvo nepanaudotas. Tačiau lyginant tik kietųjų dalelių išvalymą, akustinis laukas didina rezultatą 50-60%. Didijant asorbento kiekį nuo 0,001 m³/s iki 0,005 m³/s gautas valymo efektyvumas didėja 25-50%.

Bandymo rezultatai, panaudojus sukūrinį srautą, yra gana panašus su tyrimo, kai akustinis laukas ir sukūrinis srautas nenaudojamas, rezultatais. Pastebėta, kad naudojamo absorberio konstrukcijai sukūrinis srautas neturėjo įtakos gerinant įrenginio efektyvumą.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Adamomis, D.; Žunda A. 2003. Suvirinimo standartai, procesų klasifikacija ir jungčių paruošimas. *Agroinžinerija ir energetika. Mokslo ir gamybos žurnalas*. 8: 11–18.
- Bin, X.; Gao, H.; Luo, X.; Liao, H.; Liang Z. 2016. Mass transfer performance of CO₂ absorption into aqueous DEEA in packed columns. *International Journal of Greenhouse Gass Control*. 2016. 51: 32–41.
- Codolo, C.; Bizzo, W.. 2016. Mass transfer and liquid–film formation in a spray tower for SO₂ removal in sodium hydroxide solution. *Chemical Engineering Technology*. 39(10): 55–67.
- Dambrauskas, A.; Karaliūnas, B.; Šulskis, D. 2004. Elektrolankinio suvirinimo procesų kompiuterinis modeliavimas. *Elektronika ir elektrotechnika*. 4(53): 22–34.
- Engineering ToolBox. 2004. *Gases – Densities*. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 balandžio 21d.]. Prieiga per internetą: https://www.engineeringtoolbox.com/gas-density-d_158.html
- Engineering ToolBox. 2004. *Metals and Alloys – Densities*. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 balandžio 21 d.]. Prieiga per internetą: https://www.engineeringtoolbox.com/metal-alloys-densities-d_50.html.
- Engineering ToolBox. 2004. *Gases – Dynamic Viscosity*. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 balandžio 21 d.]. Prieiga per internetą: https://www.engineeringtoolbox.com/gases-absolute-dynamic-viscosity-d_1888.html
- Gregory, J. 2006. Particles in water. London: IWA publishing. 15–17.
- Javed, K.; Mahmud, T.; Purba, E. 2006. Enhancement of mass transfer in spray tower using swirling gas flow. *Chemical Engineering Research and Design*. 84: 62–78.
- Jenkins, N., Eagar, T. 2005. Chemical analysis of welding fume particles. *The Welding Journal*. 94: 101–108.
- Johansson; G.; Malmqvist, K.; Bohgard, M.; Akselsson R. 1981. Characteristics of welding fumes. *American Journal of Healthcare*. 15: 22–35.
- Kamand F.Z. 1988. Hydraulic friction factors for pipe flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 114(2): 36–49.
- Kim, Y–S.; Eagar W. 1993. Analysis of metal transfer in gas metal arc welding. *Welding Research Supplement*. 269: 105–118.
- Kunze, A–K.; Lutze, P.; Kopaschek, M.; Mackowiak, J–F.; Mackowiak, J.; Grunewald, M.; Gorak A. 2015. Mass transfer measurements in absorption and desorption: Determination of mass transfer parameters. *Chemical Engineering Research and Design*. 104: 62–79.
- Lemmon, E. 2000. Thermodynamic properties of air and mixtures of nitrogen, argon and oxygen from 60 to 2000 K at pressure to 2000 MPa. *Journal of Physical and Chemical reference data*. 29(3): 331–349.
- Lewis, W.; Whitman, W. 1924. Principles of gas absorption. *Industrial and Engineering Chemistry*. 16(12): 1215–1220.

- Myers, A.; Prausnitz, J. 1965. Thermodynamics of mixed-gas absorption. *Aiche Journal*. 11(1): 27–41.
- Never, N. 1995. Methods of converting ppm units. *Air Pollution Control Engineering*. 32: 118-145.
- National Institute of Standards and Technology. 2017. *NIST Chemistry WebBook*. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2018 balandžio 22 d.]. Prieiga per internetą: <https://webbook.nist.gov/chemistry/name-ser/>
- Palmes, E., Gunnison, A., DiMaggio, J., Tomczyk, C. 1976. Personal sampler for nitrogen dioxide. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 37(10): 570–577.
- Sander, B. 2015. Compilation of Henry's law constants for water as solvent. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 15: 51–71.
- Singh, Z.; Chadha, P.; Sharma S. 2016. Lung health among welders. *American Journal of Environmental and Occupational Health*. 1(1): 31–43.
- Sultan, A.; Thamir Al-K. 2005. Health hazards of welding fumes. *Health Problems Associated with Metal Production*. 1: 39–52.
- Vekteris, V.; Tetsman, I.; Mokshin V. 2019. Investigation of the efficiency of the lateral exhaust hood enhanced by aeroacoustic air flow. *Process Safety and Environmental Protection*. 109: 224–232.
- Vesovic, V., Wakahem, A. 1990. The transport properties of carbon dioxide. *Journal of Physical and Chemical Reference data*. 736: 512-532.
- Wilke, C. 1950. A viscosity equation for gas mixtures. *The Journal of Chemical Physics*. 1950. 18(517): 19–34.
- Weiner, R.; Matthews, R. 2003. Research of spray tower characteristics with counter-flow system. *Chemical Engineering Research and Design*. 71: 111–125.
- Zapke, A.; Kroger, D. 2000. Countercurrent gas – liquid flow in inclined and vertical ducts. Flow patterns, pressure drop characteristics and flooding. *International Journal of Multiphase Flow*. 26(9): 1439–1455.

PRIEDAI

Priedas nr. 1. 21-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ skaitytas pranešimas.



21-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminė konferencija
Proceedings of the 21st Conference for Junior Researchers „Science – Future of Lithuania“

MECHANIKOS INŽINERIJA / MECHANICAL ENGINEERING

2018 m. balandžio 27 d. Vilnius
27 April 2017, Vilnius, Lithuania

Mechanikos inžinerija
Mechanical engineering

SUVIRINIMO AEROZOLIO VALYMO ŠLAPIUOJU METODU TYRIMAS RESEARCH OF CLEANING WEILDING AEROSOL WITH WET METHOD

Lukas Grigaliūnas¹, Ina Tetsman²

VGTM MF Mechanikos inžinerijos katedra

El. p. ¹lukas.grigaliunas@stud.vgtu.lt; ²ina.tetsman@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje aprašomas suvirinimo aerosolio valymo šlapiuoju metodu eksperimento sudarymas. Aptariamas suvirinimo aerosolių susidarymas ir poveikis žmogaus organizmui. Nagrinėjamas absorbcinis valymo metodas panaudojant vandenį kaip absorberį. Įvertinami du absorberio gerinimo būdai – aksutinės kietųjų dalelių koaguliacijos panaudojimas ir sukančio srauto įvedimas į absorberį.

Reikšminiai žodžiai: suvirinimas, aerosolis, absorberis, absorbcija, šlapiasis valymo metodas, kietosios dalelės

Įvadas. Suvirinimo procesas yra labiausiai paplitęs neišardomų sujungimų gamybos būdas. Virinimas naudojamas didelių gabaritų detalių gamyboje, gaminių sujungimui tarpusavyje, taip pat ir detalių remontui atlikti. Platus naudojimo spektras reiškia didelį panaudojimą gamyboje. Suvirinimas, kaip ir visi procesai, turi savų privalumų ir trūkumų. Pagrindinis šio proceso trūkumas – suvirinimo metu susidarantys suvirinimo aerosolis.

Suvirinimo aerosolis priskiriamas prie mechaninių teršalų, kurį sudaro kietosios smulkios dalelės ir dujos. Tiek kietosios dalelės, tiek susidarančios dujos yra pavojingos žmogaus organizmui. Kadangi suvirinimo aerosolis yra dispersinė sistema turinti abi šias kenksmingas medžiagas, svarbu yra nuo jų apsaugoti.

Darbo metu yra įvairių būdų apsaugoti nuo suvirinimo aerosolio jo neutilizuojant. Tačiau nevaloma tarša niekur nedingsta, kaupiasi ir neprižiūrima gali sukelti daug pasekmių. Todėl suvirinimo aerosolį yra svarbu tinkamai ir efektyviai pašalinti iš aplinkos.

Tyrimo objektas – aerosolinės taršos, susidarančios suvirinimo metu, išvalymo efektyvumas šlapiuoju metodu panaudojant absorberį.

Tyrimo tikslas – išnagrinėti suvirinimo aerosolio šlapijo valymo būdo efektyvumo nustatymą ir suformuluoti šio dydžio tyrimo metodą.

Tyrimo naujumas – valomas srautas į absorberius paduodamas ašiniu srautu, tačiau šiame tyrime nagrinėjamas valomo oro padavimas sukančiu srautu. Taip pat nagrinėjama kietųjų dalelių, esančių suvirinimo aerosolio

sandaroje, koaguliacijos panaudojus akustinį srautą įtaką valymo efektyvumui.

Suvirinimo aerosolio susidarymo šaltiniai ir poveikis žmogaus organizmui.

1 lentelė. Suvirinimo aerosolio kietųjų dalelių medžiagų šaltiniai ir jų poveikiai žmogaus organizmui (Kim *et al.* 1993) (Singh *et al.* 2016) (Sultan *et al.* 2005)

Medžiaga	Šaltinis	Poveikis žmogaus organizmui
Aliuminis	Lydiniai, kuriuose yra aliuminio	Kvėpavimo dirginimas
Berilis	Grūdininimo agentas randamas varyje, magnyje, aliuminio lydiniuose	Karščiavimas, kvėpavimo takų pažeidimai
Cinkas	Cinkuoti ir dažyti metalai	Karščiavimas
Chromas	Nerūdijantis plienas, kuriame yra daug legiruotos medžiagos	Padidėjusi rizika susirgti plaučių vėžiu, kartais sukeliamas odos dirginimas
Geležis	Geležies ir nerūdijančio plieno suvirinimo procesas	Nosies ir plaučių dirginimas, siderozė
Švinas	Lydmetalis, žalvario ir bronzos lydiniai	Ūminis poveikis yra akių, odos ir kvėpavimo takų dirginimas
Varis	Žalvaris, bronzos	Nosies dirginimas

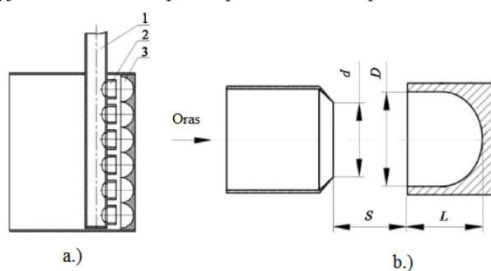
Suvirinimo aerosolis – dūminė aerosolio sistema susidaranti iš kietųjų dalelių, kurių sudėtis priklauso nuo suvirinamų medžiagų, ir dujų, susidarantių suvirinimo metu. Dalelių dydis dūmuose būna 0,001–10 μm .

2 lentelė. Suvirinimo aerosolio dujinių medžiagų šaltiniai ir jų poveikiai žmogaus organizmui (Kim *et al.* 1993) (Singh *et al.* 2016) (Sultan *et al.* 2005)

Medžiaga	Šaltinis	Poveikis žmogaus organizmui
Anglies monoksidas	Susiformuoja elektros lanke	Patenkį į kraujotaką sukeldamas galvos skausmą, svaigulį ir raumenų silpnėjimą
Azoto oksidas	Susiformuoja elektros lanke	Mažos koncentracijos sukelia akių, nosies ir gerklės dirginimas. Didėsnes koncentracijos sukelia skyščio kaupimąsi plaučiuose
Ozonas	Susiformuoja elektros lanke, dažniausiai MIG ir TIG tipuose	Labai mažos koncentracijos sukelia galvos skausmą ir sausina akis. Lėtinis poveikis sukelia nepagydomą plaučių funkcijos pokytį.

Akustikos panaudojimas valymo procese.

Nagrinėjamas vibroakustinio lauko, sudaryto Hartmano švilpuko, poveikis kietosoms dalelėms suvirinimo aerozolyje. Hartmano švilpukas pavaizduotas 1 pav.



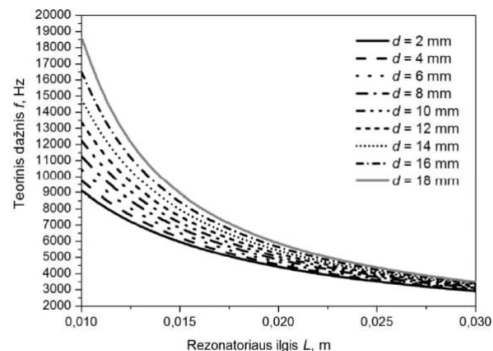
1 pav. Hartmano švilpukas:

a – principinė schema: 1 – oro padavimas, 2 – tūta, 3 – rezonatorius.

b – pagrindiniai įtakojantys dydžiai (Vekteris *et al.* 2017)

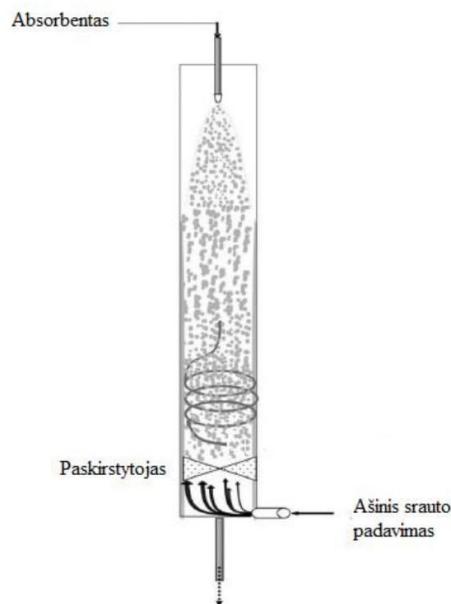
Oro srautas, paduodamas į švilpuką (1 pav. a-1) juda per tūtą (b- d) ir atsimuša į rezonatorių (b- D) taip sukeldamas akustinį lauką. Šis laukas sukelia akustinę kietųjų dalelių koaguliaciją, padidindamas jų skersmenį ir taip padidindamas išvalymo efektyvumą. Nuo atstumo tarp tūtos ir rezonatoriaus (b- L) priklauso garso slėgis ir dažnis. Eksperimentiškai yra įrodyta, kad dalelių koaguliaciją vyksta efektyviai, kai tūtas ir rezonatoriaus skersmenų santykis yra 1,6, o atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus yra 2 mm. Tokiu būdu gaunamas oro slėgis 142 dB dydžio ir 3000 Hz dažnis.

dindamas išvalymo efektyvumą. Nuo atstumo tarp tūtos ir rezonatoriaus (b- L) priklauso garso slėgis ir dažnis. Eksperimentiškai yra įrodyta, kad dalelių koaguliaciją vyksta efektyviai, kai tūtas ir rezonatoriaus skersmenų santykis yra 1,6, o atstumas tarp tūtos ir rezonatoriaus yra 2 mm. Tokiu būdu gaunamas oro slėgis 142 dB dydžio ir 3000 Hz dažnis.



2 pav. Garso dažnio priklausomybė nuo rezonatoriaus ilgio ir tūtos skersmens (Vekteris *et al.* 2017)

Sukamojo srauto panaudojimas absorberioje. Valomas srautas į absorberį paduodamas ašiniu judėjimu. Mokslininkų atliktame eksperimente buvo nustatyta, kad paduodant sukūriniu srautu (panašiai kaip srautas juda ciklonuose) masės pernešimo koeficientas atitinkamai padidėja 13-20% (Javed *et al.* 2006).



3 pav. Sukamojo srauto sudarymas absorberioje (Javed *et al.* 2006)

Srautas į absorberį paduodamas ašine anga. Apačioje esantis paskirstytojas gali priminti daugiakanalį cikloną. Tai lyg spirale uždarytos sekcija, kuri praleisdama srautą sukelia sukurtinį judėjimą absorberio viduje.

Eksperimentinio stendo sudarymas. Tikrinant suvirinimo aerozolių valymo efektyvumą šlapiuoju metodu reikia išmatuoti:

1. Kietųjų dalelių koncentraciją prieš ir po valymo;
2. Dujų koncentraciją prieš ir po valymo.

Kietosioms dalelėms matuoti buvo pasirinktas kišeninis filtras. Filto pozicijas bus keičiama eksperimento metu: pradžia jungiamas prieš absorberio įėjimo angą, po to už išėjimo angos. Matuojant oro srauto debitą, matavimo laiką ir masės pokytį filtre galime nustatyti kietųjų dalelių koncentraciją.



4 pav. Kišeninis oro filtras

Matuoti dujų koncentraciją valymo metu buvo pasirinktas TESTO 340 dūmų analizatorius. Šis įrenginys gali matuoti judančio srauto slėgį, temperatūrą, NO_x , CO_x dujų koncentracijas. Kaip ir kietųjų dalelių matavimo metu, TESTO 340 dūmų analizatorius bus naudojamas prieš įėjimo angą ir už išėjimo angos.



5 pav. TESTO 340 dūmų analizatorius

Parinkus aerozolinės taršos koncentracijų matavimo prietaisus pagamintas eksperimento stendas.



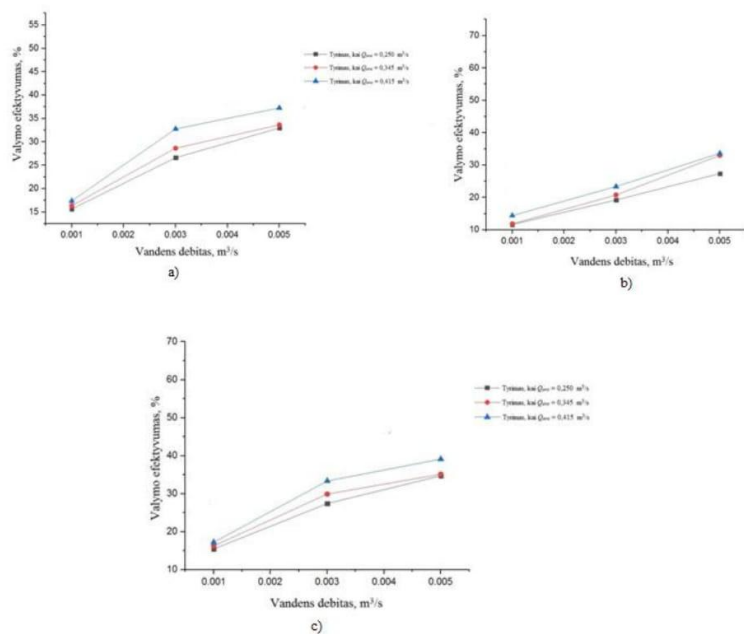
6 pav. Pagamintas eksperimentinis stendas

Suvirinimo aerozolis surenkamas šoniniu siurbtuvu. Judėdamas per kišeninį filtrą (filtras įstomas vamzdžio viduje) valomas oras pateks į akustinį srautą. Vamzdžio viduje yra įstatytas Hartmano purkštukas. Paduodant suslėgtą orą bus pasiekiamas 3000 Hz dažnis dalelių koaguliacijai įvykti. Toliau valomas oro srautas patenka į absorberį. Įvykus aerozolių absorbcijai švarus oras išsiurbiamas ventiliatoriumi. Reikia pabrėžti, kad kišeninis filtras bus perkeliamas tarp absorberio ir ventiliatoriaus. Susikaupęs vanduo absorberyje surenkamas kaupimo talpa ir paduodamas į kanalizaciją.

Tyrimų rezultatai. Bandymo rezultatai, kai nenaudojamas akustinis laukas ir sukūrinis srautas, pavaizduoti 7 paveiksle. Galima pastebėti, kad didėjant absorbento kiekiui išvalymo efektyvumas didėja.

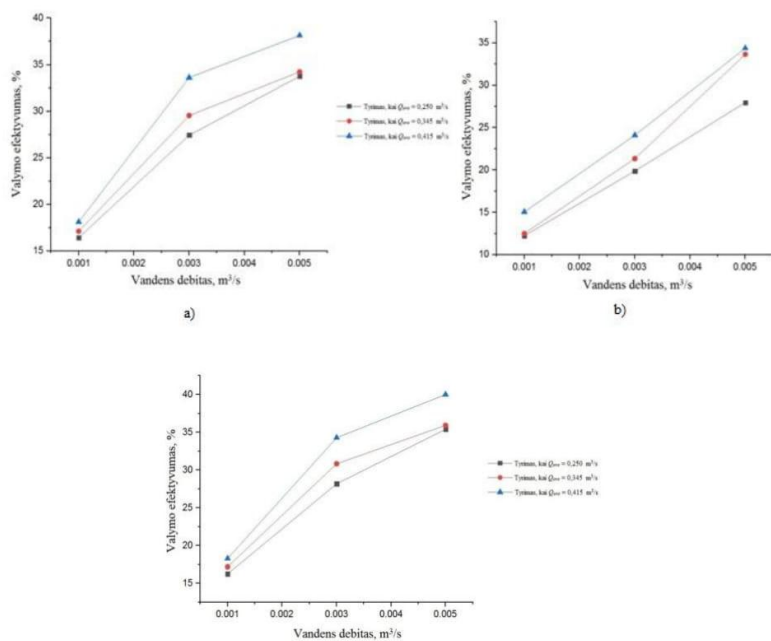
Atlikus tyrimą panaudojant akustinį lauką kietųjų dalelių koaguliacijai sukelti pastebima, kad bendras valymo efektyvumas yra panašus su tyrimo rezultatais, kai akustinis laukas buvo nepanaudotas. 8 paveiksle pateikiamos valymo efektyvumo priklausomybės nuo absorbento kiekio. Tačiau lyginant tik kietųjų dalelių išvalymą, akustinis laukas didina rezultatą 50-60%.

Bandymo rezultatai, panaudojus sukūrinį srautą, yra gana panašus su tyrimo, kai akustinis laukas ir sukūrinis srautas nenaudojamas, rezultatais. Pastebėta, kad naudojamo absorberio konstrukcijai sukūrinis srautas neturėjo įtakos gerinant įrenginio efektyvumą. Išvalymo efektyvumo priklausomybės nuo absorbento, gautos bandyme su sukūriniu srautu, pavaizduotos 9 paveiksle.



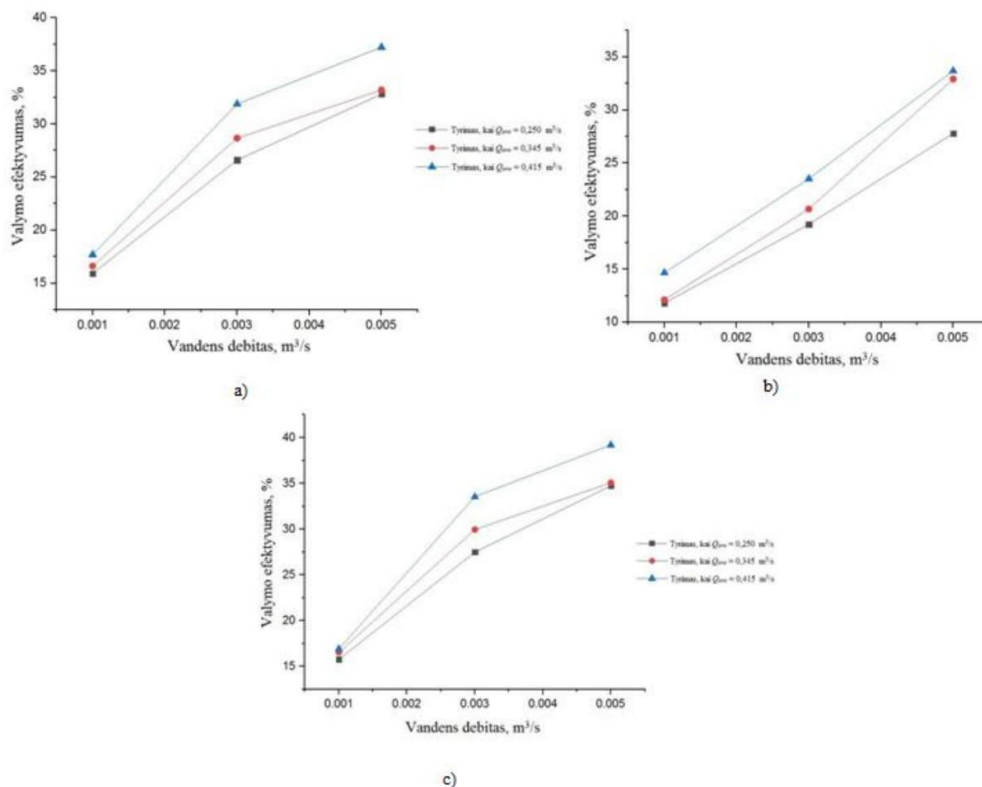
7 pav. Valymo proceso efektyvumo, be akustinio lauko ir be sukūrinio srauto, teorinės ir eksperimentinės priklausomybės nuo absorbento kiekio:

- a) elektrodas AP60,
b) elektrodas APL60,
c) elektrodas AV24



8 pav. Valymo proceso efektyvumo, su akustiniu lauku ir be sukūrinio srauto, teorinės ir eksperimentinės priklausomybės nuo absorbento kiekio:

- a) elektrodas AP60,
b) elektrodas APL60,
c) elektrodas AV24



9 pav. Valymo proceso efektyvumo, be akustinio lauko ir su sukūriniu srautu, teorinės ir eksperimentinės priklausomybės nuo absorbento kiekio:

- elektrodas AP60,
- elektrodas APL60,
- elektrodas AV24

Literatūros sąrašas.

- Adamonis, D.; Žunda A. 2003. Suvirinimo standartai, procesų klasifikacija ir jungčių paruošimas. *Agroinžinerija ir energetika. Mokslo ir gamybos žurnalas*. 8: 11–18.
- Bin, X.; Gao, H.; Luo, X.; Liao, H.; Liang Z. 2016. Mass transfer performance of CO_2 absorption into aqueous DEEA in packed columns. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2016. 51: 32–41.
- Codolo, C.; Bizzo, W. 2016. Mass transfer and liquid-film formation in a spray tower for SO_2 removal in sodium hydroxide solution. *Chemical Engineering Technology*. 39(10): 55–67.
- Dambrauskas, A.; Karaliūnas, B.; Šulskis, D. 2004. Elektrolankinio suvirinimo procesų kompiuterinis modeliavimas. *Elektronika ir elektrotechnika*. 4(53): 22–34.
- Gregory, J. 2006. Particles in water. London: IWA publishing. 15–17.
- Javed, K.; Mahmud, T.; Purba, E. 2006. Enhancement of mass transfer in spray tower using swirling gas flow. *Chemical Engineering Research and Design*. 84: 62–78.
- Jenkins, N.; Eagar, T. 2005. Chemical analysis of welding fume particles. *The Welding Journal*. 94: 101–108.
- Johansson; G.; Malmqvist, K.; Bohgard, M.; Akselsson R. 1981. Characteristics of welding fumes. *American Journal of Healthcare*. 15: 22–35.
- Kamand F.Z. 1988. Hydraulic friction factors for pipe flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 114(2): 36–49.
- Kim, Y.-S.; Eagar W. 1993. Analysis of metal transfer in gas metal arc welding. *Welding Research Supplement*. 269: 105–118.
- Kunze, A.-K.; Lutze, P.; Kopaschek, M.; Mackowiak, J.-F.; Mackowiak, J.; Grunewald, M.; Gorak A. 2015. Mass transfer measurements in absorption and desorption: Determination of mass transfer parameters. *Chemical Engineering Research and Design*. 104: 62–79.
- Lemmon, E. 2000. Thermodynamic properties of air and mixtures of nitrogen, argon and oxygen from 60 to 2000 K at pressure to 2000 MPa. *Journal of Physical and Chemical reference data*. 29(3): 331–349.
- Lewis, W.; Whitman, W. 1924. Principles of gas absorption. *Industrial and Engineering Chemistry*. 16(12): 1215–1220.
- Myers, A.; Prausnitz, J. 1965. Thermodynamics of mixed-gas absorption. *Atche Journal*. 11(1): 27–41.
- Never, N. 1995. Methods of converting ppm units. *Air Pollution Control Engineering*. 32: 118–145.
- Palmes, E.; Gunnison, A.; DiMattio, J.; Tomczyk, C. 1976. Personal sampler for nitrogen dioxide. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 37(10): 570–577.
- Sander, B. 2015. Compilation of Henry's law constants for water as solvent. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 15: 51–71.
- Singh, Z.; Chadha, P.; Sharma S. 2016. Lung health among welders. *American Journal of Environmental and Occupational Health*. 1(1): 31–43.
- Sultan, A.; Thamir Al-K. 2005. Health hazards of welding fumes. *Health Problems Associated with Metal Production*. 1: 39–52.
- Vekteris, V.; Tetsman, I.; Mokshin V. 2019. Investigation of the efficiency of the lateral exhaust hood enhanced by aeroacoustics air flow. *Process Safety and Environmental Protection*. 109: 224–232.
- Vesovic, V.; Wakahem, A. 1990. The transport properties of carbon dioxide. *Journal of Physical and Chemical Reference data*. 736: 512–532.
- Wilke, C. 1950. A viscosity equation for gas mixtures. *The Journal of Chemical Physics*. 18(517): 19–34.
- Weiner, R.; Matthews, R. 2003. Research of spray tower characteristics with counter-flow system. *Chemical Engineering Research and Design*. 71: 111–125.

Priedas nr. 2. Skaičiuojamo modelio algoritmas, parašytas MATLAB paketu

```
>>% irašomi pagrindiniai absorberio parametrai
>> Qoro=1 % įrašyti valomo oro debitą, m3/s
>> toro=1 % įrašyti valomo oro temperatūrą, °C
>>QH20=1 % įrašyti naudojama absorbento debitą, m3/s
>> dA1=1 % įrašyti absorberio įėjimo angos skersmenį, m
>>dA2=1 % įrašyti absorberio išėjimo angos skersmenį, m
>>DA=0 % įrašyti absorberio konstrukcijos skersmenį, m
>>AA1=1 % įrašyti absorberio konstrukcijos plotį, jei konstrukcija ne apskritimo geometrijos, m
>>AA2=1 % įrašyti absorberio konstrukcijos ilgį, jei konstrukcija ne apskritimo geometrijos, m
>>teta=1 % įrašyti purkštuko įpurškimo kampa, laipsniais
>>HA=1 % įrašyti bendra absorberio aukštį nuo apačios iki purkštuko, m
>>niu=0.9 % įrašyti absorberio efektyvumą
>>% irašomos teršalų charakteristikos
>> y1=1 % įrašyti pradinę teršalų koncentraciją ore, mg/m3
>>X1=0 % įrašyti pradinę teršalų koncentraciją absorbente, mg/m3
>>CKD1=0.1 % įrašyti kietųjų dalelių procentinę koncentraciją
>>CCO2=0.1 % įrašyti CO2 procentinę koncentraciją
>>CNO2=0.1 % įrašyti NO2 procentinę koncentraciją
>>CSO2=0.1 % įrašyti SO2 procentinę koncentraciją
>>% įrašyti valymo laiką
>> tval=1 % sekundėmis
>>% naudojamos konstantos
>>Moro=28.96 % molinė oro masė, g/mol
>>MH2O=18.01 % molinė vandens masė, g/mol
>>rooro=1.225 % oro tankis, kg/m3
>>roH2O=997 % vandens tankis, kg/m3
>>roCO2=1.98 % anglies dioksido tankis, kg/m3
>>miuCO2=1.47*10^(-5) % anglies dioksido dinaminė klampa, Pa·s
>>MCO2=44.01 % anglies dioksido molinė masė, g/mol
>>roNO2=1.45 % azoto dioksido tankis, kg/m3
>>miuNO2=1.47*10^(-5) % azoto dioksido dinaminė klampa, Pa·s
>>MNO2=46.001 % azoto dioksido molinė masė, g/mol
>>MDAL=67.006 % priimta kietųjų dalelių molinė masė, g/mol
>>roDAL=6703 % priimtas kietųjų dalelių tankis
```

```

>>xi1=19.132
>>xi2=20.632
>>KHCO2=0.035 %Henrio dėsno proporcingumo koeficientas anglies dioksidui, mol/kg·Pa
>>KHNO2=0.007 %Henrio dėsno proporcingumo koeficientas azoto dioksidui, mol/kg·Pa
>> % atliekami skaičiavimai
>>Voro=Qoro*tval % tiekiamo oro tūris, m3
>>SA1=3.14*dA1^2 % įėjimo angos plotas, m2
>>SA2=3.14*dA2^2 % išėjimo angos plotas, m2
>>voro1=Qoro*SA1 % valomo oro greitis įėjimo angoje, m/s
>>voro2=oro*SA2 % valomo oro greitis išėjimo angoje, m/s
>>if DA~=0
    SA=3.14*DA^2
    else AA1~=0
    SA=AA1*AA2
end
>>% apskaičiuojamas absorberio skerspjūvio plotas pagal jo geometriją, m2
>>voro3=Qoro*SA % oro greitis absorberio viduje, m/s
>>rotersalu=roKD1*CKD1+roCO2*CCO2+roNO2*CNO2+CSO2*roCO2 %teršalų tankis ore, kg/m3
>>DA12=(2*AA1*AA2)/(AA1+AA2) % ekvivalentinis skersmuo jei absorberio skerspjūvio plotas ne
apskritimo geometrijos, m
>>miutersalu= miuKD1*CKD1+miuCO2*CCO2+miuNO2*CNO2+CSO2*roCO2 % teršalų dinaminė
klampa ore, Pa*s
>>moro=Voro*rooro % tiekiamo oro masė, kg
>>mtersalu1=moro*y1 % pradinė teršalų masė ore, kg
>> Ctersalu1=(mtersalu1*100)/moro % pradinė teršalų koncentracija
>>Coro1=1-Ctersalu1
>>rooro1=Ctersalu1*rotersalu1+Coro1*rooro % pradinis užteršto oro tankis, kg/m3
>>miuoro1=Ctersalu1*miutersalu1+Coro1*miuoro % pradinė dinaminės klampos vertė, Pa·s
>>y2=niu*y1 % galinė teršalų koncentracija ore, kg/m3
>>mtersalu2=moro*y2 % galinė teršalų masė ore, kg
>> Ctersalu2=(mtersalu2*100)/moro % galinė teršalų koncentracija
>>Coro2=1-Ctersalu2
>>rotersalu2=(mtersalu2*rotersalu1)/mtersalu1

```

```

>>miuteršalų2=(mteršalų2*miuteršalų1)/mteršalų1
>>rooro2=Ctersalu2*rotersalu2+Coro2*rooro % galinis užtersto oro tankis, kg/m3
>>miuoro2=Ctersalu2*miutersalu2+Coro2*miuoro % galinė dinaminės klampos vertė, Pa·s
>>RE1=(dA1*voro1)/miuoro1 % Reynolds skaičius įėjimo angoje
>>RE2=(dA2*voro2)/miuoro2 % Reynolds skaičius išėjimo angoje
>>lemda1=0.25*(ln(deltae/(3.71*dA1))+5.621/((RE1^1.09))) % hidraulinės trinties koeficientas įėjimo
angoje
>>lemda2=0.25*(ln(deltae/(3.71*dA2))+5.621/((RE2^1.09))) % hidraulinės trinties koeficientas išėjimo
angoje
>>P1=(lemda1/dA1+xi1)*((rooro1*voro1^2)/2) % slėgis absorberio įėjimo angoje, Pa
>>P2=(lemda2/dA2+xi2)*((rooro2*voro2^2)/2) % slėgis absorberio išėjimo angoje, Pa
>>Mmolters1=mtersalu1/(CKD1*MKD+CCO2*MCO2+CNO2*MNO+CSO2*MSO2)
>>Mmolters2=(mtersalu2*Mmolters1)/mtersalu1
>>Qmoloro=(moro /Moro)/tval
>>Qmoloro2=((moro*Coro2)/Moro)tval>>VH2O=QH2O*tval % naudojamo absorbento tūris, m3
>>mH2O=VH2O*roH2O % naudojamo absorbento masė, kg
>>QmolH2O=(mH2O/MH2O)/tval
>>Y1=((moro*Coro1/Moro)-Mmolters1)/ (moro*Coro1/Moro)
>>Y2=((moro*Coro2/Moro)-Mmolters2)/ (moro*Coro1/Moro)
>>X1=0
>>X2=(Qmoloro1*Y1-Qmoloro2*Y2)/QmolH2O % nustatoma teršalų koncentracija absorbente po
valymo
>>KOEf1=P1-(P1*Coro1)
>>KOEf2=P2-(P2*Coro2)
>>syms X Y
>>X=linspace(X1,X2,10)
>>Y=Y2-(QmolH2O/Qmoloro)*X2+(QmolH2O/Qmoloro)*X
>>syms XX YY
>>XX=linspace(((KOEf1* KHCO2* KHNO2)/(KHCO2+KHNO2)), ((KOEf2* KHCO2*
KHNO2)/(KHCO2+KHNO2)),10) % nustatomos pusiausvyros reikšmės
>>YY=Y2-(QmolH2O/Qmoloro)*X2+(QmolH2O/Qmoloro)*XX

```