

Vivita Priedniece

MAZAS JAUDAS KATLU DŪMGĀZU ATTĪRĪŠANAS UN SILTUMA ATGUVES EKSPERIMENTĀLĀ IZPĒTE UN MODELĒŠANA

Promocijas darbs



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte

Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Vivita Priedniece

Doktora studiju programmas “Vides zinātne” doktorante

**MAZAS JAUDAS KATLU DŪMGĀZU
ATTĪRĪŠANAS UN SILTUMA ATGUVES
EKSPERIMENTĀLĀ IZPĒTE UN MODELĒŠANA**

Promocijas darbs

Zinātniskie vadītāji:

profesors *Dr. habil. sc. ing.*

IVARS VEIDENBERGS,

vadošais pētnieks *Dr. sc. ing.*

VLADIMIRS KIRSANOVS

Rīga 2022

ANOTĀCIJA

“Mazas jaudas katlu dūmgāzu attīrīšanas un siltuma atguves eksperimentālā izpēte un modelēšana” ir V. Priednieces promocijas darbs zinātnes doktora (Ph. D.) grāda iegūšanai Rīgas Tehniskajā universitātē, 2022.

Promocijas darbs izstrādāts Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātes Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūtā laika posmā no 2018. gada līdz 2022. gadam.

Promocijas darba mērķis ir mazas jaudas siltuma avota dūmgāzu attīrīšanas un siltuma atgūšanas iekārtas izveide, eksperimentāla un analītiska izpēte un darbības režīmu optimizācija. Darba mērķa sasniegšanai īstenojamie uzdevumi:

- aprēķināt un izgatavot sīkpilienu dūmgāzu kondensatora jeb miglas aparāta iekārtu, veikt tās eksperimentālu izpēti;
- izstrādāt aparāta simulācijas modeli, izveidot tā aprēķina datorprogrammu;
- validēt miglas aparāta modeli;
- veikt miglas aparāta režīmu optimizāciju ar Boksa–Vilsona (*Box–Wilson*) metodi.

Promocijas darbā ietverts ievads un četras nodaļas.

Darba ievadā ir atspoguļota darba aktualitāte, teorētiskā un praktiskā novitāte, definēts pētījuma mērķis un mērķa izpildei īstenojamie uzdevumi, kā arī sniegta informācija par pētījuma metodiku un sniegtajiem ieguvumiem jeb praktisko lietojumu.

Pirmajā nodaļā ietverts literatūras apskats par mājsaimniecības izmantoto kurināmo, galvenajām degšanas iekārtām, dūmgāzu attīrīšanas tehnoloģijām, cieto daļiņu emisijām Latvijā un pasaulē, to ietekmi uz veselību, siltuma un masas apmaiņu, kā arī šo procesu modelēšanu. Modelēšanas aprakstā iekļauti piemēri arī siltuma un masas apmaiņu raksturojošiem modeļiem, noslēgumā sniedzot ieskatu arī par modelēšanas valodu *Python*, kas izmantota konkrētajā pētījumā.

Otrā nodaļa ietver miglas aparāta eksperimentālā stenda izveidi, sastāvdaļu izvietojumu, aprakstu un pārbaudes nozīmi. Nodaļas ietvaros sniegta informācija par cieto daļiņu mērījumu veikšanu eksperimentos un rezultātu ieguvei nepieciešamo procedūru. Nodaļas noslēgumā aprakstīta pārbaudes eksperimentu metodika, ietverot papildus radīto enerģijas patēriņu ūdens iesmidzināšanas procesā.

Trešā nodaļa koncentrējas uz aprēķina modeli. Tajā aprakstīta pilienu pārvietošanās mitru gāzu plūsmā kondensācijas gadījumā un pilienu cieto daļiņu uztveršana. Nodaļā ietverti un aprakstīti vienādojumi siltuma un masas apmaiņas procesu un raksturīgo parametru aprēķinam. Modeļa realizācijas algoritms apraksta vienādojumu secību un aprēķina veikšanas soļus.

Ceturtnā nodaļa apkopo galvenos pētījuma rezultātus. Tajā ietverti eksperimentālā stenda pārbaudes rezultāti, miglas aparāta veikspējas eksperimentu rezultāti, aprēķina modeļa validācija un miglas aparāta jaudas optimizācija. Darba noslēgumā ietverti secinājumi.

Promocijas darbs rakstīts latviešu valodā. Darbs ietver ievadu, četras nodaļas, secinājumus, 38 attēlus, 17 tabulas, 67 vienādojumus, četrus pielikumus, kopā 105 lappuses. Literatūras sarakstā ir 133 nosaukumi.

ANNOTATION

“Small capacity boiler flue gas treatment and heat recovery experimental study and modelling” is the Doctoral Thesis of V. Priedniece to obtain a Doctor of Science (PhD) at Riga Technical University, 2022.

The Doctoral Thesis has been made in the Riga Technical University, Faculty of Electrical and Environmental Engineering, Institute of Energy Systems and Environment from 2018 until 2022.

The aim of the Doctoral Thesis is the development, experimental and analytical analysis of a small capacity heat source flue gas treatment and heat recovery equipment and the optimization of its operational regimes. To fulfill this goal, the following tasks are proposed:

- To calculate and develop the fog unit equipment and perform experimental study of it;
- To develop the simulation model of the equipment and to make the calculations computer program of it;
- To validate the model of the fog unit;
- To perform the optimization of the fog unit operational regimes using the Box–Wilson method.

The Doctoral Thesis includes an introduction and four main chapters.

The introduction includes the topicality of the study, the theoretical and practical novelty, the defined aim of the study and the tasks to fulfill the aim. The introduction also offers information on methodology of the study and practical use of obtained results.

The first chapter consists of a literature review on fuels used in households and the main combustion equipment used; an overview of flue gas treatment technologies; a summary of particulate matter emissions in Latvia and globally, the impacts of particulate matter on health; an insight into heat and mass transfer processes and the modelling of them. Modelling description also includes examples of models characteristic of heat and mass transfer, offering a brief look at modelling language *Python*, that is used in this study.

The second chapter describes the development of the experimental stand, the positioning of components, description of them and the importance of verification. The chapter offers information on particulate matter measurement performance in experiments and the procedure to obtain precise results. The conclusion of the chapter has the description of the methodology of experiments, including additional electricity consumption in water spraying process.

The third chapter is focused on calculations model. There, the movements of droplets in wet gas flow and particulate matter capture by droplets is described. The chapter involves equations for calculation of heat and mass transfer processes and characteristic parameters and description of them. The realization algorithm of the model describes the order of equations and calculation steps.

The fourth chapter summarizes the main results of the study. It includes the experimental stand verification results, results of the fog unit performance experiments, validation of the model and optimization of the fog unit capacity. The end of the thesis includes conclusions.

The Doctoral Thesis is written in Latvian. The thesis consists of introduction, four chapters, conclusions, 38 figures, 17 tables, 67 equations, four annexes, 105 pages in total. The Bibliography includes 133 sources.

PATEICĪBAS

Atskatoties uz promocijas darba izstrādi, secinājums ir, ka aiz viena liela personīgā mērķa sasniegšanas stāv liela cilvēku grupa. Paldies katram, kas piedalījies šajā procesā ar atbalstu, padomu, vērtīgiem komentāriem, vienkārši uzklaušīšanu un, protams, tehniskajām lietām.

Vislielākais paldies darba vadītājiem, profesoram Ivaram Veidenbergam un vadošajam pētniekam Vladimiram Kirsanovam par ieguldīto laiku, nepārtrauktu atbalstu un palīdzību promocijas darba izstrādē. Paldies profesoram Ivaram Veidenbergam par daudzajām diskusijām gan par siltuma un masas apmaiņas procesiem, gan dzīvi, uzmundrinājumiem grūtajos brīžos, uzmanīgu sekošanu līdzī paveiktajam, uzņemšanos vadīt manus zinātniskos noslēguma darbus jau sākot no bakalaura darba izstrādes laika un intereses rosināšanu nezināmā izpētei. Paldies vadošajam pētniekam Vladimiram Kirsanovam par uzmanīgu sekošanu līdzī praktisko darbu virzībai un publikāciju izstrādei, lai sasniegtu labākos rezultātus un viss iekļautos plānotajos termiņos.

Liels paldies profesorei Dagnijai Blumbergai par ievirzīšanu miglas aparāta tēmā un palīdzību noturēt praktisko daļu stingru virzību uz mērķi grūtajos darba izstrādes posmos.

Paldies Vides monitoringa laboratorijas bijušajiem un esošajiem kolēģiem, īpaši Viktorijai Terjaņikai un Elvim Kalniņam par kopīgu darbu pie miglas aparāta izpētes, sākot no iekārtas izstrādes posma līdz eksperimentos iegūto mērījumu analīzei. Paldies Rūdolfam Rumbam par ieguldījumu modeļa izveidē.

Sirsnīgs paldies ģimenei, Kintijai un Marijai, par audzināšanu un neatlaidīgu atbalstu ne tikai darba izstrādes laikā, bet visa mūža garumā. Paldies Zaigai par emocionālo atbalstu un brīžiem pat pārmērīgu interesi par darba izstrādi. Paldies draugiem un teātra biedriem par uzmundrinājumiem un iespēju atslēgties no darba pārslodzes brīžos, kā arī regulāriem treniņiem stāstīt par saviem pētījumiem jebkuram saprotamā valodā.

Vārdos grūti izsakāms paldies Raivim Eglītim. Tava pašsaprotamā neatlaidība un darba ētikas piemērs šo gadu laikā ir modinājuši manī gan spītību, gan vēlēšanos sasniegt vairāk nekā pati biju plānojusi. Paldies Tev par katras problēmas uzklaušīšanu un prieka mirkļa izbaudīšanu, īstajiem vārdiem grūtajos brīžos un kopā būšanu ikdienā. Paralēli esam darbojušies pie gala darbiem jau ilgi un nepaies ne pusgads, kad abi būsim doktori.

Paldies jums visiem! Priekā!

SATURS

Tabulu un attēlu saraksts	6
Apzīmējumi	8
Ievads	10
Tēmas aktualitāte	10
Darba mērķis un uzdevumi	10
Hipotēze	11
Zinātniskā novitāte	11
Praktiskā novitāte	11
Pētījumu aprobācija	12
1. Literatūras apskats	14
1.1. Mājsaimniecībās izmantotais kurināmais, degšanas iekārtas	14
1.2. Dūmgāzu attīrīšanas tehnoloģijas	16
1.3. Cieto daļiņu ietekme uz veselību	22
1.3.1. Cietās daļiņas Latvijā	26
1.4. Siltuma un masas apmaiņa	31
1.5. Siltuma un masas apmaiņas procesu modelēšana	34
1.5.1. Modeļu veidi, piemēri	34
Literatūras apskata secinājumi	39
2. Eksperimenti Miglas aparāta darbības analīzei	40
2.1. Miglas aparāta eksperimentālais stends	40
2.1.1. Cieto daļiņu mērījumu procedūra	46
2.1.2. Mēriekārtu pārbaude un kalibrācija	49
2.2. Eksperimenta īstenošana	50
3. Aprēķina modelis miglas aparāta darbības analīzei	58
3.1. Piliena pārvietošanās mitru gāzu plūsmā kondensācijas gadījumā	58
3.2. Piliena cieto daļiņu uztveršana	62
3.2.1. Siltuma un masas apmaiņa starp pilieniem un mitru piesārņotu gāzes plūsmu	65
3.3. Modeļa realizācijas algoritms	67
4. Rezultāti	72
4.1. Eksperimentālā stenda pārbaudes rezultāti	72
4.2. Miglas aparāta veiktspējas pārbaudes rezultāti	75
4.3. Aprēķina modeļa validācija	81
4.4. Optimizācija	84
Secinājumi	92
Izmantotā literatūra	94
Pielikumi	101

TABULU UN ATTĒLU SARAKSTS

2.1. tabula. Eksperimentos izmantoto instrumentu apkopojums.....	43
2.2. tabula. Galveno parametru izmaiņu diapazoni.....	51
2.3. tabula. Iegūtais ūdens spiediens pie dažādiem sprauslu izmēriem.....	52
2.4. tabula. Aprēķinātie pilienu diametri pie dažādām sprauslām un ūdens caurplūdēm.....	52
4.1. tabula. Eksperimentu rezultāti, ja granulu katla jauda ir 20 kW un izmantota sprausla MPL 1.51.....	72
4.2. tabula. Eksperimentu rezultāti, ja granulu katla jauda ir 20 kW un izmantota MPL 1.12.....	73
4.3. tabula. Eksperimentu rezultāti, ja granulu katla jauda ir 20 kW un izmantota MPL 0.77.....	74
4.4. tabula. MA sistēmas parametri pie dažādām katla jaudām.....	75
4.5. tabula. Galvenie izpētes parametri.....	81
4.6. tabula. Neatkarīgo mainīgo parametru vērtības.....	85
4.7. tabula. Eksperimenta plānošanas mainīgo matrica.....	86
4.8. tabula. Aprēķinātā MA jauda pie dažādiem režīmiem.....	87
4.9. tabula. Mainīgo intervāla un vidējās vērtības.....	88
4.10. tabula. Mainīgie lielumi bezdimensiju koordinātās.....	88
4.11. tabula. Mainīgo koeficientu vērtības.....	89
4.12. tabula. Faktoru izmaiņu soļi optimizācijā.....	90
4.13. tabula. Režīmi optimuma noteikšanai.....	90
1.1. att. Izplatītākās dūmgāzu emisiju samazināšanas tehnoloģijas.....	16
1.2. att. <i>PM</i> emisijas EEA 33 dalībvalstīs (2000.–2017.).....	24
1.3. att. Emisiju izmaiņas Latvijā laika posmā no 1990. līdz 2018. gadam.....	28
1.4. att. <i>PM</i> emisijas māsaimniecībās 2000.–2019. gadā.....	29
2.1. att. MA eksperimentālajā stendā.....	40
2.2. att. Pulpas tvertne MA sistēmā.....	41
2.3. att. Granulu katls <i>Grandeg Bio–25</i>	41
2.4. att. Dūmvads un mēriekārtu pieslēgumi pēc MA.....	42
2.5. att. MA eksperimentālā stenda shēma.....	43
2.6. att. Eksperimentālais stends laboratorijas apstākļos.....	45
2.7. att. Daļa no eksperimentos izmantotajām iekārtām.....	46
2.8. att. Cieto daļiņu mērīšanas iekārtas <i>Tecora Isostack G4</i> zondes uzgalis.....	47
2.9. att. Cieto daļiņu mērīšanas iekārta <i>Tecora Isostack G4</i>	49
2.10. att. Filtri ar dažādām cieto daļiņu koncentrācijām.....	49
2.11. att. Sprauslu testēšana.....	50
2.12. att. Eksperimentos izmantotās sprauslas.....	51
2.13. att. Sūkņa jauda pie dažādām sprauslām un iesmidzinātā ūdens daudzuma.....	54
2.14. att. <i>PM</i> koncentrācija pirms MA atkarībā no katla darbības laika.....	55
2.15. att. Salīdzinājums starp mērītajām un aprēķinātajām <i>PM</i> koncentrācijas vērtībām.....	56

2.16. att. Filtru masas izmaiņas (%) vides relatīvā mitruma satura izmaiņu ietekmē.....	56
3.1. att. Piliena kustību noteicošu spēku shēma.....	59
3.2. att. Piliena un <i>PM</i> savstarpējās saskares mehānismi.....	61
3.3 att. MA darbības shēma.....	62
3.4. att. Modeļa darbības princips MA shēmā.....	68
3.5. att. Modelētās iesmidzinātā ūdens temperatūras izmaiņas iekārtas augstumā.....	68
3.6. att. Izstrādātā modeļa aprēķina algoritms.....	69
4.1. att. No dūmvadā izvietotās cieto daļiņu mērījumu vietas novadītais ūdens.....	73
4.2. att. MA energoefektivitāte atkarībā no iesmidzinātā ūdens daudzuma, pie noteiktas skābekļa koncentrācijas dūmgāzēs.....	76
4.3. att. Dūmgāzu temperatūra pirms MA atkarībā no katla jaudas pie dažādām skābekļa koncentrācijām.....	77
4.4. att. MA jauda atkarībā dūmgāzu plūsmas.....	78
4.5. att. Dūmgāzu temperatūra pēc MA atkarībā no sākotnējā ūdens pilienu diametra.....	78
4.6. att. Iesmidzinātā ūdens daudzums atkarībā no ūdens pilienu diametra.....	79
4.7. att. <i>PM</i> samazinājums atkarībā no iesmidzinātā ūdens daudzums pie dažādām katla jaudām.....	79
4.8. att. Eksperimentos noteiktā un aprēķinātā iesmidzinātā ūdens temperatūra pēc MA.....	82
4.9. att. Sakarība starp eksperimentālo ūdens temperatūru un aprēķināto dūmgāzu temperatūru pēc MA.....	82
4.10. att. Eksperimentos noteiktās un aprēķinātās MA jaudas salīdzinājums.....	83
4.11. att. MA jaudas rezultātu atšķirība atkarībā no izmantotās sprauslas veida, iesmidzinātā ūdens daudzuma un temperatūras.....	84
4.12. att. MA jaudas izmaiņas stāvā kāpuma virzienā.....	91

APZĪMĒJUMI

q – katla jauda, kW;	u_r – piliena relatīvais ātrums attiecībā pret gāzi, m/s;
m_u – ūdens caurplūde caur katlu, m ³ /h;	u_t – piliena nogulsnešanās ātrums nekustīgā gāzē, m/s;
t_{urp} – temperatūra katla izejā, °C;	ρ_w – ūdens piliena blīvums, kg/m ³ ;
t_{atg} – temperatūra katla ieejā, °C;	ρ_g – mitru gāzu blīvums, kg/m ³ ;
D_2 – aprēķinātais piliena diametrs, μm ;	g – brīvas krišanas paātrinājums, m/s ² ;
D_1 – piliena diametrs pie atsauces spiediena, μm ;	C_D – vides pretestības koeficients;
P_2 – testos izmantotais ūdens spiediens, bar;	Stk – piliena Stoksa skaitlis;
P_1 – atsauces ūdens spiediens, bar;	ρ_p – cietās daļiņas blīvums, kg/m ³ ;
Q – miglas aparāta jauda, kW;	d_p – cietās daļiņas diametrs, m;
c_p – ūdens īpatnējā siltumietilpība, kJ/(kg · K);	C_c – Kanninghama labojuma faktors daļiņas izmēram;
G – iesmidzinātais ūdens daudzums, l/h;	μ_g – mitras gāzes dinamiskā viskozitāte, Pa · s;
O_2 – skābekļa koncentrācija dūmgāzēs, %;	m_g – mitro gāzu masas plūsma, kg/s;
t_{w1}, t_{w2} – iesmidzinātā ūdens temperatūra attiecīgi pirms MA un pēc MA, °C;	m_{dg} – sauso gāzu masas plūsma, kg/s;
H_1 – dūmgāzu entalpija pie t_{g1} , kJ/kg _{da} ;	m_v – ūdens tvaika masas plūsma, kg/s;
H_2 – dūmgāzu entalpija pie t_{g2} , kJ/kg _{da} ;	m_w – ūdens masas izmaiņas, kg/s;
L_{dg} – sausu dūmgāzu plūsma, kg _{da} /s;	H_d – aparāta aizpildījums ar pilieniem;
P – jauda, kW;	A – aparāta šķērsriezuma laukums, m ² ;
U – spriegums, V;	H – aparāta augstums, m;
I – Strāvas stiprums, A;	C_p _{iz} ; C_p _{ie} – cieto daļiņu koncentrācija aparāta izejā un ieejā, kg/m ³ ;
E – Elektroenerģijas patēriņš, kWh;	ΔC_p – cieto daļiņu samazinājums, %
t – Sūkņa darbības laiks, h;	V_g – mitru piesārņotu gāzu plūsma, m ³ /s;
β_p – masas pārneses koeficients parciālo spiedienu izmaiņu gadījumā, kmol/(N · s);	m_d – piliena masa, kg;
dZ – iekārtas elementa augstums, m;	η – aparāta cieto daļiņu attīrīšanas efektivitāte;
d_d – piliena diametrs, m;	m_{df} – piliena masas plūsma, kg/s;
H – aparāta augstums, m;	t_d – piliena temperatūra, °C;
M_v – tvaika molmasa, 18 kg/kmol;	Q_d – piliena siltums, J/s;
p^{sat} – piesātināta tvaika parciālais spiediens uz piliena, Pa;	Q_{ht} – siltuma apmaiņas siltums, J/s;
p_b – tvaika parciālais spiediens gāzes plūsmā, Pa;	Q_c – tvaika kondensācijas siltums, J/s;
t_s – pilienu piesātinājuma temperatūra, °C;	Q_p – cieto daļiņu siltums, J/s;
p – sistēmas pilnais spiediens, Pa;	α – siltuma pārejas koeficients no gāzes uz pilienu, W/(m ² · K);
ω – gāzu mitruma saturs, kg/kg _{dg} .	F_d – piliena virsmas laukums, m ² ;
p_{dg} – sausās gāzes parciālais spiediens, Pa;	t_g – gāzes temperatūra, °C;
p_{wv} – ūdens tvaiku parciālais spiediens, Pa;	r – ūdens fāzu pārejas siltums, kuru nosaka t_d temperatūrā, J/kg;
u_d – piliena ātrums aparātā, m/s;	
u_g – mitru gāzu plūsmas ātrums aparātā, m/s;	

c_{pv} – ūdens tvaika īpatnējā siltumietilpība, J/(kg · K);
 C_p – cieta daļiņu koncentrācija gāzē, kg/m³;
 c_{pp} – cieta daļiņu īpatnējā siltumietilpība, J/(kg · K);
 η_{de} – piliena cieta daļiņu uztveršanas efektivitāte;
 n_d – pilienu skaits aparātā laika vienībā, 1/s;
 d_{do} – iesmidzinātā ūdens pilienu sākuma diametrs, μm vai m;
 V_w – iesmidzinātā ūdens plūsma, m³/s;
 c_{pg} – gāzu īpatnējā siltumietilpība, J/(kg · K);
 V_d – piliena sākuma tilpums, m³;
 β_c – masas apmaiņas koeficients, m/s;
 Nu – Nuselta skaitlis;
 Sh – Šervuda skaitlis;
 Re – Reinoldsa skaitlis;
 Pr – Prandta skaitlis;
 Sc – Šmidta skaitlis;
 λ_g – gāzes siltumvadītspējas koeficients, W/(m · K);
 D_v – tvaika difūzijas koeficients, m²/s;
 μ_g – gāzes dinamiskā viskozitāte, kg/(m · s);
 ν_g – gāzes kinemātiskā viskozitāte, m²/s;
 n_{sk} – pielienu skaits iekārtā, 1/s;
 $\frac{dc_p}{dz}$ – cieta daļiņu koncentrācijas izmaiņas, kg/m³;
 $\frac{dd_d}{dz}$ – ūdens piliena diametra izmaiņas, m;

$\frac{dt_g}{dz}$ – dūmgāzu temperatūras izmaiņas, °C;
 $\frac{dt_w}{dz}$ – ūdens temperatūras izmaiņas, °C;
 $\frac{du_d}{dz}$ – piliena ātruma izmaiņas, m/s;
 $\frac{d\omega}{dz}$ – gāzes mitruma satura izmaiņas, kg/kg_{da}.
 η_{fu} – miglas aparāta efektivitāte, %;
 Q_{con} – sistēmā patērētais kurināmā enerģijas daudzums, kWh;
 ΔQ – atšķirība starp eksperimentālajām un aprēķinātajām miglas aparāta jaudām, %;
 $Q_{eksp.}$ – miglas aparāta jauda eksperimentos, kW;
 $Q_{apr.}$ – miglas aparāta jauda aprēķinos, kW;
 b_0 – brīvais loceklis;
 b_j, b_{uj}, b_{jj} – mainīgo parametru koeficienti;
 ϵ – gadījuma kļūda;
 Z_n – j-tais neatkarīgais mainīgais;
 Z_n^0 – punkts ar koordinātām līdz k;
 ΔZ_n – vērtību intervāls Z_n asij;
 b_n – n-tais koeficients;
 N – eksperimentu skaits;
 x_{ni} – katra eksperimenta mainīgais pie attiecīgā b koeficienta;
 y_i – atkarīgais mainīgais pie attiecīgā x;
 γ – proporcionalitātes koeficients optimizācijā;
 δ'_k – parametra izmaiņas solis optimizācijā.

IEVADS

Tēmas aktualitāte

Eiropas komiteja 2009. gadā atjaunoja Ekodizaina direktīvu (2009/125/EK), kas nosaka, ka visām enerģiju ražojošām un patērējošām iekārtām, tai skaitā arī degšanas iekārtām, ko izmanto apkures un siltā ūdens nodrošināšanai, jāievieš siltumnīcefekta gāzu emisijas mazinošas tehnoloģijas.

Ekodizaina direktīva nosaka vēlamu degšanas iekārtu energoefektivitāti un radīto emisiju daudzumu. Pasaules Veselības organizācija noteikusi arī pieļaujamo emisiju daudzumu robežvērtības diennaktij un gadam. To pārsniedzot, tiek radīts būtisks kaitējums cilvēku veselībai. Arī atsevišķas valstis savos normatīvos norāda dažādu emisiju robežvērtības, kas jāievēro gan uzņēmumiem, gan individuāliem emisiju ražotājiem. Konkrēti emisiju līmeņa rādītāji iekļauti arī starptautiska un vietēja mēroga likumdošanā. Visos šajos dokumentos uzmanība pievērsta gāzveida piesārņotājiem – oglekļa dioksīdam, slāpekļa oksīdiem, sēra oksīdiem, tvana gāzei, lielā daļā – arī tam, vai ir ieviesti rādītāji cieto daļiņu emisijām, vai plānots to darīt.

Cieto daļiņu emisijas ir pieaugoša problēma visā pasaulē ne tikai radītā piesārņojuma dēļ, bet arī tādēļ, ka pētījumos ir pierādīta saikne starp elpceļu, asinsvadu un sirds saslimšanu gadījumu pieaugumu, ja cilvēks ilgstoši ir pakļauts cieto daļiņu ietekmei. Galvenais cieto daļiņu avots ir mājsaimniecību sektors, kurā galvenokārt izmanto mazas jaudas cietā biokurināmā degšanas iekārtas.

Dūmgāzu attīrīšana pēc mazas jaudas degšanas iekārtām ir maz pētīta. Pagaidām izstrādātās tehnoloģijas ir ekonomiski neizdevīgas vai ar zemu efektivitāti. Siltuma un masas apmaiņas procesu modelēšana kondensatora iekšpusē ir maz pētīta, sīkāk modelēta iekārtas darbība sistēmā vai gāzveida piesārņotāju attīrīšanas efektivitāte, taču tieši cieto daļiņu attīrīšana pētījumos praktiski nav modelēta.

Promocijas darba gaitā izveidota un eksperimentāli pārbaudīta dūmgāzu attīrīšanas iekārta, kas papildus nodrošina arī siltuma atgūvi no dūmgāzēm un ir paredzēta lietošanai pēc mazas jaudas katliem, kas galvenokārt izmantoti mājsaimniecībās. Šādas iekārtas izmantošana būtiski samazina mājsaimniecību sektora radīto piesārņojumu. Papildus izstrādāts iekārtas siltuma un masas apmaiņas modelis ar pavadošo diferenciālvienādojumu sistēmu galveno parametru izmaiņu aprēķinam. Tajā veikta iekārtas attīrīšanas procesu modelēšana, kas sniedz iespēju paredzēt un teorētiski noteikt iekārtas efektivitāti, ņemot vērā attiecīgos sistēmas darbības parametrus, potenciāli paplašinot iekārtas lietojuma iespējas, izmantojot dažādus katlu un kurināmā veidus.

Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir mazas jaudas siltuma avota dūmgāzu attīrīšanas un siltuma atgūšanas iekārtas izveide, eksperimentāla un analītiska izpēte un darbības režīmu optimizācija.

Mērķa sasniegšanai īstenojamie uzdevumi:

- aprēķināt un izgatavot sīkpilienu dūmgāzu kondensatora jeb miglas aparāta (MA) iekārtu, veikt tās eksperimentālu izpēti;
- izstrādāt aparāta simulācijas modeli, izveidot tā aprēķina datorprogrammu;

- validēt MA modeli;
- veikt MA aparāta režīmu optimizāciju ar Boksa – Vilsona (*Box – Wilson*) metodi.

Hipotēze

Vai ir iespējams izveidot efektīvu cieto daļiņu uztveršanas un dūmgāzu siltuma atguves iekārtu mājsaimniecību siltuma avotiem.

Zinātniskā novitāte

Darbā aprakstīta jauna tipa kondensatoru tehnoloģija mazas jaudas katliem mājsaimniecībās mitru dūmgāzu attīrīšanai no cietajām daļiņām – miglas aparāts. Šajā iekārtā paralēli dūmgāzu attīrīšanai norit arī latentā siltuma atgūšana no tām. Dūmgāzu dzesēšana un attīrīšana norit ar īpaši mazu pilienu palīdzību, to diametri nepārsniedz 800 μm. Iekārtas analīzei izstrādāts siltuma un masas apmaiņu raksturojošs aprēķina modelis, izmantojot brīvpieejas programmēšanas valodu *Python*. Šis ir pirmais aprēķina modelis, kas aplūko parametru izmaiņas kondensatora iekšpusē – iekārtas augstumā, ja siltuma un masas apmaiņas procesos piedalās arī cietās daļiņas. Modelis pārbaudīts pie 10 kW līdz 20 kW katla jaudas, izmantojot koksnes granulas.



1. attēls. Darba realizācijas algoritms.

Galvenie darba izstrādes posmi ir iekārtas izstrāde un pārbaude, ieskaitot primāros eksperimentus sistēmas sastāvdaļu pārbaudei. Pēc šī posma izvēlēta atbilstošākā sprausla, iesmidzinātā ūdens daudzums, temperatūra. Eksperimentu plānošana un īstenošana miglas aparāta pārbaudei pie dažādiem sistēmas darbības parametriem. Matemātiskā modeļa izstrāde iekārtas darbības raksturošanai. Eksperimentos iegūto un ar modeli aprēķināto datu analīze. Rezultātu apstrāde un analīzes posms ietver arī modeļa validāciju un optimālo parametru atrašanu miglas aparāta izmantošanai koksnes granulu katla sistēmā.

Praktiskā novitāte

Darba gaitā izstrādāta un eksperimentāli pārbaudīta jauna dūmgāzu attīrīšanas iekārta mājsaimniecību apkures katliem. Iekārtas darbības analīzei izstrādāts aprēķina modelis, kas

ietver diferenciālvienādojumu sistēmu galveno sistēmas parametru – iesmidzinātā ūdens pilienu diametru, ātruma, dūmgāzu temperatūru, iesmidzinātā ūdens temperatūru, cieto daļiņu koncentrāciju un gāzu mitruma satura izmaiņu – aprēķinam. Modelis ir validēts ar eksperimentālajiem datiem un ir ar augstu ticamības līmeni, rezultātu atšķirība līdz 10 %. Veikta iekārtas analīze pie dažādām katlu jaudām, piedāvājot izdevīgākos darbināšanas variantus, augstākas iekārtas efektivitātes sasniegšanai reālos apstākļos.

Darbā iegūtos rezultātus var izmantot likumdošanas izstrādātāji un pieņēmēji, lai nodrošinātu dūmgāzu attīrīšanas iekārtu izmantošanas aktualizēšanu un ieviestu prasības to uzstādīšanai, īpaši māsaimniecībās. Industrijai ir iespēja izmantot iegūtās zināšanas un rezultātus miglas aparāta un tam līdzīgu iekārtu ražošanai. Pašvaldību un valsts līmenī ir iespēja attīstīt gaisa kvalitātes kontroli, rosinot un, sniedzot atbalstu iedzīvotājiem, dūmgāzu attīrīšanas iekārtu uzstādīšanai.

Pētījuma aprobācija

Promocijas darba pētījuma rezultāti ir prezentēti piecās starptautiskās zinātniskās konferencēs.

1. Priedniece V., Veidenbergs I., Blumberga D., Mathematical model of the fog unit, International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT 2018), Latvia
2. Priedniece, V., Kirsanovs, V., Dzikēvičs, M., Vīgants, Ģ., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Laboratory Research of the Flue Gas Condenser – Fog Unit, 10th International Conference on Applied Energy (ICAE2018), 22–25 August 2018, Hong Kong, China
3. Priedniece V., Kalniņš, E., Kirsanovs, V., Dzikēvičs M., Veidenbergs, I., Blumberga, D., Sprayed water flowrate, temperature and drop size effects on small capacity flue gas condenser's performance, International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT 2019), Latvia
4. Priedniece, V., Kalnins, E., Kirsanovs, V., Pedisius N., Vīgants, Ģ., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Particulate Matter Emission Decrease Possibility from Household Sector using Flue Gas Condenser – Fog Unit. Analysis and Interpretation of Results., International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT 2019), Latvia
5. Priedniece, V., Kirsanovs, V., Prodanuks T., Veidenbergs, I., Blumberga, D., Treatment of particulate matter pollution: people's attitude and readiness to act, International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT 2020), Latvia, Zoom platform

Promocijas darba pētījuma rezultāti ir atspoguļoti deviņās starptautiskās zinātniskās publikācijās, ar promocijas darbu saistīta apakšnodala ir iekļauta zinātniskajā monogrāfijā.

1. Seļivanovs, J., Vīgants, E., Priedniece, V., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Flue Gas Treatment Multi-Criteria Analysis. *Energy Procedia*, Elsevier, 2017, 379.–385.lpp. ISSN 1876–6102. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2017.09.056
2. Priedniece, V., Kirsanovs, V., Dzikēvičs, M., Vīgants, Ģ., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Laboratory Research of the Flue Gas Condenser – Fog Unit. *Energy Procedia*, 2018, Vol.147, 482.– 487.lpp. ISSN 1876–6102. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2018.07.056

3. Priedniece, V., Kirsanovs, V., Dzikēvičs, M., Vīgants, Ģ., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Experimental and Analytical Study of the Flue Gas Condenser – Fog Unit. *Energy Procedia*, 2019, Vol. 158, 822. – 827.lpp. ISSN 1876–6102. Pieejams: doi:10.1016/j.egypro.2019.01.215
4. Priedniece, V., Kalnins, E., Kirsanovs, V., Pedisius N., Vīgants, Ģ., Veidenbergs, I., Blumberga, D. Particulate Matter Emission Decrease Possibility from Household Sector using Flue Gas Condenser – Fog Unit. Analysis and Interpretation of Results. *Environmental and Climate Technologies*, 2019, Vol. 23, Issue 1, 135. – 151.lpp., ISSN 2255–8837. Pieejams: doi.org/10.2478/rtuect–2019–0010
5. Priedniece V., Kalniņš, E., Kirsanovs, V., Dzikēvičs M., Veidenbergs, I., Blumberga, D., Sprayed water flowrate, temperature and drop size effects on small capacity flue gas condenser’s performance, *Environmental and Climate Technologies*, 2019, Vol. 23: Issue 3, 333 – 346.lpp. Pieejams: <https://doi.org/10.2478/rtuect-2019-0099>
6. Blumberga D., Priedniece V., Rumba R., Kirsanovs V., Ņikitenko A., Lavendelis E., Veidenbergs I., Mathematical Modeling of Heat and Mass Processes in a Scrubber: The Box–Wilson Optimization Method, *Energies*, Volume 13, Issue 9. Pieejams: <https://doi.org/10.3390/en13092170>
7. Kirsanovs, V., Priedniece, V., Kalniņš, E., Veidenbergs, I., Blumberga, D., Innovative Scrubber Technology Model for Domestic Boiler Application, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2020, Pieejams: <https://doi-org.resursi.rtu.lv/10.1007/s40095-020-00347-z>
8. Kirsanovs, V., Priedniece, V., Kalniņš, E., Veidenbergs, I., Blumberga, D., Small Scale Pellet Boiler Gas Treatment in Fog Unit, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2020. Pieejams: <https://doi-org.resursi.rtu.lv/10.1007/s40095-020-00357-x>
9. Priedniece, V., Kirsanovs, V., Prodanuks T., Veidenbergs, I., Blumberga, D., Treatment of particulate matter pollution: people’s attitude and readiness to act, *Environmental and Climate Technologies*, 2020, 24 (2), pp. 231 – 246. Pieejams: <https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0069>
- Barisa, A., Blumberga, A., Blumberga, D., Grāvelsiņš, A., Gušča, J., Lauka, D., Kārklīņa, I., Muižniece, I., Pakere, I., Priedniece, V., Romagnoli, F., Rošā, M., Seļivanovs, J., Soloha, R., Veidenbergs, I., Vīgants, E., Vīgants, Ģ., Ziemele, J. *Energosistēmu analīze un modelēšana*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2018. 144 lpp. ISBN 978-9934-22-037-1.

1. LITERATŪRAS APSKATS

1.1. Mājsaimniecībās izmantotais kurināmais, degšanas iekārtas

Var izšķirt fosilo jeb neatjaunojamo kurināmo un atjaunojamo kurināmo. Lai samazinātu CO₂ emisijas atmosfērā, kas jau šobrīd pārsniedz 415 ppm [1] un samazinātu kurināmā ietekmi uz vidi, pasaules valstis izstrādā dažādus emisiju samazināšanas plānus un projektus, kā arī veicina tehnoloģiju attīstību un pāreju uz dabīgas izcelsmes kurināmo.

Augot atbalstam atjaunojamās enerģijas ieviešanai, kopā ar augstajām fosilā kurināmā cenām un rūpēm par vidi, aug arī pieprasījums koksnes granulu izmantošanai. Par spīti straujam koksnes granulu izmantošanas pieaugumam, to atbilstībai un lietderībai mājsaimniecībās pievērsta maza uzmanība, salīdzinot ar citām atjaunojamās enerģijas siltumapgādes tehnoloģijām vai komerciāli pieejamajiem biomasas izmantošanas risinājumiem siltumapgādē (siltumsūkņiem un saules enerģijas sistēmām) [2].

Vietējā mērogā ražotas un izmantotas koksnes granulas palīdz veicināt vietējās ekonomikas attīstību, kā arī nodrošina papildus darba vietas. Enerģijas izmaksas ir noteicošas, izvēloties koksnes granulas siltumapgādei. Koksnes granulu katli ir piemērots aizvietotājs eļļas kurināmā sistēmām, jo tās var sasniegt 80 °C temperatūru ūdenim. Ja koksnes granulu katlus izmanto kombinācijā ar grīdu apsildi, sistēma var nodrošināt komfortablu vidi, kas veicina cilvēka veselību un labklājību. Ja koksni iegūst no ekoloģiski apdraudētām teritorijām, tā var radīt nevēlamu ietekmi uz vidi, piemēram, ūdenstilpņu degradāciju. Ja granulas ražo citā vietā un pārved lielos attālumos, ietekme uz vidi no transporta var atsvērt ieguvumus. Koksnes granulu glabātuves izveidē jāņem vērā sekojošo problēmu novēršana: mitruma uzkrāšanās, uzsilšana un pašaiždedze, gāzu veidošanās un skābekļa trūkums, putekļu veidošanās. Ja granulas samirkst un uzbriest, tās vairs nav izmantojamas un ir ar potenciāli augstām bojājumu izmaksām [2].

Piegādātās granulas var saturēt nevēlamus piejaukumus, piemēram, smilšu daļiņas. Smilšu daļiņas var saķept degšanas laikā un palielināt kurināmā radīto pelnu daudzumu. Saķepušus pelnus (izdedžus) ir grūti atdalīt, un tie samazina iekārtas energoefektivitāti. Lai izvairītos no izdedžu veidošanās degļa tuvumā, nepieciešama augsta pelnu kušanas temperatūra (vismaz 1300 °C). Attiecībā uz granulu piesārņojuma radītājam problēmām, piegādātājam un granulu ražotājam jāvienojas par nosacījumiem, kas nosaka granulu izejvielu kvalitāti. Viens no kvalitāti raksturojošiem parametriem granulām ir tilpuma blīvums. Ievērojamas izmaiņas tilpuma blīvumā var novest pie iekārtas darbināšanas traucējumiem [3].

Mājsaimniecību līmenī galvenā problēma ar koksnes granulu katliem ir – tie ir darbietilpīgi, ar papildus apkopēm, salīdzinot ar gāzes katliem: granulu papildināšana, kurtuves tīrīšana no pelniem un izdedžiem, dūmvadu un pelnu krātuves, kurtuves logu tīrīšana. Koksnes katliem nepieciešama tīrīšana līdz pat reizei nedēļā, lai novērstu efektivitātes zudumus, kā arī oglekļa monoksīda līmeni samazinātas gaisa padeves rezultātā [2].

Pastāv trīs degļu veidi, kurus izmanto granulu katlos: no apakšas darbināmie, horizontāli darbināmie degļi un no augšas darbināmie degļi. Ja deglis ir nepareizi pieregulēts, var veidoties nepilnīgas degšanas apstākļi. Granulu degļus iespējams ieviest vecos katlos, taču nepareiza degļa un katla kombinācija var novest pie paaugstinātiem siltuma zudumiem. Ja izvēlētajām granulām ir papildus piejaukumi, sagaidāms augstāks pelnu saturs [3].

Galvenais veselības risks koksnes granulu lietotājiem ir atbilstošas ventilācijas trūkums, kad novērojama oglekļa monoksīda uzkrāšanās un būtisks skābekļa līmeņa kritums granulu glabātuvē. Granulu sairšana var novest pie paaugstināta putekļu daudzuma gaisā, granulas var sadalīties sēnīšu infekcijas dēļ, radot gaisā peldošas sēņu sporas un toksīnus, kas var radīt kairinājumu elpceļu sistēmā, alerģiskas reakcijas un karinājumu acīm. Cits potenciālais veselības risks ir saistīts ar ilgstošu pakļautību cietajām daļiņām dūmgāzēs [2].

Galvenās priekšrocības koksnes granulu katlu izmantošanai mājsaimniecībās iekļauj: samazinātas CO₂ emisijas, salīdzinot ar fosilā kurināmā degšanu; siltuma ražošanas izmaksu samazinājumu; paaugstinātu komfortu; tehnoloģijas daudzpusību; iespēju kontrolēt budžetu, pērkot mazas granulu pakas pēc vajadzības. Kapitālizmaksas, kas saistītas ar koksnes granulu izmantošanu siltumapgādē, ir galvenais tehnoloģijas izmantošanas šķērslis, tāpat kā izmaiņu veikšanas nepieciešamība īpašumā. Pastāvošā sociālā situācija arī var būt nozīmīga robeža pārejai uz atjaunojamās siltumenerģijas tehnoloģijām [2].

Dzīves cikla analīze uzrāda koksnes kurināmā katlu sniegtos ieguvumus videi un klimatam, salīdzinot, piemēram, ar uz eļļu balstītām apkures sistēmām. Malkas katlu aizvietošana ar granulu katliem var radīt emisiju samazinājumu, jo granulu katlos izmanto tīrāku kurināmo [4]. Degšanas tehnoloģiju radīto cieto daļiņu (*particulate matter* – *PM*) emisiju koncentrāciju sarindojums izskatās sekojoši (no augstākā uz zemāko): kamīns > tradicionālā plīts > jaunākās mājsaimniecību plītis un individuālās mājas katli > automātiskie individuālie katli un 50–100 kW katli > 1–50 MW vidējas jaudas katli [5].

Šķelda ir pasaulē plaši pazīstams koksnes kurināmā veids, kuru izmanto galvenokārt lielas jaudas enerģijas ražošanas iekārtās. Šis kurināmais nav nekaitīgs videi, jo degšanas procesa laikā atmosfērā tiek izvadītas tādas emisijas, kā slāpekļa oksīdi (NO_x), gaistošie organiskie savienojumi (*GOS*) un *PM* (ar izmēriem līdz 10 μm jeb *PM*₁₀). Ziemas laikā koksnes dedzināšana ir liels *PM* emisiju avots arī lielajās pilsētās, kā Parīzē, Londonā vai Berlīnē, ar *PM*_{2,5} koncentrāciju, kas salīdzināma ar sastrēgumu laikā radīto emisiju daudzumu [6].

Visi biomasas izcelsmes kurināmā veidi satur tādus ķīmiskos elementus kā slāpekli (N), fosforu (P) un kāliju (K), kalciju (Ca), magniju (Mg), nātriju (Na), silīciju (Si). Dažos biomasas kurināmā veidos sastopams arī mangāns (Mn), dzelzs (Fe), molibdēns (Mo), varš (Cu) un cinks (Zn). Elementu sastopamību un koncentrāciju kurināmajā nosaka biomasas augšanas apstākļi un ieguves laiks. No šiem parametriem atkarīgs, piemēram, arī hlora (Cl) saturs konkrētajā biomasā. Neorganiskie elementi ir īpaši nozīmīgi biomasas kurināmā pētījumos, jo tie var radīt papildus riskus iekārtām: nogulšņu, izdedžu veidošanos, koroziju, aizsērējumus [7]. Kālija emisijas faktori mainās atkarībā no degšanas apstākļiem. Koksnes biomasas dedzināšana modernās mazas jaudas iekārtās (modernās malkas krāsnis ar sekundārā gaisa un automātisko gaisa padevi, un granulu katli) nodrošina atbilstošus apstākļus augstākās temperatūrās, pietiekamu skābekļa padevi un pietiekamu degošo gāzu un gaisa sajaukšanos kurtuvē [8].

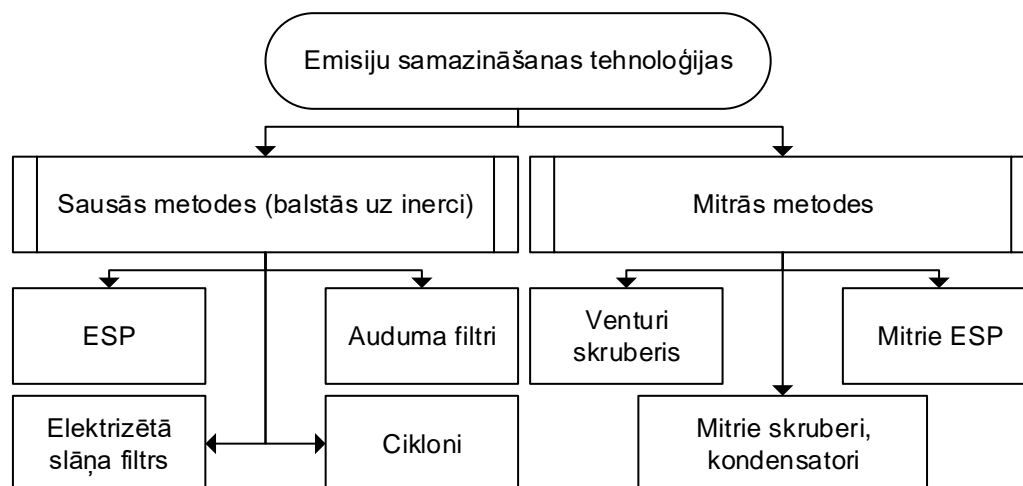
Salīdzinoši zemais mazas jaudas (mikroģenerācijas) tehnoloģiju pieaugums liecina, ka māju īpašnieku vēlme maksāt ir krietni zemāka nekā esošās tirgus cenas, radot nozīmīgu izaicinājumu politikas veidotājiem un mārketinga speciālistiem. Mikroģenerācija var ieņemt nozīmīgu lomu CO₂ emisiju samazināšanā, samazinot atkarību no fosilā kurināmā, un līdzsvarojot enerģijas izmaksas. Nozīmīgs rīks mikroģenerācijas plusu izplatīšanai ir “no mutes mutē”, kas rada pozitīvu sociālo spiedienu un var novest pie augstākas vēlmes maksāt [9].

1.2. Dūmgāzu attīrīšanas tehnoloģijas

Vienīgais likumdošanas dokuments, kas paredz emisiju samazināšanas pasākumus mazas jaudas degšanas iekārtām, ir Eiropas Parlamenta un Padomes direktīva 2009/125/EK, ar ko izveido sistēmu, lai noteiktu ekodizaina prasības ar enerģiju saistītiem ražojumiem [10], un saistošie Latvijas Republikas (LR) Ministru kabineta (MK) noteikumi Nr. 941 “Noteikumi par ekodizaina prasībām ar enerģiju saistītām precēm (produktiem)” [11]. Ekodizaina direktīvas nosacījumi mājražotniecībā paredz, ka:

- katliem ar automātisko kurināmā padevi *PM* emisijas apkures sezonā nedrīkst pārsniegt 40 mg/m^3 , katliem ar manuālo kurināmā padevi – 60 mg/m^3 ;
- sezonālā telpu apsildes efektivitāte katliem ar jaudu līdz 20 kW (ieskaitot) nedrīkst būt zemāka par 75 %;
- sezonālā telpu apsildes efektivitāte katliem ar jaudu virs 20 kW nedrīkst būt zemāka par 77 % [10].

Mazas jaudas iekārtām aktuāli emisiju samazināšanas tehnoloģiju meklējumi un izveide. Lai novērstu kaitīgu emisiju veidošanos vai samazinātu to ietekmi uz vidi, izmanto dažādas emisiju samazināšanas metodes un tehnoloģijas.



1.1. att. Izplatītākās dūmgāzu emisiju samazināšanas tehnoloģijas [12], [13].

Elektrostatiskais putekļu nogulsētājs (*electrostatic precipitator - ESP*) nodrošina visefektīvāko attīrīšanu no daļiņām ar izmēru lielāku par $10 \mu\text{m}$ ($\eta \approx 99,5 \%$), auduma filtri – visefektīvākā attīrīšana no *PM* ar izmēru līdz $1 \mu\text{m}$ ($\eta \approx 100 \%$), elektrizētā slāņa filtrs parasti izmanto granti vai smiltis, savukārt cikloni nodrošina visefektīvāko attīrīšanu no *PM* ar izmēriem, sākot no $10 \mu\text{m}$. Savukārt Venturi skruberis nodrošina visefektīvāko attīrīšanu no *PM* ar izmēriem sākot no $3 \mu\text{m}$, citas mitrās dūmgāzu attīrīšanas tehnoloģijas ir ar mainīgu attīrīšanas efektivitāti un ietver mitros *ESP* un dažādus mitros skruberus, kondensatorus [12], [13].

Lielākā daļa no šīm tehnoloģijām nav izdevīgas lietošanai mazas jaudas iekārtās, tādēļ nepieciešams izveidot jaunas tehnoloģijas vai ieviest esošo tehnoloģiju uzlabojumus, kas padarītu tās finansiāli izdevīgas arī šajā gadījumā. Daudzām tehnoloģijām iekārtu efektivitāti nosaka ar *PM* emisiju koncentrācijas mērījumiem no konkrēta avota pirms un pēc attīrīšanas. Emisiju noteikšanai var izmantot dažādas metodes, kas atrodamas starptautiski izstrādātos standartos vai literatūras avotos. Metodes savā starpā atšķiras ar to, ka dūmgāzes var izkliedēt

un atdzesēt pirms uztveršanas, vai arī mērīt tās tieši plūsmā. Lielāko daļu no *PM* emisijām (līdz 90 %) veido policikliskie aromātiskie ogļūdeņraži [13], [14].

Gāzes–šķidrums atdalīšanas iekārtas veidotas ar mērķi nodrošināt augstāko fāžu atdalīšanas efektivitāti. Uz saskares virsmas veidotie pilieni atkrīt atpakaļ ūdens plūsmā vai tiek izvadīti ar aizejošo plūsmu, atkarībā no pilienu izmēra un sākotnējās inerces. Apgrieztais efekts var radīt cauruļu sistēmas bojājumus maisījumā esošo sāļu dēļ. Efektu novērst pilnībā nav iespējams, tādēļ nepieciešams pievērst īpašu uzmanību dūmgāzu attīrīšanas iekārtu dizainam, lai vairāk kontrolētu apgriezto efektu ietekmējošos parametrus: plūsmu ātrumus, kas ietekmē turbulences uzvedību uz saskares virsmas, pilienu dinamiku abpus virsmai, pilienu veidošanās vadošos mehānismus [15].

Emisiju samazināšanai no degšanas procesiem izdala primārās un sekundārās tehnoloģijas. Primāro tehnoloģiju uzsvars ir uz kurināmā kvalitāti un kurtuvju, katlu uzbūvi, savukārt sekundārās tehnoloģijas koncentrējas uz dūmgāzu apstrādi un attīrīšanu. Pie sekundārajām tehnoloģijām var pieskaitīt elektrostātiskos, katalītiskos filtrus, ciklonus, kas galvenokārt nodrošina *PM* samazinājumu dūmgāzēs [16].

Lai noteiktu jebkuras emisiju samazināšanas tehnoloģijas efektivitāti, emisijas pareizi jānovērtē. Šis ir sarežģīts uzdevums, jo pieejamas dažādas *PM* testēšanas un paraugu ņemšanas metodes. Dažās no metodēm dūmgāzes ir jāšķīdina un jāatdzesē pirms *PM* paraugu ņemšanas, lai gan praksē atrodami gadījumi, kuros atšķaidīšana nav veikta. Atšķirīga metode var uzrādīt mazāku *PM* emisiju daudzumu un atcelt vajadzību pēc attīrīšanas sistēmas, lai gan realitātē gaisā joprojām tiek izvadīts būtisks *PM* daudzums. Tāpat arī plašais metožu klāsts var novest pie savstarpēji grūti salīdzināmiem rezultātiem [13].

PM samazināšanai aplūkoti dažādi katalizatori. Hukanens (*Hukkanen*) u. c., autori savā pētījumā izstrādāja katalītisko sistēmu, kas sastāv no trim stieplu tīklu līmeņiem, kas noklāti ar platīnu un palādiju. Rezultāti uzrāda, ka, izmantojot katalizatorus, skābekļa daudzums dūmgāzēs samazinājās no 6 uz 3 %, jo lielāks skābekļa daudzums tika patērēts oglekļa savienojumu oksidācijai, kas savukārt paaugstināja dūmgāzu temperatūras no 300 līdz pat 700 °C. Gaistošie organiskie savienojumi samazināti par 1–4 mg/m³, tādējādi samazinot organisko tvaiku kondensāciju uz *PM* virsmas, samazinot kopējo *PM* koncentrāciju no 650 mg/MJ uz 350 mg/MJ no ievadītā kurināmā daudzuma. Metodes problēma ir katalizatoru aizsprostojums ar izdedžiem, darvu un *PM* [17].

Cikloni ir *PM* un gāzu atdalīšanas iekārta, ar plašu pielietojumu tieši dūmgāzu un citu izplūdes gāzu attīrīšanai. Visefektīvākā darbība iekārtām novērojama pie augstas temperatūras un spiediena. Šajā gadījumā no dūmgāzēm atdala *PM* ar izmēriem līdz 2 μm, kas padara iekārtu ekonomiski izdevīgu lietošanai ražošanas nozarē. Ciklonu darbība ir atkarīga no *PM* masas un to diametra. Iekārtas darbības pamatā ir centrālās spēks, kas rada rotāciju, ar kuras palīdzību daļiņas atdala no dūmgāzēm un novada uz uzkrāšanas tvertni. Iekārtas *PM* attīrīšanas efektivitāte ir atkarīga no daļiņu izmēriem, sasniedzot 70 % pie 5 μm lielām daļiņām. Samazinoties daļiņu izmēram, samazinās arī attīrīšanas efektivitāte [18].

Elektrostātisko nogulsnetāju darbības pamatā ir elektriskie spēki, kas atdala *PM* no dūmgāzu plūsmas. Uz daļiņām iedarbojas ar elektrisko lādiņu, ko rada iekārtas sienīnās iestrādāti elektrodi. Nogulsnetājus plaši izmanto kā piesārņojuma uzraudzības sistēmas, kurām raksturīga augsta efektivitāte un termiskā izturība. Galvenais trūkums elektrostātiskajam nogulsnetājam ir vāja izturība pret hlorīdiem, kas dūmgāzēs var būt lielā daudzumā [18].

Mitrs elektrostatisks nogulsnetājs ir līdzīgs tradicionālajam, ar uzlabotu izturību pret visa veida daļiņām, kas var būt dūmgāzēs. Tajā *PM* uztver ūdens, ar kuru kopā tās aizvada no uztveršanas plāksnēm. Šis uzlabojums nodrošina augstu iekārtas efektivitāti. Iekārtas membrānās izmanto elektrodus, kurus gatavo no silikona vai oglekļa šķiedrām. Elektrodi nodrošina ūdens vienmērīgu izkliedi uz membrānu šķiedrām, kas savukārt nodrošina efektivitāti, samazinot ūdens patēriņu un saglabājot nepārtrauktu elektrisko lauku [18].

Vispārējai emisiju samazināšanai no dūmgāzēm var izmantot zemu emisiju procesu, kas ietver sešus dūmgāzu attīrīšanas posmus: elektrostatisko nogulsnešanu, ozona oksidāciju, kaļķa ģipša slapjo desulfurizāciju, mitro denitrifikāciju, kondensāta sausināšanu un mitro elektrostatisko nogulsnešanu. *PM* atdalīšanu nodrošina pirmais un pēdējais attīrīšanas posms, sasniedzot kopējo *PM* attīrīšanas efektivitāti 96,55 % [19].

Auduma filtri ir dūmgāzu attīrīšanas tehnoloģija ar augstu efektivitāti, taču tos vislabāk izmantot sausu dūmgāzu attīrīšanai. Tehnoloģijas galvenā priekšrocība ir tas, ka attīrīšana nav atkarīga no daļiņu izmēriem, kā arī tā spēj atdalīt no dūmgāzēm arī gāzveida piejaukumus. Literatūrā aprakstīti arī modificētie filtri – elektrizēti dažādu materiālu filtri, lai novērstu tehnoloģijas trūkumus un sasniegtu efektivitāti līdz pat 99,97 % [18].

Porainie filtri nodrošina daļiņu uztveršanu ar izslēgšanas metodi, t. i., filtra poru izmērs ir mazāks nekā atdalāmo daļiņu izmērs. Filtru porainība ir mazāka par 30 %, taču tie nodrošina augstu atdalīšanas efektivitāti. Galvenie metodes trūkumi ir augstās izmaksas un efektivitātes kritums pie mazāka izmēra cietajām daļiņām, augsts spiediena kritums uz filtra virsmas, kuru iespējams strauji paaugstināt, ja *PM* pielīp pie porām [20].

Viena no hibrīdsistēmām, kas izstrādāta efektīvākai dūmgāzu attīrīšanai, ir veidota no burbuļu kolonnas reaktora un izsmidzināšanas posma. Iekārtas darbināšanas laikā pārsvars ir smidzināšanas posmam. Augsta efektivitāte *PM* uztveršanai panākta pie mazām šķidrums un gāzu attiecībām, taču kopējo iekārtas lietderību var noteikt pēc katra individuālā posma. No tehniskā, ekonomiskā un vides aspektu izvērtējuma puses, izveidotā hibrīdsistēma ir labāka nekā esošās *PM* uztveršanas metodes [21]. Pie citām hibrīda vai uzlabotajām sistēmām var minēt savācošo ventilatoru, elektrociklonu (ciklons ar elektrodu uz ass), ciklonu ar rotējošo skruberi, konusu un plāksnēm. Hibrīdmetodes, kas apvieno dažādas attīrīšanas tehnoloģijas, pētījumos ir pierādījušas efektīvākas nekā atsevišķās metodes [18].

Attīrīto daļiņu izmēru sadalījums ir atkarīgs no to avota. Pilieni uztver *PM* tiešu un netiešu sadursmju rezultātā, difūzijas veidā, ar elektrostatisko pievilksanos, kondensāciju, centrālās spēku mijiedarbības un gravitācijas spēka iedarbības dēļ. Mazākas daļiņas (< 0,1 μm) dūmgāzu plūsmā atrodas Brauna kustībā (siltuma izraisīta haotiska pārvietošanās). Haotiskā daļiņu kustība var izraisīt daļiņu sadursmes ar pilieniem un to pielipšanu pie iekārtas sienām. Difūzija ir vislabākā metode šo īpaši mazo daļiņu uztveršanai. Lielākām daļiņām sadursmes un difūzijas norise ir līdzīga, neviena no metodēm nedominē [22].

Kondensatori ir pielīdzināmi siltummaiņiem, kuros norit siltuma apmaiņa piespiedu konvekcijas izraisītas kondensācijas rezultātā. Ar gaisu dzesējamo tvaika kondensatoru efektivitāti būtiski ietekmē gaisa koncentrācija procesa laikā, kopējā tvaika un gaisa maisījumā iekārtā. Pieaugot iekārtai pievadītajam gaisa daudzumam, palielinās starpība starp spiedieniem un temperatūrām kondensatorā. Kad iekārtai pievadīts mazs gaisa daudzums, samazinās siltuma apmaiņas koeficients kondensatora cauruļu rindās [23].

Ar gaisu dzesējami tvaika kondensatori ir tehnoloģija ar augošu pieprasījumu enerģētikas nozarē. Tvaika plūsmas analīzei iekārtā, pētījumā [24] izveidots matemātisks simulācijas modelis, kas apvieno plūsmas dinamikas attēlošanu datorā, ar matemātiskām un analītiskām metodēm. Modelis piemērots esošām sistēmām, zudumu analīzei un uzkrāto nekondensējamo gāzu daudzuma noteikšanai. Tā var kalpot arī kā papildus rīks iekārtas efektivitātes problēmu atrašanai. Pirmie metodes eksperimentu rezultāti parādījuši, ka tvaika plūsmu galvenokārt nosaka kondensatora sākuma posms, kas var izraisīt nevienmērīgu plūsmas sadalījumu pārējās iekārtas daļās, kā arī daļu no tvaika plūsmas novirzīt pretplūsmā. Lai novērstu pretplūsmas veidošanos, nepieciešams pievadīt papildus tvaiku [24].

Ūdenim mijiedarbojoties ar dūmgāzēm, norit to attīrīšana un dzesēšana. Iesmidzinātais ūdens var veidot dažādas formas, kas rada fāzu saskares virsmas: aerosolus, individuālus pilienus, ūdens masīvus. Aerosolus veido smalki pilieni, ar diametru 0,04–0,4 mm, individuālie pilieni ir robežās no 1,5 mm līdz 2,5 mm, savukārt masīvi ir 22–33 mm izmērā. Dūmgāzu temperatūras samazinājums, mijiedarbībā ar šķidrums, parasti ir starp 15 un 140 K. Gāzu uzturēšanās laiks zemas temperatūras pilienu zonā ir no 3 līdz 30 sekundēm. Dūmgāzu dzesēšanu ietekmē sekojoši faktori: pilienu sākotnējais diametrs, iesmidzinātā ūdens temperatūra, dūmgāzu plūsmas ātrums, pilienu koncentrācija tilpumā, dūmgāzu temperatūra. Iesmidzinātā ūdens sildīšana veicina iztvaikošanu un var paaugstināt ūdens uzņemto enerģijas daudzumu, samazinot dūmgāzu dzesēšanu. Šis efekts ir izteikti novērojams pie zemākām dūmgāzu temperatūrām, to pastiprina pilienu izmēra un koncentrācijas pieaugums [25].

Praksē izmantojamie mitrie skruberi iedalāmi šķidrās – izkliedētās un gāzes – izkliedētās sistēmās. Šāda veida skruberiem ir nozīmīga priekšrocība – tie spēj attīrīt gan gāzveida, gan PM piemaisījumus. Tradicionālajos mitro skruberu veidos (burbuļveida, viena vai vairāku posmu pildītās kolonnās) izmanto smidzinātāju plāksnes, kas līdzīgi kā pildījumi, rada PM uztveršanas problēmas un spiediena izmaiņas reālās situācijās. Iekārtu efektivitāte ir atkarīga no enerģijas sadalījuma, mehāniskās uzbūves, ūdens līmeņa smidzinātajos, gāzu un ūdens plūsmu ātrumiem. Skruberu efektivitāte, atkarībā no tipa, ir robežās no 42 % līdz 95,6 % daļiņu ar izmēriem līdz 1,5 μm attīrīšanai [22], [26], [27].

Mitrajos skruberos, absorbentu iesmidzina tieši dūmgāzēs. Gāzes, saskarē ar šķidrums, uztver un izkliedē vidē, kā rezultātā var veidoties dažādi efekti: šķidruma plēvītes, mitrās sienas, burbuļi un pilieni. Vienkāršākais mitrā skruberu veids ir smidzināšanas tornis. Tajā gāzes, kopā ar sastāvā esošajām PM, nonāk nodalījumā, kur veidojas saskare ar izsmidzināšanas sprauslu radītu ūdens strūklu. Ūdens strūklu iespējams virzīt divos veidos: pretēji vai perpendikulāri gāzes plūsmai. Pilieni, kuri savos izmēros ir pietiekami lieli, lai gravitācijas spēka ietekmē nosēstos, uzkrājas nodalījuma apakšā esošajā tvertnē [28].

Mitrajiem skruberiem novērojamas problēmas, kas saistītas ar efektivitāti pie mazākām jaudām, un pilienu pārpildījumu pie lielām jaudām. Lai risinātu šo problēmu, plūsma un tās parametri analizēti plūsmu dinamikas datorprogrammā [29]. Izveidots centrifūgas mitrais skruberis, kurā dūmgāzes ievada iekārtā zem skruberu lāpstiņām. Ūdeni iekārtā ievada caur sprauslām, kas atrodas starp skruberu lāpstiņām un mitruma uztvērēju (*demister*). Pēc tam ūdens sajaucas ar dūmgāzēm un plūst cauri attīrīšanas zonai. Pēc gāzu attīrīšanas, tās virzās caur mitruma uztvērēja lāpstiņām, kur no tām atdala ūdens pilienus. Netīrais ūdens izplūst no sistēmas pa atvērums iekārtas apakšā, bet attīrītās dūmgāzes izvada no sistēmas pa atvērums tās augšā. Šāda modeļa izveide palīdzējusi izprast plūsmu procesus iekārtā un noteikt problēmas

veidojošos parametrus, kā arī rast tiem risinājumus. Ieviestie uzlabojumi samazina pilienu pārpildījuma veidošanās risku iekārtā [29].

Dinamiskais skruberis ir līdzīgs iesmidzināšanas tornim, ar papildus iekļautu rotoru, kas mitrina un attīra dūmgāzes no *PM*. Rotors var būt torņa iekšpusē vai ārpusē, savienots ar dūmgāzu caurulī. Šī iekārta nodrošina augstu *PM* attīrīšanas efektivitāti, bet ir ar paaugstinātām uzturēšanas izmaksām. Riski, kas saistīti ar iekārtas izmantošanu, ir korozija, nepieciešamība pēc priekšapstrādes, augsts elektroenerģijas patēriņš. Savukārt plāksņu skruberis jeb triecienelementa skruberis ir vertikāls tornis ar iekšpusē horizontāli izvietotām perforētām plāksnēm. Tajā gāzes ievada iekārtas apakšā un tās virzās uz augšu caur atvērumiem plāksnēs, ūdens virzās pretī dūmgāzēm nodrošinot labāku gāzes–ūdens saskari virs plāksnēm. Plāksnes nepārtraukti attīra no *PM*. Iekārta veidota tā, lai katras plāksnes uzturēšana un apkope būtu vienkārša. Šī skruberu efektivitāte ir augstākā daļiņām ar izmēru no 5 μm , sasniedzot 97 %, papildus nodrošinot arī gāzveida piesārņotāju atdalīšanu no dūmgāzēm [30].

Mitrs pildītā slāņa skruberis ir iekārta, kurā dūmgāzes caur pildīto slāni virzās augšup uz laukumu ar izlīdzinātu ūdens slāni, kas plūst pretēji gāzu plūsmai. Pildījums konkrētajā iekārtas tilpumā nodrošina lielu virsmas laukumu, kurā ūdens samitrina virsmu un saskaršanās ar dūmgāzēm notiek uz mitrās virsmas. Darbības princips ir līdzīgs tiešā kontakta pretplūsmas siltummainim, kuru pielieto dūmgāzu dzesēšanai. Izmantojot šādu attīrīšanas metodi, dūmgāzēs esošā darva un tvaiks kondensējas, un ar ūdeni atdala darvas un *PM* frakcijas [31]. Zemāka skruberu adsorbenta slāņa temperatūra palielina masas apmaiņu uz virsmas, nodrošinot tvaika uzkrāšanu. Adsorbenta materiāls ar augstu siltumvadītspējas koeficientu veicinās gan siltuma, gan masas apmaiņas procesus, jo īpaši sistēmās, kuras darbina adiabatiskos apstākļos [32].

Venturi skruberi plaši izmanto dūmgāzu attīrīšanai no piejaukumiem, ar potenciālu pielietojumu radioaktīvu vielu atdalīšanai no ventilācijas sistēmām atomelektrostacijās. Augstā *PM* daļiņu attīrīšanas efektivitāte ir saistīta ar dizainu. Iekārta sastāv no trim daļām: apvienotās, sašaurinātās un atdalošās daļas. Sašaurinātajā skruberu daļā dūmgāzu plūsma iegūst paātrinājumu, pateicoties caurules mainīgajam diametram, kas palielina kopējo dūmgāzu ātrumu un plūsmas turbulenci. Darba šķidrums iesmidzina sašaurinājuma vai apvienotajā daļā. Šķidrums, pilienu veidā mijiedarbojas ar dūmgāzēm un uztver *PM* no tām. Atdalošā daļa kalpo kā dūmgāzu ātruma samazinājuma veidošanās posms. Galvenais parametrs, kas ietekmē skruberu veiksmīgu darbību, ir spiediena kritums sašaurinājuma daļā [33].

Somijā izstrādāts elektriski uzlādējams kondensēšanas siltummainis (*electrical charging condensing heat exchanger, eCHX*) dūmgāzu attīrīšanai no *PM* ar vienlaicīgu siltuma atgūšanu. Iekārta pārbaudīta un paredzēta izmantošanai pēc mazas jaudas biomasas kurināma katliem. Darbības princips balstīts uz aizsargātu lādētāju un kondensatoru. Izmantojot *eCHX PM₁* emisijas samazinātas par vairāk nekā 80 % un pārējās *PM* emisijas samazinātas par vairāk nekā 40 %, vienlaikus sasniedzot augstu iekārtas termisko efektivitāti. [34]

Elektrostatiska gaisa rupjais filtrs var veicināt attīrīšanas efektivitātes pieaugumu, bez nepieciešamības mainīt spiedienu starpību. Pētījumā aplūkota ilgtermiņa filtrācijas efektivitāte *PM* ar izmēru 0,3–10 μm , filtra enerģijas patēriņš, spiediena starpības izmaiņas 51 dienas darbības periodam. Eksperimenti veikti universitātes pilsētiņā Pekinā, kuras teritorijā nav intensīvu sastrēgumu, ievērojamas gatavošanas vai rūpniecības emisijas. Mērījumi veikti pie spēcīgas sezonālās dūmakas, ventilācijas caurulē. Šajā periodā iekārtas efektivitāte svārstījās no 87,6 % līdz 97,7 % atkarībā no daļiņu izmēra. Spiediena starpība pieauga no 14,6 līdz 63,1

Pa pie gaisa plūsmas ātruma 1 m/s. Filtra elektroenerģijas patēriņš pieauga, palielinoties uztvertajam $PM_{2,5}$ daļiņu daudzumam, taču tas pieauga lēnāk nekā tradicionālā elektriskā filtra gadījumā (attiecīgi 56 kWh/m² un 101 kWh/m² (tradicionālais) pie $PM_{2,5}$ uztveršanas daudzuma ~130 g/m²) [35].

Esošās desulfurizācijas metodes iedala mitrās, daļēji mitrās un sausās metodēs. Plazmas tehnoloģija uzrāda cerīgu alternatīvo risinājumu dūmgāzu attīrīšanai. Elektronstaru dūmgāzu attīrīšana sastāv no augstas enerģijas elektronstaru ielaišanas dūmgāzēs amonjaka un ūdens klātbūtnē, lai pārveidotu piesārņotājus potenciāli vērtīgos blakusproduktus. Apstarošanas laikā, augstas enerģijas elektroni mijiedarbojas ar galvenajām dūmgāzu sastāvdaļām, lai veidotu dažādus jonus un radikāļus. Šie aktīvie elementi strauji reaģē ar SO_x un NO_x, lai izveidotu attiecīgi sērskābi un slāpekļskābi. Stehiometriskais ievadītais amonjaka daudzums pārvērš šīs skābes amonija sulfāta ((NH₄)₂SO₄) un amonija nitrāta (NH₄NO₃) maisījumā, kurus var izmantot kā mēslojumu augsnei. Metodes galvenās priekšrocības ir:

- vienlaicīga denitrifikācija un desulfurizācija;
- gaistošo organisko savienojumu, dioksīnu, ūdeņraža savienojumu, ūdeņraža, u. c. elementu atdalīšana;
- iegūts lietderīgs blakusprodukts (mēslojums);
- uzticams process;
- vienkārša darbināšana;
- zemākas izmaksas nekā tradicionālajām tehnoloģijām [36].

Kā jaunu dūmgāzu attīrīšanas tehnoloģiju, var minēt sistēmu, kas sastāv no oksidācijas reaktora, dūmgāzu kondensatora un mitrā skruberā. Dūmgāzu attīrīšana ir balstīta uz oksidācijas metodi, kur hlora dioksīds gāzveida formā nodrošina absorbciju. Minētā viela pārveido nešķīstošus slāpekļa oksīdus šķīstošos, tādējādi nodrošinot sēra un slāpekļa oksīdu vienlaicīgu atdalīšanu no dūmgāzēm mitrās attīrīšanas procesā. Metode pārbaudīta eksperimentāli laboratorijas vidē. Skruberī izmantotais absorbenta šķīdums ir nātrija sulfīta un nātrija karbonāta maisījums. Iegūtie rezultāti parāda, ka hlora dioksīds oksidē slāpekļa oksīdu pie plaša procesa apstākļu diapazona ar augstu efektivitāti. Sēra dioksīda klātbūtnē neitralizē oksidācijas procesu. NO_x attīrīšanas efektivitāte pieaug, palielinoties pievadītās hlora dioksīda gāzes daudzumam un temperatūrai oksidācijas reaktorā. Savukārt ūdens klātbūtnē pieaug arī SO₂ attīrīšanas efektivitāte. Kopējais NO_x samazinājums pēc skruberā ir no 79 līdz 94 %, bet SO₂ samazinājums ir intervālā no 97 līdz 100 %, atkarībā no procesa apstākļiem [37].

VIVIRAD gāzes skruberā process apvieno skruberi un progresīvu oksidācijas/reducēšanās procesu ar mērķi uzlabot efektivitāti un attīrīšanas izmaksas dūmgāzu attīrīšanai ar elektronu paātrinātājiem. Pirmajos testos sasniegta daudzsoļa attīrīšanas efektivitāte SO_x un NO_x atdalīšanai, attiecīgi 99,2 % un 80,9 % [36].

Risinājumus maza mēroga dūmgāzu attīrīšanai var aizgūt arī no automobiļu industrijas. Tās ir zemu izmaksu tehnoloģijas no nozares ar jau izstrādātām dūmgāzu attīrīšanas tehnoloģijām. Tehnoloģijas piemērs ir PM filtri, kas efektīvi attīra kvēpu daļiņas no izplūdes gāzēm. Taču, pie konkrētiem apstākļiem, šie filtri var radīt pretēju efektu un palielināt smalko daļiņu emisijas. Filtru katalītiskā daba papildus pastiprina SO₃ veidošanos. Šajā gadījumā lielāka uzmanība jāvelta iekārtas uzturēšanai, kas var novest pie lielākām apkopes izmaksām [13].

Lai izvairītos no katalizatoru izmantošanas, tiek meklēti uzlabojumi dūmgāzu filtrēšanas metodēm. Piemērs ir elektriski sildāmi oglekļa šķiedru filtri. Tiem ir labāka termiskā izturība

nekā platīna bāzes katalizatoru filtriem, un filtri netiek pakļauti bojājumiem PM oksidācijas dēļ, kad tās ir uztvertas. Papildus, oglekļa šķiedru izmantošana samazina ražošanas izmaksas, jo tiek novērsta platīna un palādijs izmantošana. Elektriskie sildītāji pie filtriem novērš filtra noslāņošanu un aizsprostošanu ilgākā darbības periodā [13].

Līdz šim izstrādātās emisiju samazināšanas tehnoloģijas mazas jaudas katliem ir:

- piedevas kurināmajam (piemēram, kalcijs hidroksīds – Ca(OH)_2 , kaļķakmens – CaCO_3 un kaolīns $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) [38];
- katalītiskie filtri (piemēram, ar platīna, palādijs pārklājumiem) [17];
- mazas jaudas elektrostātiskie putekļu nogulsnetāji (nav ekonomiski izdevīgi) [39];
- maza izmēra cauruļu siltummaiņi [40];
- *PM* filtri (var palielināt smalko daļiņu emisijas) [38].

Visām attīrīšanas tehnoloģijām var minēt vienotu trūkumu – dūmgāzu apstrādes rezultātā rodas atlikumi. Sauso attīrīšanas metožu gadījumā tās ir cietās nogulsnes, savukārt mitro attīrīšanas metožu gadījumā – šķidrums ar cieto nogulšņu piemaisījumiem. Nepieciešams izvērtēt šo nogulšņu turpmāko lietojumu. Turklāt neviena no metodēm nav piemērota mazas jaudas katliem lietošanai mājāsaimniecībā, jo tiem var būt augstas vai papildus izmaksas, kas saistītas ar atlikumu apstrādi un darbināšanu.

1.3. Cieto daļiņu ietekme uz veselību

Mazas jaudas kurināmā katli, kurus galvenokārt izmanto mājāsaimniecībā, ir nepilnīgi apzināts emisiju avots. Kurināmā degšanas procesa rezultātā gaisā tiek izvadītas siltumnīcefekta veicinošas gāzes, piemēram, CO_2 , NO_x , kā arī *PM*. Šīs emisijas un to radītais piesārņojums rada negatīvu ietekmi uz vidi un cilvēku veselību. Siltumnīcefekta gāzu (*SEG*) emisiju ierobežošana un novēršana ir viens no galvenajiem uzdevumiem globālās sasilšanas ietekmes samazināšanai. Laika gaitā gan starptautiskā, gan lokālā mērogā izstrādāti un ieviesti dažādi politikas instrumenti, kas ir vērsti uz minēto emisiju samazinājumu, pēdējos gados īpaši vēršot uzmanību uz *PM* emisijām.

PM ir jēdziens, ar kuru apzīmē putekļu veida daļiņu un sīku šķidruma pilienu maisījumu. Pēc izcelsmes tās var iedalīt dabiskās (putekšņi, vulkānu izvirdumu dūmi, smiltis, u.c.) un cilvēku radītās *PM* (sīkas materiālu daļas – gumijas, asfaltbetona daļiņas, dūmgāzu piejaukumi, transporta izplūdes gāzes, u.c.). Tās ir viena no galvenajām sastāvdaļām cieta kurināmā degšanas procesu dūmgāzēs. *PM* raksturo fizikālās un ķīmiskās īpašības – izmērs, daudzums, krāsa, virsmas laukums, koncentrācija, blīvums un uzvedība [12].

Daļiņas, kas atrodas gaisā, ir ar diametru no 0,001 μm līdz 500 μm , lai gan visvairāk daļiņu ir izmērā no 0,1 μm līdz 10 μm . Lai gan ar aci nesaskatāmas, *PM* sajaukumā ar CO_2 , ūdens tvaiku un ozonu spēj izmainīt atmosfēras funkcijas un īpašības, tai skaitā absorbcijas spēju un vielu pārnēsī. Ilgstoši atrodoties gaisā un, mijiedarbojoties ar citām vielām, *PM* var radīt būtiskus bojājumus materiāliem. Bojājumu pakāpe un radītās sekas atkarīgas no daļiņu sastāva [12].

Fosilā kurināmā degšanas procesos radušās *PM* iedala kondensējamās un filtrējamās (kvēpi) daļiņās. Kondensējamās *PM* ir gāzes formā pirms izvadīšanas un cietā formā pēc tās, kondensācijas procesa rezultātā. Daļa no tām var pārvērsties aerosolu daļiņās. Filtrējamās *PM* rodas sadalīšanās–saplūšanas, kā arī iztvaikošanas–kondensācijas procesu rezultātā. Abi daļiņu

veidi veido primārās *PM*, kas tiek izvadītas vidē. Kondensējamo *PM* bīstamību nosaka to īpašības, īpaši absorbcijas spēja. Absorbējot kaitīgus elementus un savienojumus, kondensējamās *PM* rada riskus cilvēku veselībai, daļiņu uzņemšanas iespēju rezultātā [41].

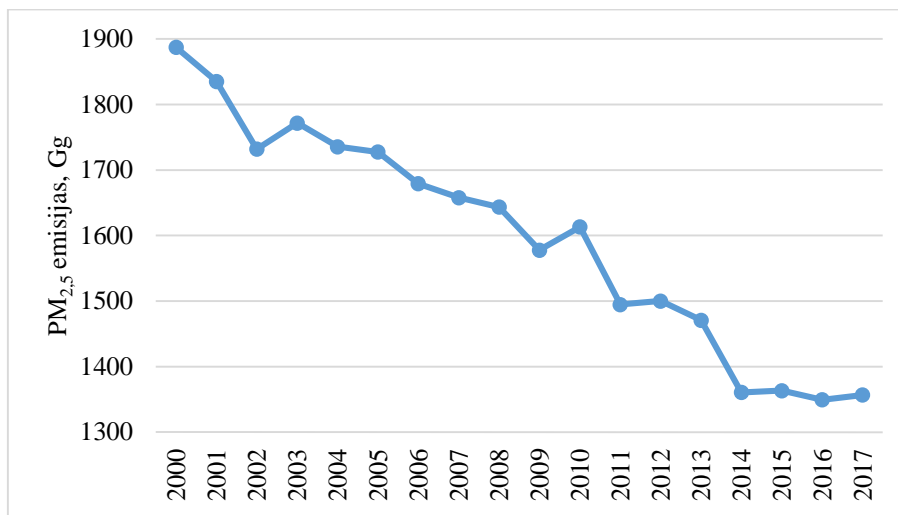
PM ir nozīmīga piesārņojuma problēma daudzās Eiropas valstīs, jo regulāri tiek pārsniegtas noteiktās normas par *PM* koncentrāciju gaisā, kas noteiktas ES direktīvā 2008/50/EK par gaisa kvalitāti un tīrāku gaisu Eiropai [42], [43]. ES stratēģijas par emisiju samazinājumu, tiešā veidā neietver *PM* emisijas, taču iekļauj gāzveida emisijas, kas var izraisīt augsnes un/vai ūdens pH līmeņa izmaiņas, eutrofikāciju, ozona caurumu veidošanos, kā arī radīt sekundārās *PM* [39].

PM piesārņojums ir problēma, kas aktuāla globālā mērogā. Pasaules Veselības organizācija (*PVO*) ir izstrādājusi vadlīnijas radītajām *PM*, ozona, slāpekļa dioksīda un sēra dioksīda emisijām, kas balstītas ekspertu veikto zinātnisko pētījumu gaitā iegūto datu izvērtējumā un ir piemērojamas jebkurai valstij. *PM* emisijām noteiktas robežvērtības *PM*_{2,5} un *PM*₁₀ izmēra daļiņām. Vidējais gada rādītājs *PM*_{2,5} koncentrācijai nosaka, ka emisijām jābūt 10 µg/m³, *PM*₁₀ nevajadzētu pārsniegt 20 µg/m³. Vidējās diennakts emisiju koncentrācijas *PM*_{2,5} ir līdz 25 µg/m³, *PM*₁₀ – 50 µg/m³ [44].

Novērst un samazināt piesārņojumu, kā arī noteikt gaisa kvalitātes prasības un veicamos pasākumus atbilstošas gaisa kvalitātes nodrošināšanai Latvijā nosaka likums “Par piesārņojumu” un LR MK noteikumi Nr. 1290 “Noteikumi par gaisa kvalitāti”. Šajos noteikumos iestrādātas prasības gaisu piesārņojošām vielām, ieskaitot *PM*_{2,5}, no spēkā esošajām ES gaisa kvalitātes kontroles direktīvām [45], [46]. Šo direktīvu robežlielumu ievērošanas nepieciešamību norāda arī *PVO* pētījumi, kas apliecina, ka smalkās daļiņas *PM*_{2,5} saīsina cilvēka paredzamo dzīves ilgumu ES par vairāk nekā astoņiem mēnešiem. Latvijā noteiktais *PM*₁₀ koncentrācijas diennakts robežlielums ir 50 µg/m³, kuru atļauts pārsniegt 35 reizes kalendārajā gadā. Kalendārajā gadā noteiktais koncentrācijas robežlielums ir 40 µg/m³ [47]. Savukārt *PM*_{2,5} piesārņojuma koncentrācijas robežvērtības nosaka ar vidējās ekspozīcijas koncentrācijas mērķlieluma datiem par pēdējiem trim gadiem. Pēc tam no tā izveido aprēķinu un plānu emisiju samazinājumam konkrētā laika posmā. Pēdējais noteikumos iekļautais ekspozīcijas koncentrācijas mērķlielums, bija 20 µg/m³ kalendārajā gadā [47]. Citi likumdošanas dokumenti, kas nosaka gaisa kvalitātes monitoringu ir MK noteikumi Nr. 614 “Kopējo gaisa piesārņojošo vielu emisiju samazināšanas un uzskaites noteikumi” un Nr. 737 “Siltumnīcefekta gāzu inventarizācijas un prognožu sagatavošanas nacionālās sistēmas izveidošanas un uzturēšanas noteikumi” [48], [49].

Vairāk nekā 45 % no *PM* emisijām Eiropā 2015. gadā radīja mazas jaudas degšanas iekārtas. Ķīnā veiktie pētījumi pierādījuši, ka biomasas izmantošana degšanas iekārtās var veidot 19–37 % no kopējā radītā *PM* daudzuma atkarībā no laikapstākļiem un sezonālātes, kā arī izmantotā kurināmā veida. Kurināmā parametrs, kas visvairāk ietekmē *PM* emisiju daudzumu, ir mitruma saturs [50], [51].

Pēc Eiropas Vides aģentūras (*European Environment Agency, EEA*) sniegtajiem datiem par 33 *EEA* valstīm, emisijas gaisā 2017. gadā ir samazinājušās, salīdzinot ar 2000. gada datiem.



1.2. att. *PM* emisijas EEA 33 dalībvalstīs (2000.–2017.) [52].

Kā var redzēt attēlā, tad *PM* emisiju izmaiņas ir nevienmērīgas, ar samazināšanās tendenci. Kopējais samazinājums no 2000. gada līdz 2017. gada sastāda 530 Gg *PM*_{2,5} emisiju. Jāmin, ka 2017. gadā novērojams neliels emisiju pieaugums salīdzinājumā ar 2016. gadu, kad sasniegts zemākais *PM*_{2,5} emisiju līmenis 1350 Gg. EEA dalībvalstīs radīto emisiju daudzums ir atšķirīgs gan pa veidiem, gan nozarēm. *PM* emisijas visvairāk rodas komerciālajā, institūciju un mājsaimniecību sektorā (*PM*₁₀ – 33,61 %, *PM*_{2,5} – 55,49 %). Tas skaidrojams ar to, ka šajā nozarē atrodami dažāda veida apkures katli, kuri, pie mazākām darbības jaudām, ir bez dūmgāzu attīrīšanas iekārtām. Arī citās nozarēs *PM* emisiju veidošanās skaidrojama pārsvarā ar kurināmā izmantošanu un nepilnīgu tā radīto dūmgāzu attīrīšanu.

PM emisijas ir tieši saistītas ar mājsaimniecību enerģijas patēriņu. Pētījums [53] uzrāda, ka mājsaimniecības *PM*_{2,5} nospiedums Pekinas teritorijā 2010. gadā bija 7831,36 kt pilsētās un 563,96 kt ārpus pilsētas. Šajā gadījumā tiešie *PM* emisiju avoti ir ogles (~ 42 %), siltumenerģija un elektroenerģija (~ 33 %), degviela (~ 21 %), dabasgāze un sašķidrināta naftas gāze (kopā ~ 4 %). Ārpus pilsētas galvenais *PM* emisiju avots ir ogles (~ 98 %). Galvenie netiešo *PM* emisiju avoti ir pārtikas rūpniecība, veselība, lauksaimniecība un zivsaimniecība. Papildus novērojums, kas saistīts ar mājsaimniecību piesārņojumu ir ienākumu līmenis, kuram pieaugot palielinās arī saimniecības *PM*_{2,5} nospiedums. Ārpus pilsētas paaugstinās emisijas pārtikai un saimniecības uzturēšanai, savukārt, pilsētā pieaugums novērojams visos sektoros [53].

Eiropā sagaidāms gaisu piesārņojošo emisiju samazinājums un kontroles uzraudzība arī nākotnē, jo tiks īstenoti esošo stratēģiju uzstādītie mērķi. Mazākais samazinājums paredzams amonjaka emisijām. Šādas prognozes izpilde ir pilnībā atkarīga no stratēģiju mērķu izpildes, ko atbalstīs un papildus veicinās arī likumdošana klimata pārmaiņu ierobežošanai, enerģijas un transporta sektoru uzlabošanai. Valstu dažādās iespējas var kavēt noteikto mērķu sasniegšanu kopumā. Šobrīd ES gandrīz 20 % no iedzīvotājiem regulāri ir pakļauti vismaz vienai no kancerogēnajām emisijām gaisā (*PM*₁₀, *PM*_{2,5}, O₃, NO₂). Eiropā regulāra pakļautība *PM*_{2,5} emisijām veicina 400 000 priekšlaicīgu nāves gadījumu katru gadu. Gaisa kvalitātes izsekošanai gandrīz reālā laikā izveidots Eiropas gaisa kvalitātes indekss, kas apkopo monitoringa tīkla mērījumus, ar krāsas indikatoru raksturojot tā kvalitāti konkrētā brīdī, iekļaujot arī prognozes līdz divdesmit četrām stundām [54], [55].

PM veicina iekaisumu veidošanos. To apstiprina plaušu un sirds un asinsvadu slimību pieaugums iedzīvotāju vidū, kam ir bijusi ilgstoša saskare ar šīm daļiņām. Tas nozīmē, ka pozitīvas ietekmes radīšanai jāveic sekojošie pasākumi: jāsamazina *PM* rašanās vietā, jāsamazina kairinošo *PM* daudzums izvadē, ieelpošanas neizbēgamības gadījumā – jāievieš pretiekaisuma aprūpes pieejamība [56].

Izšķir rupjas (2,5–10 μm), smalkas (< 2,5 μm) un putekļveida (< 0,1 μm) *PM*. Rupjas *PM* rodas smalcināšanas un malšanas procesu laikā un cilvēka organismā galvenokārt nonāk augšējā ķermeņa daļā – bronhos. Smalkās daļiņas pārsvarā rodas degšanas procesu rezultātā. Šīs daļiņas veido līdz 50 % no visām gaisā esošajām *PM*, un to uzturēšanās laiks gaisā ir ilgs (vairākas nedēļas, pat mēneši) [57]. Smalkās *PM* iespējams ieelpot dziļāk plaušās, kas nozīmē, ka tās var nonākt plaušu cirkulācijā, kas rada iespējamību, ka tās nonāks arī asinsrites sistēmā. Putekļveida daļiņu galvenais avots ir transportlīdzekļu emisijas.

Mežu ugunsgrēki kļūst plašāki un spēcīgāki. Sākot no 80 % līdz 90 % meža ugunsgrēku laikā radīto *PM* ir smalkās daļiņas. Tas arī norāda, ka riskam īpaši pakļauti ugunsdzēsēji [56]. Mežu ugunsgrēki uzskatāmi par viskaitīgākajiem, ietekmes uz iedzīvotājiem gadījumā, jo gaisā ar emisijām tiek izvadīts paaugstināts *PM* daudzums, kas var aizceļot tālu no ugunsgrēka vietas, simptiem vai tūkstošiem kilometru attālumā. *PM* koncentrācija gaisā ir cieši saistīta ar vēja intensitāti. Tā ietekmē *PM* koncentrācija var krasī atšķirties pa dienām, pat stundām [57].

Pētījumos pierādīts, ka iedzīvotāji iekšelpās vidēji pavada 90 % no sava mūža. Tādēļ liela nozīme ir arī iekšelpu gaisa kvalitātei. Iekšelpu *PM* piesārņojums rodas no ēdiena gatavošanas, ārējiem avotiem, ogļu un biomasas dedzināšanas, cigarešu dūmiem, putekļiem, mājdzīvniekiem, aerosoliem, darba piederumiem, būvniecības materiāliem, ventilācijas sistēmas ēkā, u.t.t. Liela daļa pasaules iedzīvotāju ir pakļauti tieši iekšelpu *PM* piesārņojumam, kas izceļ to, ka biomasas dedzināšanai iekšelpās jāpievērš papildus uzmanība. Jāņem vērā arī pētījumos pierādītais, ka īslaicīgas izmaiņas *PM* koncentrācijā gaisā ir cieši saistītas ar akūtiem elpceļu saslimšanas gadījumiem tieši jauniešu vidū. Katrs *PM* koncentrācijas pieaugums veicina elpceļu iekaisumu riska palielināšanos par 0,6 % [58]. Tāpat arī nepieciešams pievērst uzmanību jaunu iekaisumu identificēšanas un ārstēšanas metožu izstrādei, kā arī efektīviem gaisa kvalitātes nodrošinājuma risinājumiem un radīto *PM* izmēram, kas ir pierādīties kā būtiskākā ietekmes īpašība. Papildus jāvērs uzmanība arī uz *PM* piesārņojuma viendabīgumu, izcelsmi, kas konkrētos reģionos var būt saslimšanu cēlonis [56], [57].

Īslaicīga saskare ar ārējās vides *PM* saistīta ar hronisku plaušu slimību pieaugumu. Hroniska saskare ar paaugstinātu *PM* daudzumu saistīta ar plaušu slimībām, hroniska bronhīta saslimšanām, astmu, dzīves ilguma samazināšanos (vidēji par 8–9 mēnešiem) [57]. Zinātniskie pētījumi papildus pierāda, ka 10 μg/m³ līdz 20 μg/m³ pieaugums *PM* līmenī veicina mirstības palielināšanās risku par 0,5 % līdz 2 % tieši no sirds un asinsvadu slimībām [56]. Kvantitatīvie epidemioloģiskie pētījumi atspoguļo, ka gaisa piesārņojums rada nozīmīgu ietekmi uz dažādām veselības problēmām. Pakļautība apkārtējā vidē esošo *PM* emisiju (*PM*_{2,5}) ietekmei radīja 4,2 miljonus priekšlaicīgu nāves gadījumu no elpceļu, sirds un asinsvadu slimībām un vēža 2016. gadā, kas padarīja šo parametru par vienu no galvenajiem vides riska faktoriem globālā mērogā. Augstākie *PM*_{2,5} emisiju rādītāji novēroti aukstajā sezonā – no oktobra līdz martam. Pētījumi iezīmējuši arī sakarību starp pakļautību *PM*_{2,5} un neatliekamās medicīniskās palīdzības apmeklējumiem no specifiska cēloņa slimībām, piemēram, sirds un asinsvadu un elpceļu slimībām. Pārvietojoties uz sirdi, apkārtējās vides daļiņas var paaugstināt oksidējošo stresu un

veicināt paaugstinātu asinsspiedienu. Gaisa piesārņotāji var samazināt organisma aizsardzības mehānismus pret elpceļu infekcijām vai palielināt elpceļu reakcijas, ietverot tiešus kairinājumus, radot bronhītu un oksidējošo stresu ar iekaisumu [59].

Tikai 24 no 234 valstīm pasaulē ir vairāk nekā trīs $PM_{2,5}$ emisiju mērītāji uz miljonu iedzīvotāju, kamēr iedzīvotāju blīvums ir zemāks lielākajā daļā pasaules valstu, no kurām 141 valstij nav regulāra $PM_{2,5}$ monitoringa. Vidējais attālums līdz tuvākajai $PM_{2,5}$ mērījumu vietai globālā mērogā ir 220 km, kas ir pārāk liels attālums reālās ietekmes novērtējumam. 60 % no pasaules valstīm, kas sastāda ~ 18 % no populācijas nav nodrošināti $PM_{2,5}$ mērījumi. Mērītāju blīvums ir īpaši zems Āfrikā, vidēji tas ir 0,03 mērītāji uz iedzīvotāju, kas ir krietni par zemu, lai raksturotu gaisa kvalitāti 1,2 miljardiem cilvēku. Masu mediji bieži vien aktualizē diskusiju par piesārņotākajām pilsētām pasaulē, taču zemais mērītāju blīvums liecina, ka daudzās pilsētās nemaz nav pieejami dati par uz vietas veiktiem mērījumiem. Lai šo parādītu uzskatāmāk, 1700 pilsētās ar vismaz 300 tūkstošiem iedzīvotāju ir tikai aptuveni 5500 $PM_{2,5}$ mērītāji, no kuriem lielākā daļa ir Ķīnā vai Amerikas Savienotajās Valstīs. Indijā nacionālais svērtais vidējais $PM_{2,5}$ līmenis uz iedzīvotāju ir $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$, kas pārsniedz PVO pagaidu mērķi ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) vairāk nekā divas reizes. Aptuveni 90 % no Indijas iedzīvotājiem dzīvo teritorijās, kas pārsniedz šo līmeni un 99,9 % dzīvo teritorijās, kas pārsniedz PVO mērķi. Daudzās pilsētās ar augstu $PM_{2,5}$ netiek veikti mērījumi un trūkst nozīmīgas informācijas par to, kā uzlabot gaisa kvalitāti. Esošās koncentrāciju noteikšanas metodes pasaulē ietver satelīta attālināto mērījumu datu, ķīmiskā transporta modeļu un uz zemes bāzētu mērītāju kombināciju ar daudzsološu precizitāti [60].

1.3.1. Cietās daļiņas Latvijā

Latvijā pirmais plašāka mēroga projekts par PM samazinājumu veikts 2013. gadā. Tā nosaukums ir “Pētījums par tehnoloģijām putekļu smalko daļiņu sastāva un morfoloģijas noteikšanai un metodes izstrāde putekļu paraugu savākšanai Rīgas gaisa monitoringa stacijās un atklātā vidē” [61] un izstrādātājs ir SIA “Vidzemes Elektrotehnikas Fabrika”. Pētījums sniedz informāciju par dažādiem putekļu avotiem, to uzbūvi, ķīmisko sastāvu, klimata apstākļu ietekmi uz putekļu piesārņojumu, transportlīdzekļu radīto piesārņojumu un gaisa sastāvu Rīgas teritorijā dažādās vietās [61].

2014. gadā izdota valsts rīcības programma $PM_{2,5}$ emisiju un to ietekmes samazināšanai valstī. Tās mērķis ir novērtēt situāciju saistībā ar daļiņu $PM_{2,5}$ piesārņojumu un izvērtēt pasākumus smalko daļiņu piesārņojuma samazināšanai, papildus izstrādājot prognozes $PM_{2,5}$ koncentrācijām 2020. un 2030. gadam. Programmas sagatavošanas laikā daļiņu $PM_{2,5}$ mērījumi veikti kopā četrās stacijās – Rīgā, Ventspilī, Liepājā un Rucavā. Savukārt PM_{10} mērījumi veikti Rēzeknē. Citviet gaisa kvalitātes mērījumos fiksētas gāzveida emisiju koncentrācijas. Daļiņu piesārņojuma koncentrācijas prognozes 2020. gadam un 2030. gadam noteiktas izmantojot GAINS (*The Greenhouse gas – Air pollution Interactions and Synergies*) modeli, kas izstrādāts IIASA (*International Institute for Applied Systems Analysis*). Prognozēs ņemti vērā dažādi iespējamie emisiju samazināšanas pasākumi: kontroles tehnoloģijas, ietekmējošie faktori un to ierobežošana. Rezultāti uzrāda, ka $PM_{2,5}$ koncentrācijas prognozes periodos nepārsniedz noteikto gada robežlielumu, kas nepieciešams cilvēka veselības aizsardzībai – $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [62].

Gan Latvijas, gan pasaules mērogā galvenais PM emisiju avots ir mājsaimniecību sektors. Šajā sektorā emisijas visvairāk ietekmē izmantotais kurināmā veids un apjoms, degšanas iekārtas efektivitāte. Vadošais kurināmā veids Latvijā ir koksne, kam seko dabasgāze. Emisiju

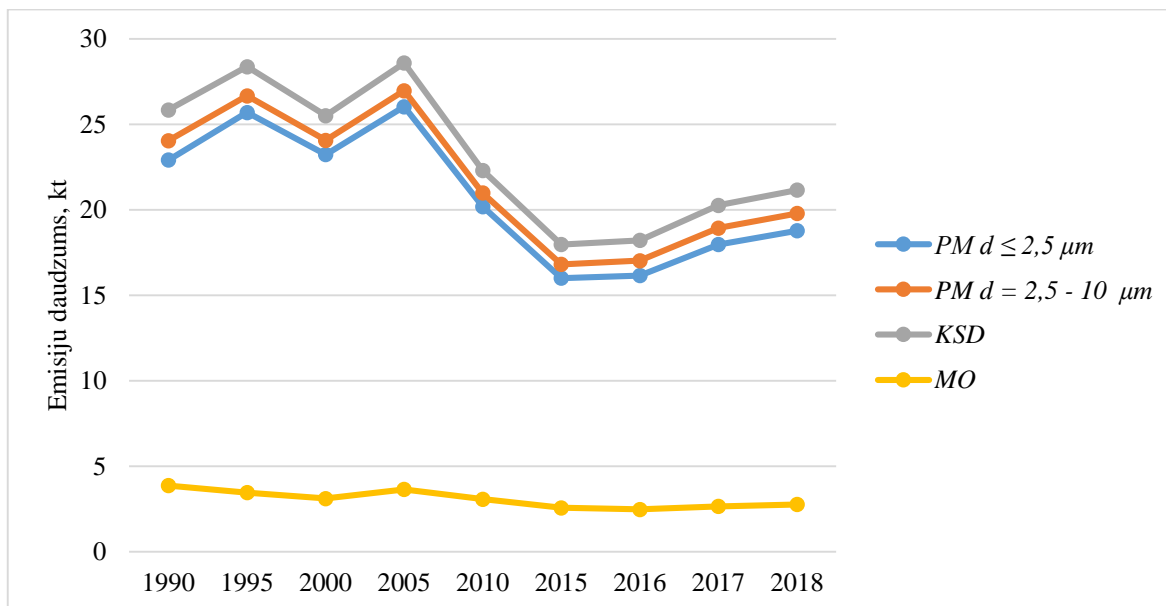
koncentrācijas izmaiņas ir tieši saistītas ar apkures sezonas vidējo temperatūru, attiecīgi pie augstākām temperatūrām radīts lielāks emisiju daudzums un otrādi. Citas nozares, kas rada nozīmīgu *PM* piesārņojumu, ir: ražošana, pakalpojumi, lauksaimniecība un zivsaimniecība, kā arī transports. Transporta radītās emisijas tiek izvadītas vistuvāk zemei, kur to izkliedi atmosfērā apgrūtina apbūve, radot lielāku *PM* koncentrāciju piezemes slānī. Papildus emisiju avots ir atkritumu apsaimniekošanas degšanas iekārtas [62]

“Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs” 2014. gadā izstrādājis Valsts rīcības programmu [62], kas vērsta uz smalko *PM* ($d < 2,5 \mu\text{m}$) emisiju samazinājumu, lai ierobežotu to radīto ietekmi uz cilvēku veselību. Tajā iekļauts apraksts par *PM* veidiem, to rašanās avotiem, iespējamo ietekmi uz veselību, kā arī novērtēts esošais *PM* piesārņojuma līmenis valstī, liekot uzsvāru uz nozarēm un iekārtu radīto piesārņojumu. Sniegts ieskats *PM* pārrobežu pārneses situācijā, piemēram, Latvijā lielākais pārrobežu *PM* ienesējs ir Polija. Tāpat arī sniegti risinājumi emisiju samazinājumam:

- 1) mājsaimniecībās – veicot veco apkures iekārtu nomaiņu, attīstot centralizēto siltumapgādi un energoefektivitāti, mainot kurināmo, ieviešot atjaunojamās enerģijas resursu izmantošanu sektorā;
- 2) transporta sektorā – ieviešot zema emisiju līmeņa zonas, optimizējot transporta plūsmas, attīstot infrastruktūru zemu emisiju transportlīdzekļiem, uzlabojot izplūdes gāzu attīrīšanas tehnoloģijas, ceļu stāvkli un apkopi;
- 3) enerģētikas un rūpniecības sektorā – veicot kurināmā nomaiņu, ieviešot efektīvu dūmgāzu attīrīšanu;
- 4) nodrošinot gaisa kvalitāti kā prioritāti, vismaz pilsētās [62].

LR Centrālā statistikas pārvalde reizi piecos gados veic apsekojumu „Energoresursu patēriņš mājsaimniecībās” [63]. Tajā sniegta informācija par mājsaimniecībās izmantotajiem resursiem: kurināmo, enerģiju, energoresursu izmaksām, transportlīdzekļiem, elektroiekārtām, degvielām. Pētījumā netiek iekļautas kolektīvās mājsaimniecības, mērķa populācija ir tieši privātās mājsaimniecības. Pēdējais apsekojums veikts 2015. gadā. Energoresursi pamatā izmantoti apkures vajadzībām, visvairāk izmantotais kurināmā veids ir koksne. Malku izmanto 64,2 % mājsaimniecību, citi izmantotie koksnes kurināmā veidi bija kokskaidu briķetes un koksnes granulas. Trešdaļa no mājsaimniecībām malku nodrošina no privātīpašumiem, savukārt citi to iegūst dažādos veidos, arī kā sociālo palīdzību [63]. Šobrīd Latvijā netiek ievākta informācija par mājsaimniecību sektora radīto piesārņojumu, kā arī netiek izstrādāti novērtējumi tā ietekmei uz gaisa kvalitāti, cilvēku veselību.

2020. gadā kopējā energobilancē visvairāk izmantotie resursi ir naftas produkti (33,0 %), kam seko koksnes resursi (31,9 %), no kuriem vadošais ir kurināma šķelda (14,0 %), un dabasgāze (20,8 %). Šķeldas izmantošanas pieaugums saistīts ar katlu māju pāreju no dabasgāzes uz izmantošanai ērtākiem atjaunojamiem energoresursiem. Šķeldas sagatavošana ir mazāk darbietilpīga. Savukārt gan naftas produktu, gan dabasgāzes izmantošanas apjomā novērojams pakāpenisks kritums, kas liecina par pāreju un atjaunojamo energoresursu tehnoloģijām valsts līmenī [64],[65].

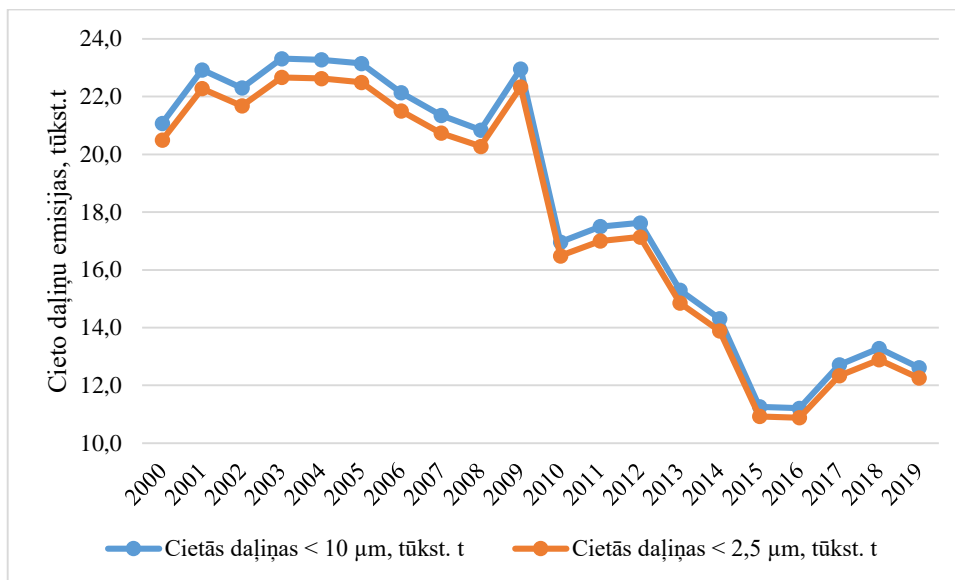


1.3. att. Emisiju izmaiņas Latvijā laika posmā no 1990. līdz 2018. gadam [66].

$PM_{2,5}$ emisijas samazinājušās par 18,1 % no 1990. līdz 2018. gadam, kas skaidrojams ar kurināmā veida un patēriņa izmaiņām enerģijas ražošanas sektorā un mājsaimniecību degšanas iekārtās. Savukārt PM_{10} emisijas minētajā laika posmā samazinājušās par 17,7 %, ar emisiju samazinājumu visos sektoros, izņemot industriālo procesu un produktu patēriņa sektorā. Vidējais PM emisiju samazinājums kopš 1990. gada ir 17,9 %. Taču 2018. gadā novērojams PM_{10} emisiju pieaugums par 3,7 %, salīdzinot ar 2017. gadu. Papildus novērojams kopējais pieaugums kopējo suspendēto daļiņu emisijās (KSD) par 23,9 % un samazinājums melnā oglekļa emisijās (MO) par 29,1 %, ar izņēmumiem galvenokārt industriālo procesu un produktu patēriņa sektorā, kā arī lauksaimniecībā, MO gadījumā. Kurināmā degšanas procesi bija galvenais PM emisiju avots Latvijā 2018. gadā: $PM_{2,5}$ – 91,8 %; PM_{10} – 71,5 %; KSD – 44,9 %; MO – 97,6 %. Papildus emisiju avots ir mežistrādes atlikumu utilizācija, dabiskie ugunsgrēki, kas ir mainīgi emisiju avoti, atkarīgi no cirsmu apjoma un atlikumu utilizācijas veida [66].

Gaisu piesārņojošo vielu emisijas no stacionāriem avotiem ir ar mainīgu informāciju par dažādiem piesārņotājiem. Pilnie dati ir tikai par PM , kuru daudzums gadu griezumā ir krasi samazinājies. Tas skaidrojams ar dūmgāzu attīrīšanas tehnoloģiju ieviešanu katlu mājās, kas ir galvenie stacionārie emisiju avoti. Pateicoties šo tehnoloģiju ieviešanai novērojams nozīmīgs samazinājums arī sēra dioksīda emisijām. Citu piesārņojošo vielu daudzums pēdējo gadu laikā ir svārstīgs, bez vai ar minimālām izmaiņām. Šie rādītāji norāda arī uz nepieciešamību pilnveidot emisiju samazināšanas un novēršanas tehnoloģijas. [67]

Atbilstoši Latvijas oficiālās statistikas datiem, PM emisijas no mājsaimniecībām sastāda aptuveni 60 % no kopējās PM emisijām valstīs. 1.4. attēlā var aplūkot $PM_{2,5}$ un PM_{10} emisiju izmaiņas laika posmā no 2000. līdz 2019. gadam. Ievērojams emisiju samazinājums novērojams sākot no 2009. gada, kas skaidrojams ar apkures iekārtu optimizāciju. Sākot no 2016. gada novērojams izteiktāks PM emisiju pieaugums, kas saistīts ar kurināmā maiņu – mājsaimniecībās norit pāreja no fosilā kurināmā – dabasgāzes – uz biomasas kurināmo, galvenokārt, koksni un tās produktiem, piemēram, granulām, briketēm, malku.



1.4. att. PM emisijas mājsaimniecībās 2000.–2019. gadā [68].

“Nacionālais attīstības plāns 2014.–2020. gadam” (*NAP2020*) ir augstākais valsts līmeņa vidēja termiņa plānošanas dokuments, kas ir cieši saistīts ar “Latvijas ilgtspējīgas attīstības stratēģiju līdz 2030. gadam” (*Latvija2030*). *NAP2020* prioritātes “Tautas saimniecības izaugsme” rīcības virziena “Augstražīga un eksportspējīga ražošana un starptautiski konkurētspējīgi pakalpojumi” viens no mērķiem attiecināms uz emisiju samazinājumu un novēršanu visos sektoros. Savukārt rīcības virziens “Energoefektivitāte un enerģijas ražošana” vērsts uz esošo tehnoloģiju uzlabošanu, resursu ilgtspējīgu izmantošanu, veicinot emisiju intensitātes samazināšanos un vietējo atjaunojamo energoresursu patēriņa pieaugumu [69].

Latvija2030 prioritātes “Atjaunojama un droša enerģija” un “Daba kā nākotnes kapitāls” ietver uz kurināmo un PM emisijām attiecināmas aktivitātes: atjaunojamo energoresursu izmantošanas paaugstināšanu, enerģētiskās neatkarības veicināšanu, kas atbalsta energoefektivitātes un gaisa kvalitātes uzlabošanu, samazinot un, novēršot transporta, enerģijas ražošanas radītās emisijas, vienlaicīgi nodrošinot vietējo resursu ilgtspējīgu izmantošanu [70].

Vides politikas pamatnostādnes 2014.–2020. gadam (*VPP2020*) ir vidēja termiņa politikas plānošanas dokuments vides aizsardzības jomā, kas izstrādātas atbilstoši *NAP2020* un ES finanšu perioda mērķiem, prioritātēm un finanšu sadalījumam, ņemot vērā arī Vides aizsardzības likuma [71] prasības. *VPP2020* minētās problēmas, kas saistītas ar PM piesārņojumu, ir nepilnīgs vides monitoringa un informācijas trūkums visos līmeņos, nepietiekama ilgtspējīgas attīstības un vides aspektu iekļaušana plānošanas projektos un to īstenošanā, atbildību trūkums normu pārkāpšanas gadījumos, nepietiekama vides aizsardzības sistēmas veiktspēja visos līmeņos, ierobežotas atbildīgo iestāžu iespējas vides veselības jautājumu uzturēšanā. Pamatnostādnēs iekļauti risinājumi šo problēmu mazināšanai. Gaisa aizsardzības politikas mērķis ietver gaisa piesārņojuma ietekmes samazināšanu līdz videi nekaitīgam līmenim, novēršot iespējamus draudus veselībai un ekosistēmām. Minimālie sasniedzamie rādītāji ir noteikto normatīvu izpilde un emisiju samazinājums līdz līmenim, kas nepārsniedz noteiktos robežlielumus. Atzītas arī mājsaimniecības sektora radītās problēmas, kas saistītas ar degšanas iekārtu radītajām emisijām, nepieciešamība pēc normatīvajiem regulējumiem šajā sektorā. Vides piesārņojuma un risku mērķis koncentrējas uz dabas resursu aizsardzību un ilgtspējīgu izmantošanu, mazinot vides riskus un attīstot to pārvaldību. Citi

mērķi koncentrējas uz vides veselības un monitoringa nodrošināšanu, datu un informācijas apkopošanu un analīzi, veicinot arī informācijas izplatīšanu sabiedrībā. Pie sasniedzamajiem rādītājiem norādīts mājsaimniecībā sasniegtais apkures iekārtu gaisa piesārņojuma samazinājums putekļu emisijām, iekļaujot PM_{10} , $PM_{2,5}$ no 21,79 t/gadā (2010. gadā) uz 18,53 t/gadā 2020. gada beigās [72].

Latvija pievienojās Ekonomiskās sadarbības un attīstības organizācijai (*ESAO*) 2016. gadā. 2019. gada *ESAO* vides raksturlielumu pārskatā minētās gaisa kvalitātes problēmas Latvijā ir pastāvīgs smalko daļiņu piesārņojums gaisā, pieaugošas siltumnīcefekta gāzu emisijas lauksaimniecības sektorā. ES 2030. gada mērķu sasniegšanai Latvijā jāveicina energoefektivitātes uzlabojumi, emisiju samazināšana un kontrole. Aptuveni 90 % Latvijas iedzīvotāju regulāri ir pakļauti $PM_{2,5}$ emisijām, kas pārsniedz *PVO* gada robežvērtību. PM_{10} daļiņu emisijas regulāri tiek pārsniegtas lielajās pilsētās. Valstī nepieciešams pilnveidot un atjaunot gaisa kvalitātes monitoringa tīklu. Samazinājusies malkas izmantošana degšanas iekārtās, kas veicinājusi emisiju, tai skaitā *PM*, samazinājumu. Vides un enerģētikas jomu pētniecībai izmantoti gandrīz 10 % no valsts budžeta līdzekļiem, kas paredzēti pētniecībai un izstrādei. Kopumā vides jomā novērojams finansiālo ieguldījumu kritums [73].

2020. gada 2. jūlijā tika apstiprināts Latvijas “Nacionālais attīstības plāns 2021.–2027. gadam”, kura uzlabojumi veikti balstoties uz *NAP2020* vidusposma rezultātiem, ņemot vērā *Latvija2030* un *ANO* Ilgtspējīgas attīstības mērķus. Šajā plānā emisiju samazināšana iekļauta prioritātē “Kvalitatīva dzīves vide un teritoriju attīstība”, īpaši uzsverot rīcības virzienu “Daba un vide – “Zaļais kurss””, kas koncentrējas uz resursu pieejamību un ilgtspējīgu izmantošanu visās nozarēs. Papildus uzmanība pievērsta energoefektivitātes uzlabošanai un virzībai uz oglekļa mazietilpīgu ekonomiku. Šajā prioritātē ietverti arī mājokļu, transporta infrastruktūras uzlabojumi, klimata pārmaiņu mazināšanas pasākumu ieviešana [74].

No 2020. gada noteiktie $PM_{2,5}$ emisiju samazināšanas limiti jebkurā laika posmā no 2020. līdz 2029. gadam ir 16 % samazinājums, jebkurā laika posmā no 2030. gada 43 % samazinājums salīdzinājumā ar 2005. gadu. 2017. gada nogalē tika pieņemti priekšlikumi emisiju kontrolei no sadedzināšanas iekārtām, kur noteiktas stingrākas robežvērtības iekārtām ar siltumenerģijas ražošanas jaudu 1–50 MW, kā arī jaunām iekārtām [75], [76].

Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrija 2020. gadā pilnveidoja “Gaisa piesārņojuma samazināšanas rīcības plānu 2019.–2030. gadam”, kur *PM* samazinājums ir viena no prioritātēm. Dokumentā piedāvātie rīcības virzieni, kas tieši attiecas, uz darbā izstrādāto un analizēto tehnoloģiju un tās nepieciešamību ir: emisiju samazināšana no sadedzināšanas iekārtām mājsaimniecību sektorā; nodokļu sistēmas pilnveidošanas ar mērķi veicināt gaisu piesārņojošo vielu (sēra dioksīda, nemetāna gaistošo organisko savienojumu, dažādu izmēru *PM*) samazināšanu [77].

PM sarežģītība ir galvenais iemesls zemajai izpratnei par *PM* un tam, ka *PM* ietekmes uz vidi novērtējums ir nepilnīgi definēts. Viens no lielākajiem piesārņojuma kontroles politikas izaicinājumiem ir gaiss, kas piesārņots ar smalkām putekļu daļiņām no dažādiem avotiem.

1.4. Siltuma un masas apmaiņa

Šķidrums un gāzes plūsmu mijiedarbības radīto siltuma un masas apmaiņu plaši izmanto dažādiem mērķiem, sākot no destilācijas iekārtām līdz dūmgāzu dzesēšanai. Vienlaikus siltuma un masas apmaiņas procesi ir sarežģīti, jo tajos iesaistīti mitruma kondensācijas un šķidrums iztvaikošanas procesi, kas savukārt saistīti ar vielas fāzu pārejas siltumu. Šo procesu uzlabošana paaugstina iekārtu efektivitāti un optimizē dizainu, izmaksas. Plūsmu īpašības un mijiedarbība vistiešāk ietekmē siltuma un masas apmaiņas norisi. Plūsmas var mijiedarboties arī dažādos virzienos – paralēli, pretplūsmā, šķērsplūsmā. Šādos gadījumos lietderīgi izstrādāt plūsmas režīmu kartes, lai atvieglotu iekārtas dizaina izveidi. Papildus var izstrādāt bezdimensiju parametrus, kas raksturo konkrētu procesa daļu, piemēram, iztvaikošanas entalpijas un gaisa entalpijas attiecību ūdens plēvītes apstākļos [78].

Konvektīvās siltuma un masas apmaiņas simulācijai starp šķidrums virsmu un gaisu izmanto skaitlisko izpēti. Izpētes rezultāti liecina, ka siltuma un masas apmaiņas koeficientu vērtības samazinās pie pieaugošas ūdens virsmas temperatūras, kā arī mainīgās gaisa īpašības (temperatūra, mitruma saturs) rada ievērojamu ietekmi uz siltuma apmaiņas koeficientu, bet niecīgu ietekmi uz masas apmaiņas koeficientu. Pie nelielām masas plūsmām, masas apmaiņas koeficientu iespējams iegūt no uz Čiltona–Kolburna (*Chilton–Colburn*) analogijas balstīta siltuma apmaiņas koeficienta vērtības [79].

Kondensācijas izpēte uz horizontālas caurules veikta gāzveida He, N₂ un CO₂ maisījumiem. Izstrādāts modelis kopējā kondensācijas apjoma noteikšanai, kas ņem vērā sūkņēšanu, miglas efekta veidošanos, maisījuma blīvuma un molekulas izmaiņas slānī. Process pārbaudīts arī eksperimentāli. Eksperimentālie novērojumi uzrāda, ka nekondensējamo gāzu klātbūtne maisījumā ievērojami samazina siltuma apmaiņas koeficientu [80].

Jauna dinamiskā tieša kontakta siltummaiņa dizainā īsas vertikālas caurules izmantotas kā siltuma un masas apmaiņas virsma. Veikta siltuma un masas apmaiņas procesu eksperimentālā izpēte vidēm – ūdens (16–55 °C) un atmosfēras gaisa. Gaisa ātrums bija intervālā 4–11 m/s, temperatūras diapazonā 11–18 °C, ar relatīvo mitrumu 63–88 %. Izpētes rezultātā iegūtas sakarības konvektīvās siltuma un masas apmaiņas aprēķinam Reinoldsa skaitļu (*the Reynolds number, Re*) diapazonā 9000–30 000, izmantojot gaisa Reinoldsa un Prandtla (*the Prandtl number, Pt*) vai Šmita (*the Schmidt number, Sc*) skaitļus. Noteicošais process ietekmējošais parametrs ir gaisa ātrums. Iekārtā iestrādāts stieplu tīkls, kas nodrošināja gaisa burbuļu veidošanos karstā ūdens slāņa šķērsgrīzumā. Ūdens slāņa izmaiņas neietekmēja gaisa burbuļu īpašības, savukārt to diametru izmaiņas atkarīgas no gaisa plūsmas ātruma. Sasniegtā iekārtas efektivitāte pie optimālā darbības režīma ir robežās no 0,7 līdz 0,9. Tā pielāgojama arī dūmgāzu dzesēšanai [81].

Efektīvi siltuma apmaiņas veidi ir iztvaikošana un kondensācija, kurā notiek fāzu maiņa. Šajā gadījumā procesu raksturo fāzu maiņas norises ātrums, kas savukārt ir saistīts ar masas pārnēs kinētiskajiem procesiem. Kondensācija ir process, kurā tvaiks pārvēršas šķidrumā. Kondensācijas norisei, nepieciešams novadīt siltumenerģiju no kondensējamās vielas ar dzesēšanas vielu, jārada temperatūru starpība starp tām. Ja tvaiks ir tīra viela, bez piemaisījumiem, nemainīga spiediena gadījumā kondensācija norit izotermiski. Ja procesa temperatūra sakrīt ar tvaika piesātinājuma temperatūru, tad sākas kondensācijas process un izdalās fāzu pārejas jeb latentais siltums. Tvaika maisījumu kondensācija veido līknes, jo

sākotnēji kondensējas smagākās maisījuma sastāvdaļas, bet pēc tam vieglākās, lēnām sasniedzot temperatūras kritumu maisījumā [82].

Kondensācija norit uz virsmas vai tilpumā. Uz virsmas kondensācija norit uz plēves, pilienu vai iekārtas iekšējām virsmām. Ja dūmgāzu nekondensējamās sastāvdaļas satur tīru tvaiku mazā apjomā, tiek ievērojami ietekmēts kondensācijas siltuma apmaiņas koeficients. Procesa analīzei var izmantot kinētikas teoriju, robežslāņa un difūzijas slāņa modeli kā difūzijas kustību, skaitliskos aprēķinus, sarežģītus fizikālos modeļus. Klasiskās tvaika kondensācijas hipotēzes:

- tvaiks ir ideāls;
- visas molekulas saskares slānī var iztvaikot vai kondensēties;
- iztvaikošana un kondensācija ir neatkarīgi procesi;
- pilienu veidošanās ir nevienmērīgs izsmidzināšanas process [83].

Realitātē iztvaikošana un kondensācija reti sakrīt ar šiem pieņēmumiem, tādēļ šīs novirzes raksturošanai izmanto iztvaikošanas un kondensācijas koeficientus [83].

Šķidrums pilienus noteiktā ātrumā iesmidzina karstākā gāzē. Starp pilieniem un gāzi norit siltuma apmaiņa, gāzē esošais tvaiks veido šķidrums slānīti uz pilieniem, palielinot siltuma plūsmas termisko pretestību. Slānītis ir niecīgs, tādēļ to parasti neņem vērā. Mijiedarbības rezultātā pieaug arī ūdens pilienu temperatūra [84]. Balstoties uz eksperimentu novērojumiem, izmantojot pilienu fotofiksāciju noteikts, ka piliena sākotnējā forma ir sfēra ar diametru, kas sakrīt ar sprauslas diametru. Kondensāta veidošanās uz piliena notiek lineāri, tā izmēram pieaugot kopā ar iesmidzināmā ūdens daudzumu. Apgriezts efekts novērots temperatūras starpībai uz piliena tilpuma augšanas ātrumu. Pieaugot tvaika plūsmas ātrumam, pieaug arī piliena tilpums (izmērs). Savukārt siltuma apmaiņas koeficients strauji samazinās [85].

Tieša kontakta siltuma apmaiņa norit, kad divas vielas ar dažādām temperatūrām saskaras. Šajā gadījumā jāņem vērā nosacījums, ka starp vielām nav šķirtņu, jo šādā veidā tiek panākta efektīva siltuma apmaiņa, ar mazām termiskās pretestības vērtībām. Tieša kontakta siltuma apmaiņas iekārtas ir ar zemākām izmaksām nekā netiešā kontakta. Galvenais iekārtas darbības nosacījums ir, lai abas vielas būtu pakļautas vienādam spiedienam. Tieša kontakta procesus ierobežo mijiedarbība starp kondensācijas latentu siltumu un reālo siltuma daudzumu, kuru spēj uzņemt šķidrums. Kondensācijai izmantotā šķidrums daudzums un tā uzsilšana mijiedarbības rezultātā nosaka sasniedzamo kondensācijas pakāpi. Nekondensējamu savienojumu klātbūtne procesā negatīvi ietekmē kondensāciju, veidojot nekondensējamu savienojumu slāni pie virsmas, kas kavē siltuma un masas apmaiņu, palielinātas pretestības dēļ. Šajā procesā pieaugs arī virsmas temperatūra, kas samazinās kondensācijas norisi [86].

Tvaika kondensācija tieša kontakta procesā norit tvaika un zemākas temperatūras šķidrums saskares rezultātā. Reālo kondensācijas ātrumu iegūst ar kopējo difūzijas ātrumu, siltuma un masas apmaiņas koeficientiem, fāzu saskares laukumu un temperatūru starpību starp tām. Tas parāda, ka iespējams paaugstināt tieša kontakta kondensatora efektivitāti, uzlabojot kādu no šiem parametriem [85]. Pilienuveida kondensācijas veidošanos ietekmē sekojoši mainīgie parametri: pilienu izmēru sadalījums, pilienu augšanas ātrums kondensācijas laikā un pilienu augšanas ātrums kondensācijas un saplūšanas ietekmē [84].

Atbilstoši Mačačkovas A. u.c. autoru (*A. Macháčková, et.al.*) pētījumam [87] pirmais posms tieša kontakta kondensatorā ir pilienu izveide, ko nodrošina ievadīšanas iekārta – uzgalis vai sprausla. Piliens ir sfēriskas formas un tā izmaiņas kondensācijas rezultātā, neņem vērā. Spēki, kas iedarbojas uz pilienu, ir: Arhimēda, inerces, gravitācijas spēks un virsmas spriegums.

Pilienu veida ūdens tvaika kondensācija norit vairākos posmos. Pirmajā posmā uz kondensatora iekšējo sienīņu virsmas izveidojas plāna kondensāta kārtā. Pēc tam, virsmas sprieguma rezultātā, šī kārtā sadalās pilienos. Pilienu mijiedarbības rezultātā rodas lielāka izmēra pilieni, līdz sasniegts kritiskais diametrs, kad tie sāk virzīties lejup. Jāatzīmē, ka siltuma apmaiņa pilienu veidā var būt līdz pat 80 reizēm spēcīgāka nekā ūdens slāņa veidā, lai gan enerģētikas nozarē visvairāk izmantoti kondensatori, kas nodrošina kondensāciju tieši ar ūdens slāņiem [87].

Iekārtu ražotāju interesēs ir nodrošināt pēc iespējas efektīvāku kondensācijas procesa norisi, lai optimizētu izmaksas un piedāvātu patērētājiem kvalitatīvāku produktu. Pilienuveida kondensācijai piemērotākās funkcionālās virsmas ir: gludas un hidrofobas; mikro un nanostruktūras superhidrofobas; bifiliskas (*biphilic*) ar sistemātisku mitrināšanas iespēju; pārklātas ar lubrikantu. Šādas virsmas ir grūti nodrošināt lietošanai industrijā. Citi faktori, kas jāņem vērā virsmām, kas paredzētas izmantošanai industrijā, ir: toksiskums; saderība ar kopējo tvaika sistēmu; uzturēšana; nepieciešamās investīcijas [88].

Siltuma zudumi ar aizejošajām dūmgāzēm sastāda aptuveni 20 % no degšanas procesā iegūtās enerģijas. Šos zudumus var samazināt uz pusi, izmantojot kondensatorus dūmgāzu dzesēšanai un attīrīšanai. Iekārtā dūmgāzu temperatūru samazina līdz ūdens tvaika rasas punkta temperatūrai, tādējādi atgūstot siltumenerģiju no dūmgāzēm un ievērojami paaugstinot degšanas iekārtu efektivitāti. Kondensatorā novērojama ne tikai siltuma, bet arī masas apmaiņa [89]. Masas apmaiņa ir tās pārvietošanās no viena punkta uz citu. Tā raksturo vielu kustību mijiedarbības rezultātā. Tā var notikt vienā vai vairākās fāzēs. Masas apmaiņa ietver vismaz vienu plūstošu fāzi, kas ir gāze vai šķidrums. Vielu masas apmaiņa galvenokārt notiek vienlaikus ar ķīmiskajām reakcijām [90].

Pētījumi pierādījuši, ka konvektīvās kondensācijas iekārtās siltuma apmaiņas koeficients ir augstāks, nekā iekārtās bez kondensācijas, tāpat noteicošs faktors ir kondensatorā izmantotā iesmidzināmā ūdens kvalitāte. Kondensatoru izmantošana šobrīd ir aktuāla iekārtās, kurās kā kurināmais tiek izmantota dabasgāze, jo tās dūmgāzes satur vairāk mitruma un rada mazāku korozijas risku. Korozijas risks ir viens no galvenajiem iemesliem kondensatoru bojājumiem, tādēļ ir svarīgi izmantot iekārtas, kas izgatavotas no nerūsējošā tērauda vai pārklātas ar teflonu, augstas termiskās izturības stiklu [89].

Z. Vanga (*Wang Z., et.al.*), u. c. autoru [91] pētījumā aplūkota atvērta tipa absorbcijas sistēma, kas ir paredzēta siltuma atgūšanai no kurināmā sistēmas, izmantojot karstās dūmgāzes kā papildus enerģijas avotu. Šķidrāis absorbents sistēmā atrodas pildītajā slānī, kas uzņem "lieko" siltumu un mitrumu, ko satur dūmgāzes. Uztvertie materiāli tiek reģenerēti, izmantojot augstākas temperatūras dūmgāzes. Saražoto ūdens tvaiku, pēc siltuma atdeves kondensē un atgriež atpakaļ sistēmā kopā ar citām kondensētā ūdens daļām. Balstoties uz spiedienu starpību starp mitrām dūmgāzēm un šķidro absorbentu, panākts ka siltuma atgūšanas sistēmas efektivitāti neietekmē dūmgāzu rasas punkts, sniedzot iespēju sildīt ūdeni ar augstāku temperatūru nekā tradicionālajos kondensācijas katlos [91].

1.5. Siltuma un masas apmaiņas procesu modelēšana

Matemātisko modelēšanu iespējams izmantot dažādu problēmu risināšanai, piemēram, ideālo konstrukcijas izmēru noteikšanai vai iekārtu darbības paredzēšanai. Tā var nodrošināt nepārtrauktu un atsevišķu procesu analīzi laikā un telpā. Siltuma apmaiņas gadījumā procesus uzskata par nemainīgiem un haotiskiem, bezdimensionāliem, vienas, divu vai trīs dimensiju ģeometriskiem, cilindriskiem, sfēriskiem, u.t.t. Siltuma apmaiņas problēmu atrisināšanai ir sekojoši soļi:

- 1) fiziskās problēmas matemātisks raksturojums;
- 2) matemātisks problēmas risinājums, ņemot vērā dažādus iespējamus veidus (analītiskie jeb aprakstošie un skaitliskie risinājumi);
- 3) rezultātu analīze un interpretācija. Dažos gadījumos, jo īpaši pie jaunām un sarežģītām problēmām, nepieciešami vairāku eksperimentu rezultāti, lai novērtētu matemātiskās modelēšanas atbilstību konkrētajai problēmai [92].

Aprēķina modeļi var būt kļiedētu parametru, kur parametri mainās visā iekārtas garumā, iespējams arī laikā, un vidējo parametru, kur tie pieņemti nemainīgi visā iekārtas garumā. Procesu analīzei var izmantot dažāda veida modeļus, piemēram, dimensiju modeļus procesu raksturošanai konkrētā sistēmā. Modelēšanas gadījumā liela nozīme ir aplūkotajai problēmai vai tehnoloģijai, tās raksturīgajiem parametriem, procesiem. Tikai pareiza problēmas definēšana un raksturošana sniegs kvalitatīvus rezultātus.

1.5.1. Modeļu veidi, piemēri

Joprojām novērojams padziļinātas izpratnes trūkums par siltuma un masas apmaiņas procesiem, to spēcīgās nelineārās saiknes dēļ. Pateicoties datorprogrammu attīstībai un skaitliskajai metodikai, detalizēti matemātiskie modeļi parametru pētījumiem sniedz piemērotu alternatīvu. Piemērs dimensiju modeļiem atrodams pētījumā [93], kurā izstrādāts detalizēts trīsdimensiju ($3D$) un vienkāršotas vienas dimensijas ($1D$) modelis. Tas ietver skaitlisko prognozi siltuma un masas apmaiņai $3D$ gāzes kanālā ar poraina adsorbenta pārklājumu.

Siltuma un masas apmaiņa porainā adsorbentā literatūrā nav detalizēti aprakstīta. Dažos pētījumos mēģināts ņemt vērā lokālo siltuma un masas difūziju adsorbentā pie divdimensionāla porainuma vidējā lieluma. $3D$ modelēšana šādam pielietojumam īpaši netiek aplūkota. Skaitliski ir pētīta īslaicīgu siltuma un masas apmaiņas procesu norise heksagonālās caurulēs, neņemot vērā aksiālos siltuma un masas apmaiņas procesus gāzes caurulē un adsorbenta difūzijas ātrumu sienīnā [94].

Viena no problēmām detalizētā $3D$ skaitliskajā simulācijā ir precīza cietas vielas – šķidrums apmaiņas mijiedarbības attēlošana, kuru raksturo ar Nuselta (*the Nusselt number, Nu*) un Šērvuda (*the Sherwood number, Sh*) skaitļiem $1D$ modeļa gadījumā. Izmantotās Nu skaitļa vērtības parasti ir balstītas uz konstantu vai vienmērīgu temperatūru sienīnā robežslānī vai nemainīgu siltuma plūsmu sienīnā robežslānī. Taču jāpiemin, ka gāzes caurules un adsorbenta saskares virsmai nav ne nemainīga temperatūra, ne siltuma plūsma, ja tāda situācija ir arī praktiskā sistēmā. Šādi nosacījumi var samazināt $1D$ modeļa ticamību [93].

Sarežģītām un rievotām caurulēm, nemainīgas temperatūras vai siltuma plūsmas apstākļos, Nu skaitļi var nebūt pieejami literatūrā un bieži vien ir grūti aprēķināmi. Konvektīvas siltuma apmaiņas gadījumā, ar sarežģīti veidotām caurulēm jāveic papildus darbs Nu skaitļa aprēķinam,

īstenojot eksperimentus, vai detalizētas skaitliskās simulācijas. Vēl viens *ID* modeļa trūkums ir nespēja atšķirt dažādas ģeometrijas, kas samazina tā funkcionalitāti ģeometriskās optimizācijas gadījumā. Tādēļ, detalizēta *3D* skaitliskā adsorbcijas un desorbcijas procesu modelēšana ir aktuāla ģeometrijas un sistēmas optimizācijai, veicot padziļinātu parametru izpēti. Tas ir arī atbilstošs rīks, lai izvērtētu pielietojuma robežu vienkāršākiem modeļiem [93].

ID un *3D* siltuma un masas apmaiņas modeļi salīdzināti iztvaikošanas dzesēšanas sistēmai, kas balstās uz pretplūsmas un rāsas punkta principiem. *ID* modelis izveidots, balstoties uz literatūrā plaši izmantotiem vienkāršiem pieņēmumiem. Savukārt *3D* modelis izstrādāts ņemot vērā procesu nepārtrauktību, inerci, vielas un enerģijas pārvietošanās vienādojumus. Papildus sarežģītajā modelī ietvertas ātruma, temperatūras, mitruma satura izmaiņas visos trīs plūsmas virzienos. Ņemta vērā arī kondukcija, virsmas un ūdens temperatūru starpība. Modeļi validēti ar eksperimentos iegūtajiem datiem. Iegūtā rezultātu precizitāte ir 10 % un 8,5 % attiecīgi *ID* un *3D* modelim. Tā kā *3D* modelis ir sarežģītāks un tam nepieciešami papildus resursi un ilgāks laiks parametru aprēķinam, precizitātes uzlabojums ir neliels. Šo iemeslu dēļ *ID* modelis ir atzīstams par piemērotāku dzesēšanas sistēmas darbības analīzei [95].

COMSOL Multiphysics ir datorprogramma, kas paredzēta skaitliskai fizikālo procesu modelēšanai, ietverot iespēju rēķināt siltuma un šķidrums pārnese, elektriskās, mehāniskās un ķīmiskās problēmas. Piemēri tās lietojumam siltuma un masas apmaiņas procesu modelēšanai ir atrodamī literatūrā. Inženierijas vienādojumu risinātājs (*Engineering Equation Solver, EES*) ir iteratīvs algebrisko vienādojumu risināšanas rīks, kas ietver lielu datubāzi ar materiālu īpašībām, tai skaitā termiski–fizikālās īpašības un siltuma apmaiņas korelācijas [96].

Jauna uz dzesētāju balstīta baterijas siltuma pārvaldības sistēma elektriskajiem automobiļiem piedāvāta, modelēta, simulēta un analizēta pētījumā [96]. Izstrādāts *ID* elektroķīmiskais modelis, kurā integrēts *3D* siltuma un masas apmaiņas modelis. Piedāvātās baterijas dzesēšanas sistēmas efektivitāte novērtēta pēc tās modelēšanas un simulācijas *COMSOL Multiphysics* un *EES*. Vārīšanās korelācijas un materiālu īpašības ievietotas *COMSOL Multiphysics* no *EES*. Abu programmatūru apvienojums atļauj dzesēšanas materiāla īpašību un eksperimentāli iegūto vārīšanās korelāciju izmantošanu. Izmantojot *EES* korelācijai, jāuzlabo rezultātu precizitāte un jāsamazina nepieciešamais aprēķina laiks. Izstrādātie modeļi validēti ar datiem, kas pieejami literatūrā [96].

MATLAB ir augsta līmeņa programmēšanas valoda un interaktīva vide skaitliskajiem aprēķiniem, vizualizēšanai un programmēšanai. Parametriskā izpēte [32] veikta sistēmiskā veidā, izmantojot detalizētu *3D* modeli, kurā materiālu īpašību ietekme un ģeometrija par mitruma adsorbcijas darbību ir sīki izstrādāta. Modeļa vienādojumi ir iekļauti galīgo elementu bāzes platformā programmā *COMSOL Multiphysics 4.4*. *MATLAB* iekšējie kodi izstrādāti, lai pārvaldītu laikā mainīgus cikliskus ieejas–izejas robežnosacījumus. Vienlaicīgi notiekošie siltuma un masas apmaiņas procesi aplūkotajos gadījumos ir analizēti izmantojot apvienotā *3D* modeļa priekšrocības, kas padziļina izpratni par tik nelineāriem un sarežģītiem procesiem [32].

Pētījumā [97] izstrādāta siltumenerģijas adsorbcijas sistēmas optimizācija un novērtējums. Sistēmā integrēts adsorbcijas siltuma uzglabāšanas modulis tradicionālā Saules enerģijas sistēmas karstā ūdens akumulācijas tvertnē, kas darbojas ar silikagela/ūdens adsorbcijas pāri. Sistēma modelēta, izmantojot *TRNSYS* un *MATLAB*, tā iepriekš novērtēta un uzlabota ar parametru testu kopu katrai galvenajai komponentei. Šajā pētījumā izmantota *GenOpt* optimizācijas programma, lai iegūtu optimālos darbības parametrus visai sistēmai. Adsorbcijas

sistēmas modelis izstrādāts *MATLAB*, un mijiedarbojas ar Saules enerģijas sistēmu, izmantojot *TRNSYS*. *GenOpt* izmantota, lai kopā novērtētu dažādu komponentu radīto ietekmi uz siltumenerģijas uzglabāšanas adsorbcijas sistēmas darbību, mijiedarbojoties uz sistēmas dinamisko simulāciju un pielāgojot tai galveno parametru kopu. Tas dod iespēju īstenot labāku sistēmas kopējās optimālās darbības novērtējumu un sniedz labāku izpratni par tās sastāvdaļu dinamiku, kā arī sistēmas darbību dažādās vietās/klimatiskajos apstākļos [97].

Saules enerģijas sistēma modelēta izmantojot *TRNSYS17* simulācijas rīku ar modulāru struktūru, sadalot sistēmu sastāvdaļu kopās, modelēšanai izmantojot matemātiskos vienādojumus, kas programmēti *FORTRAN*. Modelis adsorbcijas modulim (adsorbents, kondensators, otrreizējā ūdens tvertne un iztvaikotājs) izveidots *MATLAB*, un *TRNSYS* karstā ūdens uzglabāšanas tvertne pārveidota, lai tajā būtu integrēts adsorbents, izmantojot priekšrocību starp *TRNSYS* un *MATLAB* programmu mijiedarbības īpašībām [97].

Pētījumā [98] izveidots kondensatora, cauruļvadu un cirkulācijas sūkņa matemātiskais modelis, kas atvasināts no masas un enerģijas saglabāšanas principiem. Tajā izmantoti jauni ūdens un dzesētāja siltuma apmaiņas koeficienti, kas ir verificēti. Izveidots jauns entalpijas vienādojums dzesētāja pārkarsētajam tvaikam eksponenciālās progresijas formā. Izmantotā skaitliski–grafiskā metode modeļa atrisināšanai ir uzticama un precīza. Piedāvātais process ārējo siltuma apmaiņas ietekmes efektu izpētei siltumsūkņa blakus sistēmas kondensatorā ir atbilstošs metodei. Simulācijas process sniedz iespēju visaptverošai un detalizētai sistēmas izpētei bez ierobežojumiem. Visi izmantotie vienādojumi ir algebriski, nelineāri un saistīti modelī. Vienādojumu sistēmas atrisināšanai izmantotas Ņūtona–Teilora linearizācijas (*Newton–Taylor linearization*) un Gausa izslēgšanas (*Gauss elimination*) metodes. Tādejādi iegūti rezultāti skaitliskā formā un tie atspoguļoti grafikos. Grafiku veidošanas programma ir ļoti elastīga un ļauj rotēt figūras telpā un izmantot dažādas krāsas, burtus, ciparus, u.t.t. [98].

Mazāk aplūkota ir kondensatoru uzvedība kā siltumsūkņu sastāvdaļai. Galvenokārt pētīti procesi kondensatorā siltuma apmaiņas gadījumā. Pētījumā [99] izstrādāts jauns *2D* matemātiskais modelis stacionārai siltuma apmaiņai siltummaiņa plāksnēm, kuru iespējams izmantot arī kondensatoram. Tas ir ar izklidētiem parametriem. Kondensatora darbība pētīta iekšējās robežās. Pētījumā aplūkota konstrukcijas detaļu ietekme uz siltuma apmaiņu plātņu kondensatorā. Ārējās ietekmes uz kondensatora darbību netika aplūkotas. Cēzars Pacio (*Cesar Pacio*) u. c. [100] izveidojis apskatu par publicētajiem rakstiem, kas saistīti ar plātņu iztvaikotājiem un kondensatoriem, kurus izmanto dzesēšanas sistēmās. Darbā noteikti matemātiskie modeļi, procedūras modeļu atrisināšanai un sniegts apskats par matemātisko modeļu iespējamajiem trūkumiem.

Tiešā kontakta kondensatora ar īslaicīgu trīs fāzu stāvokli īpašības teorētiski, un eksperimentāli pētītas darbā [101], izmantojot īso Perspeksa kolonnu (*Perspex column*) ar 48 cm aktīvo augstumu un 4 cm iekšējo diametru. Pentāna tvaiks ar mainīgu sākuma temperatūru un dzeramais ūdens ar nemainīgu temperatūru tika pētīti kā attiecīgi dispersa un nepārtraukta fāze. Izstrādāts teorētiskais modelis, lai paredzētu nepārtrauktās fāzes gala temperatūru izvadā, un tas skaitliski atrisināts *MATLAB* vidē. Tiešā kontakta kolonnā mērīts laikā mainīgās temperatūras sadalījums, pētīta masas plūsmas ātruma attiecība un sākotnēji izklidētās fāzes temperatūra. Eksperimentu rezultāti uzrāda, ka nepārtrauktās fāzes temperatūra tiešā kontakta kolonnā ar laiku paaugstinās. Esošā teorētiskā modeļa un eksperimentu dati uzrāda labu sakritību [101].

Pētījumā [102] piedāvāts vienkāršots un precīzs dinamiskais mitruma adsorbenta atjaunošanas sistēmas (*desiccant regeneration system, DRS*) modelis, kas, no kontroles viedokļa, balstās uz enerģijas un masas bilances principiem. *DRS* sistēma sastāv no cauruļu siltummaiņa un reģeneratora. Katras apakšsistēmas dinamiskais modelis ir izstrādāts atsevišķi, un, analizējot siltuma un masas apmaiņas mehānismu, siltuma un masas apmaiņas ātrums ir aprēķināts, izmantojot ε -*NTU* (siltuma apmaiņas vienību skaita efektivitāte, *NTU* – *number of heat transfer units*, ε – efektivitāte) un hibrīdās modelēšanas metodes [102].

Piedāvātais dinamiskais modelis satur 10 nezināmus modeļa parametrus, kurus nosaka ar kombinēto nelineāro kvadrātu metodi un bez atvasinājumu kalmaņa filtra algoritmu (*unscented kalman filter algorithm*) ar eksperimentālajiem datiem. Tiklīdz ir noteikti parametri, jaunajam modelim iepriekš nav nepieciešams noteikt sarežģītu ģeometrisko informāciju, šķidrumu termodinamiskās īpašības un veikt iteratīvos aprēķinus, jo izejas dati tiešā veidā noteikti pēc ievades datiem. Piedāvāto modeli viegli pārveidot laika un telpas modelī. Validācijas rezultāti pierāda, ka modeļa aprēķini esošajā situācijā un prognozēs sakrīt ar eksperimentālajiem datiem, pie dažādiem darbināšanas apstākļiem. Izstrādāto modeli iespējams izmantot *DRS* darbības uzlabošanai nākotnes pētījumos. Modelēšana veikta *MATLAB* vidē [102].

Tvaika–šķidruma fāzu maiņas process aktīvi pētīts gan akadēmiskajā vidē, gan industrijā. Tas ir nozīmīgs iztvaikotājos, katlos un kondensatoros. Šķidruma tilpuma metode plaši lietota daudzfāzu plūsmu modelēšanai, kurā tvaika–šķidruma saskares virsmu nosaka, izmantojot tilpuma daļas saglabāšanu. Lī (*Lee*) metodi plaši izmanto iztvaikošanas–kondensācijas procesu modelēšanai. Modelis veidojies no molekulārās kinētikas teorijas. Tas definē fāzu mijiedarbības nosacījumus pēc temperatūras novirzes no piesātinājuma temperatūras. Ar Lī modeli, siltummaiņu dizains, īpaši dzesēšanas iekārtām, sasniedzis būtisku progresu dažādu cauruļu darbības un veiktspējas prognozēšanā [103].

Energy2D programma ir interaktīva, vizuālās fizikālo procesu simulācijas programma, kas modelē trīs siltuma apmaiņas veidus – kondukciju, konvekciju un radiāciju, un to saistību ar daļiņu dinamiku. *Energy2D* darbojas ātri, tā ir bezmaksas un brīvi pieejama. Tā izslēdz pārslēgšanos starp pirmsapstrādes procesiem, skaitļotājiem un pēcapstrādes procesiem, kas parasti ir nepieciešami, lai veiktu plūsmu dinamikas simulācijas datorprogrammās. Šī funkcija ļauj izveidot skaitliskus datorsimulācijas eksperimentus, lai pārbaudītu zinātniskās hipotēzes vai atrisinātu inženierzinātņu problēmas bez sarežģītu matemātisko vienādojumu izmantošanas. Programma tiek uzlabota, lai tajā varētu izmantot citus enerģijas pārveides veidus (piemēram, fāzu maiņas un ķīmiskās reakcijas, izmantojot Stefana nosacījuma palīdzību), lai atbalstītu dažādus vielu veidus (piemēram, gaisu un ūdeni), un, lai nodrošinātu sensoru mijiedarbību, jauktas realitātes pielietojumu radīšanai. Kondukcijas daļa *Energy2D* modelī ir ar augstu precizitāti, bet konvekcijas un radiācijas daļas nav 100% precīzas. Tas norāda, ka konvekcijas un radiācijas gadījumos, *Energy2D* modeļa rezultāti jāuztver par kvalitatīviem [104].

Dūmgāzu mitrā dzesētāja darbības izpratnei izstrādāts vienkāršs *1D* matemātiskais modelis, kurš validēts ar eksperimentu rezultātiem [105]. Modelis raksturo iekārtas enerģijas un masas bilances. Simulācijas rezultāti sniedz iespēju noteikt galvenos dzesētāju ietekmējošos parametrus – ūdens caurplūdi un temperatūru, dūmgāzu mitruma saturu. Modelis papildus iestrādāts arī *ASPEN Plus* modelī, kas raksturo koģenerācijas stacijas darbību un dzesētāja ietekmi uz to. Modelī veiktie pieņēmumi ir:

- dūmgāzu un ūdens pilienu īpašības mainās vertikālā virzienā;

- siltuma zudumi caur dzesētāja sienām nav ņemti vērā, jo tie ir niecīgi;
- ūdens pilienā neeksistē temperatūras gradients;
- dūmgāzu maisījums ūdenī ir neievērojams;
- dūmgāzu un ūdens pilienu īpašības horizontālā virzienā ir viendabīgas un nemainīgas;
- ūdens pilienu ātrums ir nemainīgs katrā iekārtas elementā (noteikta izmēra posmā).

Vienādojumi pielāgoti katram elementam. Koģenerācijas stacijas modelis sadalīts trīs galvenajās daļās: katls, kurā norit biomasas degšanas process, kam seko siltuma atgūšana un tvaika ražošana; tvaika turbīnas cikls; dūmgāzu dzesētājs un kondensācijas daļa. Procesā uzmanība vērsta uz gāzveida piesārņotāju samazināšanu [105].

Python modelēšanas valoda

Python ir brīvpieejas no platformas neatkarīga, uz objektu orientēta un universāla programmēšanas valoda, kas ir ātrāka un sasniedz augstākas klases rezultātus, salīdzinot ar *Java* vai *C* programmēšanas valodām. Tā ieguvusi popularitāti pēdējo gadu laikā, plašā pielietojuma un padziļinātās sintakses dēļ. Programma nodrošina kompaktāku problēmas attēlošanu, tādējādi samazinot modeļa izstrādes laiku un uzturēšanas izmaksas. Plaša pamata bibliotēka un vairāki tūkstoši papildus bibliotēku nodrošina programmu izstrādātājus ar augstas kvalitātes risinājumiem, kurus viegli iekļaut esošās sistēmās, lai sasniegtu praktiski jebkuru mērķi [106].

Python izmantots punktveida defektu īpašību aprēķinam. Izstrādāts uz *Python* balstīts defektu analīzes rīks (*PyCDT*), lai veiktu defektu aprēķinus kopā ar plaši izmantotām blīvuma funkcionālās teorijas programmām. Rīks sniedz piekļuvi materiālu datubāzei, kas ļauj analizēt iespējamus punktveida defektus dažādiem materiāliem, lai noteiktu to novēršanas un ierobežošanas iespējas pusvadītājos un izolatoros [107]. *SAMT2* savukārt ir uzlabots telpiskās analīzes un modelēšanas rīks *Python* moduļa veidā. Šī forma padara rīku plaši izmantojamu – viegli pielāgojamu un uzlabojamu, bez izmantoto datu tipu izmaiņām [15].

Python programmēšanas valodu izmanto kā nenoteiktību analīzes rīku vides modelēšanā. To iespējams vienkārši un efektīvi izmantot, lai analizētu nenoteiktības sistematizētām apgrieztām problēmām. Izveidoto struktūru sauc par *pyEMU* un modelis balstās uz Beijesa lineāro teoriju (*Bayes linear theory*) jeb lineāru pirmās pakāpes, otrā mirkļa nenoteiktības analīzi, ietverot uzlabotu lietotāju pusi. Modelis izstrādāts ar mērķi uzlabot resursu pārvaldību ar papildus nenoteiktību analīzēm. Oriģināli tas izstrādāts gruntsūdeņu analīzei, bet to iespējams pielāgot dažādām vides sistēmām, ja modeļa darbībai izmanto teksta failus un rezultātus var nolasīt no failiem, bez papildus apstrādes. Aprēķinus pārraksta programmas kodā. Parametru un nenoteiktību noteikšanas laiks izveidotajā modelī gadījumam ar 1000 novērojumiem un 1000 parametriem aizņem vien dažas sekundes. Iteratīva procesa izpētes gadījumā, kurā meklē tuvāko atbilstošo novērojumu, aprēķinu veic atkārtoti pat tūkstošiem reižu, kas noteikšanas laiku pagarina līdz stundai vai vairāk [108]. Teksta datņu izmantošana un iteratīvs aprēķinu process ir nozīmīgs arī šajā darbā izstrādātā modeļa gadījumā.

Python ietver rezervēto vārdu krājumu, ar attiecīgu komandu programmā. Šie vārdi ir: *and, as, assert, break, class, continue, def, del, elif, else, except, False, finally, for, from, global, if, import, in, is, lambda, None, nonlocal, not, or, pass, raise, return, True, try, while, with, yield, async, await*. Veiksmīgai programmas izveidei, jānodrošina precīza koda izveide, bez liekām novirzēm un neuzmanības kļūdām – pat lieka atstarpe, datu ievadīšanas laikā, var radīt programmas kļūdu un aizkavēt tās izpildi [109].

Programmas objekti (operatori), kas nodrošina matemātisku darbību izpildi programmā, ir: saskaitīšana (+), atņemšana (-), reizināšana (*), dalīšana (/) un eksponentfunkcija (**). Matemātiskās izteiksmes ir vērtību, mainīgo un operatoru kombinācija, kas sniedz rezultātu. Izteiksme var būt arī viena vērtība. Ja izteiksmē izmantoti vairāki operatori, tās risinājums norit atbilstoši prioritātes noteikumiem – iekavas, eksponentfunkcija, reizināšana un dalīšana, saskaitīšana un atņemšana, vai rindas kārtībā pie vienādiem operatoriem. Vēlamās izpildes secības saglabāšanai labāk izmantot iekavas. Paskaidrojumu ietveršanai programmā, izmanto komentārus, kuru sākumu apzīmē ar # simbolu. Komentāru programmas izpildē neņem vērā, un tas ietver informāciju līdz rindas beigām. Iterācijas gadījumos īpaši nozīmīgas ir *while* un *for* komandas. Tās nodrošina aprēķina ciklisku atkārtotāšanu līdz brīdim, kad izpildās uzstādītie priekšnosacījumi. Pēc priekšnosacījuma izpildes, programma turpinās kā paredzēts [109].

Literatūras apskata secinājumi

1. Mājsaimniecības ir nepilnīgi apzināts *PM* piesārņojuma avots, kuru šobrīd likumdošana praktiski nekontrolē. Tāpat arī nav izstrādāts ekonomiski izdevīgas un efektīvas iekārtas mazas jaudas katlu dūmgāzu attīrīšanai.
2. Karstu piesārņotu gāzu plūsmu attīrīšanā no *PM* tieša kontakta aparātos vienlaikus notiek daļiņu uztveršana uz iesmidzinātā ūdens pilieniem un siltuma un masas pāreja starp pilieniem un karstām piesārņotām gāzēm.
3. Šobrīd maz pētītas raksturīgo parametru izmaiņas kondensatora iekšienē, dūmgāzu dzesēšanas un attīrīšanas procesa laikā.
4. Ūdens saņemto siltumu ir lietderīgi izmantot mājsaimniecību vajadzībām. Tādā veidā palielinot ne tikai iekārtas, bet kopējās apkures un siltā ūdens sagatavošanas sistēmas energoefektivitāti.
5. Nav pētīta *PM* ietekme uz siltuma un masas pārneses procesiem. Modelēšanas procesos galvenokārt aplūkota kopējās siltuma un masas apmaiņas plūsmā, kā arī analizēta gāzveida piesārņotāju atdalīšana no dūmgāzēm.

2. EKSPERIMENTI MIGLAS APARĀTA DARBĪBAS ANALĪZEI

2.1. Miglas aparāta eksperimentālais stends

Miglas aparāta (MA) eksperimentālo stendu veido piecas daļas: cietā kurināmā katls, MA reaktors, dūmvads dūmgāzu pievadīšanai un izvadīšanai ar mēriekārtu pieslēgumiem, hidrauliskā sistēma un pulpas tvertne. Eksperimentālā stenda izgatavošanas laikā veikta atsevišķu prototipa daļu testēšana laboratorijas vidē, kas nodrošina, ka izveidotā stenda sastāvdaļas ir piemērotas lietošanai sistēmā, un var nodrošināt pamatfunkcijas – samazināt *PM* koncentrāciju dūmgāzēs un paaugstināt katla energoefektivitāti. MA ir uzstādīts aiz cietā kurināmā katla, un tam ir korpuss, izsmidzināšanas sprausla, dūmgāzu ievads un izvads, pulpas tvertne, ūdens pievadcaurule un atdalītājs. Iekārtas apakšā, cilindriskajā daļā, ir izvietots dūmgāzu ievads, pie kura pievienots katla dūmvads. Tas atrodas virs pulpas tvertnes. Tvertne novietota zem MA un nodrošina pulpas savākšanu pēc izsmidzinātā ūdens kontakta ar cietajām daļiņām. Dūmgāzes, nonākot iekārtas korpusā, virzās uz MA augšējo daļu, kur atrodas dūmgāzu izvads un ūdens pievadcaurules. Pievadcaurules galā atrodas sprausla, caur kuru ūdeni iesmidzina aparātā. Viss kondensatora reaktors ir noklāts ar siltumizolācijas materiālu, lai samazinātu iekārtas siltuma zudumus apkārtējā vidē (2.1. att.).



2.1. att. MA eksperimentālajā stendā
(A – MA tuvplānā; B – MA no katla puses).

Iekārtas darbība balstās uz ūdens iesmidzināšanas rezultātā izveidotu sīku pilienu slāņa jeb miglas zonu. Šajā zonā iesmidzinātais ūdens sajaucas ar pretī plūstošajām dūmgāzēm, notiek siltuma apmaiņa starp dūmgāzēm un iesmidzināto ūdeni, kā arī, ar pilienu palīdzību tiek uztvertas *PM*, ko novada uz pulpas tvertni. Ūdens un *PM* maisījumam nonākot pulpas tvertnē, ūdeni attīra ar nogulsnēšanās metodes palīdzību un *PM* uzkrājas tvertnes apakšā.



2.2. att. Pulpas tvertne MA sistēmā.

Pirms MA atrodas granulu katls *Grandeg Bio-25*. Tas darbojas nemainīgā režīmā, nodrošinot vienmērīgu saražotā siltuma un dūmgāzu daudzumu. Katls savienots ar MA, izmantojot dūmvadu, kurā izveidoti vairāki pieslēgumi mērinstrumentu sensoriem – dūmgāzu analizatoram *Testo 350*, higrometram, temperatūras sensoriem un diferenciāla spiediena mērītājam. Dūmvadā papildus ir izveidots pieslēgums *PM* mērīšanas zondes ievietošanai.



2.3. att. Granulu katls *Grandeg Bio-25*.

Pēc MA ir pievienots dūmvads attīrīto dūmgāzu novadīšanai uz skursteni un pēc tam apkārtējā vidē. Dūmvadā uzreiz pēc MA ir ievietotas metāla skaidiņas, kas aizkavē ūdens pilienu nokļūšanu un nosēšanos dūmvados ārpus MA. Tajā ir izvietoti pieslēgumi temperatūras sensoram, higrometram, diferenciālā spiediena mērītājam, kā arī *PM* mērīšanas iekārtas zondei. Augšdaļā aiz MA skursteņa ir izvietots dūmsūcējs, lai nodrošinātu nepieciešamo vilkmi dūmgāzu izvadīšanai caur iekārtu.



2.4. att. Dūmvads un mēriekārtu pieslēgumi pēc MA.

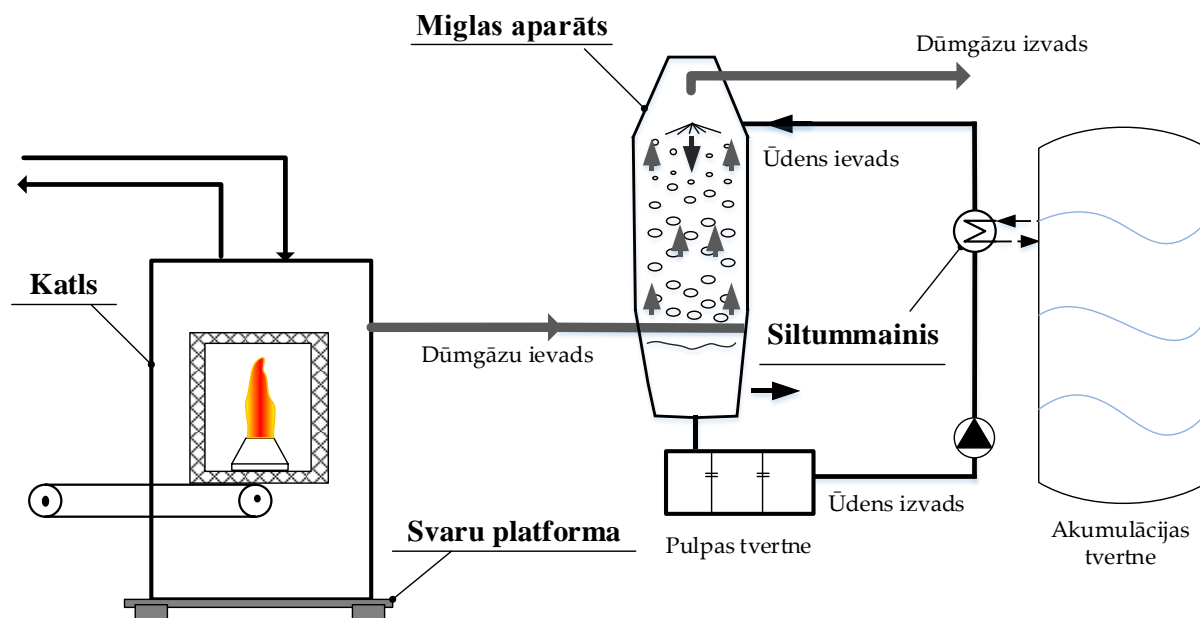
Caur MA nodrošināta nepārtraukta ūdens cirkulācija, izmantojot izveidoto hidraulisko sistēmu. Hidrauliskā sistēma sastāv no ūdens pievadcaurulēm, stiprinājumiem un pārejām. Caurulēs vairākās vietās ir izveidoti pieslēgumi, kur atrodas manometri, ūdens plūsmas mērītāji, atgaisotājs un temperatūras sensori. Ar hidrauliskās sistēmas un sprauslu palīdzību ūdens nonāk MA, tad no MA, ūdens ar uztvertajām *PM* nonāk pelnu pulpas tvertnē. Ar cirkulācijas sūkņa palīdzību ūdens no pelnu pulpas tvertnes nonāk siltummaiņā, kura mērķis ir atgūt siltumu no ūdens, kas cirkulē caur MA, lai iesmidzinātā ūdens temperatūra saglabātos vienāda. Siltumu, kuru ar MA cirkulējošo ūdeni atgūst no dūmgāzēm, novada akumulācijas tvertnē. Akumulācijas tvertne ir savienota ar ūdens loku, kas, pateicoties siltummaiņam, nodrošina ūdens cirkulāciju caur MA. Akumulācijas tvertnes tilpums ir 500 l. Cirkulācijas sūknis ir aprīkots ar frekvenču pārveidotāju, ūdens caurplūdes regulācijai. Pēc siltummaiņa ūdeni padod atpakaļ uz MA.

Ūdens ar *PM* piejaukumiem var kaitēt sūknim, kuru izmanto cirkulācijas nodrošināšanai, radot būtisku bojājumu riskus. Papildus, piesārņots ūdens nespēj tikpat efektīvi uztvert *PM* kā tīrs ūdens. Ūdens attīrīšanai paredzētā pulpas tvertne sastāv no nelielas metāla kastes, kas, ar metāla plāksņu palīdzību ir sadalīta trīs daļās. Katrai atdalošajai plāksnei, kas atrodas pulpas tvertnes iekšienē, vidū ir izurbts caurums, lai nodrošinātu ūdens aizplūšanu no vienas tvertnes puses uz otru. Tālāk ūdeni ar cirkulācijas sūkņa palīdzību novada atpakaļ uz MA. Visvairāk *PM* nogulsņējas pirmajā tvertnes daļā, vismazāk – pēdējā pulpas tvertnes daļā.

Paralēli MA izstrādei noritēja arī jaunas ūdens ar *PM* jeb pelnu pulpas attīrīšanas iekārtas izstrāde un pilnveide. Sākotnējais nostādināšanas tvertnes risinājums aizstāts ar kompakto *PM* nostādinātāju. Tā ir jauna un efektīva tehnoloģija, kas nodrošina *PM* atdalīšanu no ūdens, lai ūdeni būtu iespējams atgriezt atpakaļ MA sistēmā bez papildu risku radīšanas. Iekārtas darbības princips un prototips balstīts uz radiālo nostādinātāju. Pelnu pulpas attīrīšanas iekārtas izstrāde un pārbaude aprakstīta O. Švedova u. c. pētījumos, tādēļ šajā darbā ietvaros šī sistēmas sastāvdaļa sīkāk netiek aplūkota [110], [111].

Izmantotās mēriekārtas

Mēriekārtas nodrošina galveno parametru vērtību noteikšanu sistēmā. Iegūtajām vērtībām ir iespējams veikt datu analīzi, lai noteiktu galvenos MA darbību ietekmējošos faktorus un to ietekmi uz MA energoefektivitāti un *PM* samazinājumu. Visas uzstādītās un eksperimentālās izpētes laikā izmantotās iekārtas var iedalīt grupās: ar granulu katlu saistītie mērinstrumenti, ar MA saistītie mērinstrumenti un citi mērinstrumenti.



2.5. att. MA eksperimentālā stenda shēma.

2.1. tabula

Eksperimentos izmantoto instrumentu apkopojums

Mērītais parametrs	Instruments
No katla un uz katlu plūstošā ūdens temperatūras t_{b1}, t_{b2}	<i>Pt100</i> temperatūras sensors
Caur granulu katlu cirkulējošā ūdens caurplūde G_b	<i>Ultraflow 54</i> ūdens plūsmas mērītājs
Izmantotā kurināmā masas izmaiņas M_f	Svaru platforma <i>DFW500</i>
MA reaktorā iesmidzinātā ūdens temperatūra t_{w1} No MA izvadītā ūdens temperatūra t_{w2}	<i>Pt100</i> temperatūras sensori
MA reaktorā iesmidzinātā ūdens caurplūde G_w	<i>Ultraflow 54</i> ūdens plūsmas mērītājs
MA reaktorā iesmidzinātā ūdens spiediens	<i>BDSensors 17,600 G</i>
Dūmgāzu temperatūra pirms MA t_{g1} Dūmgāzu ķīmiskais sastāvs pirms MA	<i>Testo 350</i> dūmgāzes analizators
Ūdens tvaika daudzums dūmgāzēs pirms MA ω_1 , pēc MA ω_2	<i>HygroSmart WR293</i>
Cieto daļiņu mēriekārta pirms MA PM_1 , pēc MA PM_2	Automātiskais izokinētiskais mērītājs <i>Tecora Isostack G4</i>
Retinājums dūmvadā pirms MA, pēc MA	Diferenciālā spiediena mērītājs <i>Honeywell DPTE500SD</i>
Dūmgāzu temperatūra pēc MA t_{g2} Dūmgāzu ķīmiskais sastāvs pēc MA	<i>Testo 350</i> dūmgāzes analizators (dūmgāzu temperatūrai un dūmgāzu ķīmiskajam sastāvam) un <i>Hygrosmart WR 293</i> (dūmgāzu temperatūrai)
Dūmgāzu plūsmas mērītājs pēc MA	<i>OMEGA FMA1003R-MA-HT</i>

Granulu katls un ar to saistītās mēriekārtas

Granulu katls *Grandeg Bio-25* raksturo plaši izmantotu siltumenerģijas avotu mājsaimniecībās Latvijā. Katla nominālā jauda ir 20 kW. Granulas uz kurtuves degli padod no apakšas. Katlā esošais siltummainis ir novietots horizontāli un atrodas virs kurtuves. Granulas un gaisa padeve norit automātiski noteiktā sekunžu intervālā, un šo intervālu ir iespējams regulēt, katlam pieslēdzot datoru ar programmu *SyPTLite*. Mainot granulu padošanas intensitāti ir iespējams palielināt katla jaudu, piemēram, līdz 30 kW, vai otrādi – samazināt katla jaudu, piemēram, līdz 10 kW. Katls ir novietots uz speciālas svaru platformas. Svāri izmantoti, lai noteiktu patērētā kurināmā daudzumu. Izmantoto svaru mērīšanas diapazons ir no 0 kg līdz 500 kg ar izšķirtspēju 100 grami. Eksperimenta sākumā uz svāriem izvēlēta opcija “*Tare*”, ar kuras palīdzību fiksētas masas izmaiņas laikā. Testa beigās ir iespējams nolasīt, par cik kilogramiem granulu masa ir samazinājusies noteiktā laika periodā.

Hidrauliskajā sistēmā turpgaitas ūdens temperatūra nevar pārsniegt 80 °C, jo, pārsniedzot šo vērtību, granulu katls automātiski pārstāj padot granulas un degšanas procesa intensitāte samazinās. Turpgaitas ūdens temperatūrai samazinoties zem 80 °C, granulu padošana atsākas, un degšanas process stabilizējas. Caur katlu cirkulējošā ūdens plūsma parasti ir 1,5 m³/h. Hidrauliskā sistēma ir aprīkota ar manometriem, kurus izmantojot iespējams sekot līdz spiediena izmaiņām, ar kādu ūdens cirkulē uz granulu katlu. Lai nodrošinātu ūdens caurplūdi caur katlu, izmantoti vairāki *Wilo* cirkulācijas sūkņi. Hidrauliskā sistēma ir aprīkota ar vairākām mēriekārtām katla jaudas noteikšanai, kā arī saražotā siltuma daudzuma aprēķināšanai. *K-tipa* temperatūras sensorus izmanto, lai varētu sekot līdz turpgaitas un atgaitas ūdens temperatūras izmaiņām. Savukārt *Ultraflow 54* ūdens plūsmas mērītājs nosaka ūdens caurplūdi caur katlu. Nosakot turpgaitas un atgaitas ūdens temperatūru, kā arī ūdens caurplūdi ir iespējams noteikt katla jaudu (2.1.).

$$q = \frac{m_u c_p (t_{turp} - t_{atg})}{3,6} \quad (2.1.)$$

kur q – katla jauda, kW;

m_u – ūdens caurplūde caur katlu, m³/h;

c_p – ūdens īpatnējā siltumietilpība, kJ/(kg · K);

t_{turp} – temperatūra katla izejā, °C;

t_{atg} – temperatūra katla ieejā, °C.

Katla darbību raksturojošos parametrus testu laikā fiksē, izmantojot *Campbell* sistēmu ar datu reģistratoru *Campbell CR1000*. Reģistrators kopā ar pievienoto sistēmu nodrošina ērtāku darbu, jo iekārta pārrēķina nolasītos strāvas vai sprieguma datus un atspoguļo mērīto parametru vērtības standarta izteiksmē °C vai m³/h. Iekārtas datu nolasīšanas precizitāte ir ± 0,06 %.

Pirms eksperimentālās izpētes veiktas izmanto granulu kvalitātes pārbaudes analīzes Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta Cietā biokurināmā testēšanas laboratorijā. Analīžu laikā noteikts granulu sadegšanas siltums, pelnu un mitruma saturs. Granulu sadegšanas siltums izmantots, lai aprēķinātu katlā izmantoto enerģijas daudzumu un katla lietderības koeficientu. Savukārt mitruma un pelnu saturam ir ietekme uz *PM* koncentrāciju dūmgāzēs aiz katla. Visos eksperimentālās izpētes laikā veiktajos testos izmantotas viena veida granulas ar nemainīgu sadegšanas siltumu, mitruma un pelnu saturu, lai nepieļautu papildus faktoru rašanos, kuri varētu ietekmēt MA darbību un iegūtos rezultātus.

MA un ar to saistītās mēriekārtas

Pie MA pievienots dūmvads, kas savieno to ar granulu katlu. Posmu starp granulu katlu un MA veiktajos eksperimentos dēvē par pirms MA. Aiz MA ir vēl viens dūmvads, kas savieno to ar skursteni un šo posmu sauc par pēc MA. Pirms MA esošajā dūmvadā ir ievietoti vairāki sensori un iekārtas: dūmgāzu analizators *Testo 350*, higrometrs, temperatūras sensors, diferenciālā spiediena mērītājs, kā arī periodiski tajā ievieto PM mērīšanai paredzēto iekārtu *Tecora Isostack G4*. Mērījumi uzrādīja, ka dūmgāzu sastāvs, ko nosaka ar analizatoru, ir līdzīgs gan pirms, gan pēc MA, tādēļ regulāri dūmgāzu sastāva mērījumi veikti tikai pirms iekārtas. Pēc MA dūmvadā uzstādīts higrometrs, temperatūras sensors, diferenciālā spiediena mērītājs, dūmgāzu plūsmas mērītājs.



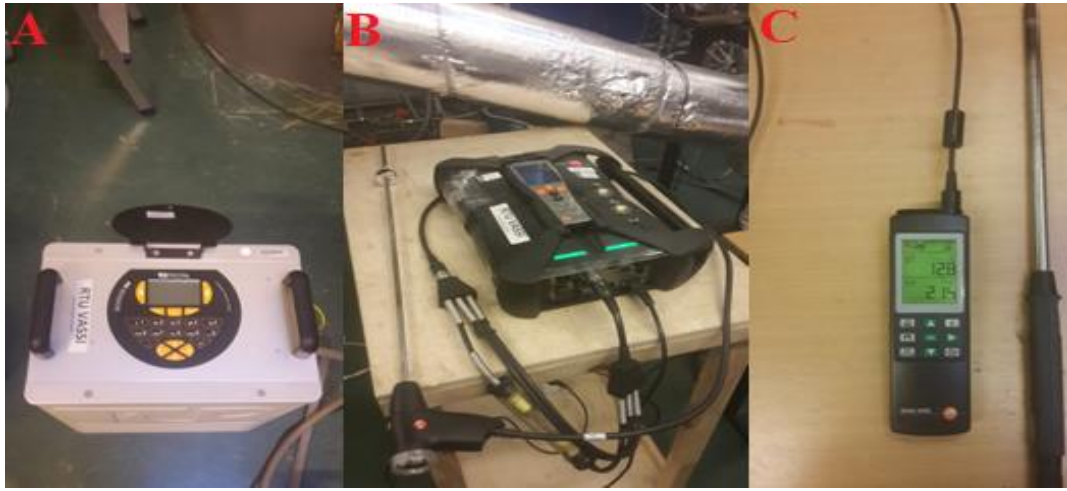
2.6. att. Eksperimentālais stends laboratorijas apstākļos.

Sistēmā izvietoti divi *K-tipa* temperatūras sensori, ar kuru palīdzību mēra ūdens temperatūru pirms iesmidzināšanas MA un ūdens temperatūru pēc MA (pirms pelnu pulpas tvertnes). *Ultraflow 54* ūdens plūsmas mērītāju izmanto, lai noteiktu ūdens caurplūdi caur MA. Nomērot ūdens temperatūru pirms un pēc MA, kā arī ūdens caurplūdi, nosaka MA jaudu jeb siltuma daudzumu, ko MA noņem no dūmgāzēm.

Dūmgāzu analizatoru *Testo 350* izmanto, lai varētu noteikt esošo dūmgāzu sastāvu, kas plūst no granulu katla uz MA. Ar dūmgāzu analizatoru ir iespējams noteikt vairāku gāzu (skābekļa, oglekļa dioksīda, ūdeņraža, slāpekļa oksīdu, sēra oksīdu) koncentrāciju dūmvadā.

Higrometru izmanto, lai noteiktu dūmgāzu relatīvo, absolūto mitruma saturu un temperatūru. Iegūtie dati par relatīvo un absolūto mitruma saturu izmantoti, lai novērtētu iesmidzinātā ūdens ietekmi uz dūmgāzēm, kā arī novērtētu, cik daudz papildus siltuma ir iespējams atgūt no dūmgāzēm. Datus par dūmgāzu mitruma saturu izmanto arī PM mērīšanai, ievadot relatīvā mitruma satura vērtību cieto daļiņu mērīšanas iekārtā.

Dūmgāzu plūsmas sensors izmantots, lai novērtētu dūmgāzu ātrumus pirms MA, pēc MA, kā arī MA iekšienē. Dūmgāzu ātrumam MA ir svarīga loma attiecībā uz PM koncentrācijas samazināšanas iespējām.



2.7. att. Daļa no eksperimentos izmantotajām iekārtām
(A – Tecora Isostack G4; B, C – Testo 350).

Pt100 temperatūras sensori izmantoti, lai noteiktu akumulācijas tvertnē esošā ūdens temperatūru. Akumulācijas tvertnē atrodas trīs dažādos augstumos novietoti *Pt100* temperatūras sensori, kas palīdz noteikt precīzu momentāno ūdens temperatūru dažādos augstumos. Temperatūra akumulācijas tvertnē raksturo, cik daudz siltuma novadīts uz tvertni, un cik siltuma vēl ir iespējams uzkrāt tajā.

Caur MA cirkulējošā ūdens lokā ir uzstādīts manometrs, ar kura palīdzību var noteikt, ar kādu spiedienu notiek ūdens smidzināšana MA. Ir svarīgi zināt spiedienu, ar kādu ūdens padots iesmidzināšanai reaktorā, lai šo spiedienu spētu nodrošināt arī māsasaimniecībās, kas integrēs šo tehnoloģiju. Ar manometru noteiktie ūdens spiedieni arī izmantoti pilienu diametru aprēķinam. Datu reģistratoru *Campbell CR1000* izmanto, lai nodrošinātu nepārtrauktas nomērīto parametru izmaiņas, kā arī pierakstītu nolasītos datus, lai pēc testa beigām būtu iespēja apstrādāt datus un veikt to analīzi. Ar šī reģistratora palīdzību ir iespējams izsekot absolūtā un relatīvā mitruma satura koncentrācijai, dūmgāzu retinājumam un temperatūrai pirms un pēc MA, kā arī ūdens temperatūrām pirms iesmidzināšanas reaktorā un pirms pulpas tvertnes.

Tecora Isostack G4 iekārta izmantota, lai nomērītu *PM* koncentrāciju pirms un pēc MA. Zonde ir viena no galvenajām iekārtas sastāvdaļām, kuru ievieto dūmvadā, nodrošinot dūmgāzu parauga ievākšanu. Svarīgi zondes galu pagriezt pret dūmgāzes plūsmu. Zondes uzgalī atrodas filtrs, caur kuru plūst dūmgāzēs un uz kura uzkrājas *PM*. No iekārtas displeja ir iespējams nolasīt dūmgāzu plūsmas ātrumu, iesūkņēto dūmgāzu daudzumu un citus parametrus. Beidzoties testam, zondi izņem laukā no dūmvada un filtru izņem no zondes, lai veiktu tālāku *PM* analīzi. *PM* mērīšanas procedūrai pievērš padziļinātu uzmanību. Pateicoties izveidotajai mērījumu sistēmai, kas ļauj noteikt dūmgāzu parametrus pirms un pēc MA, definēta metode un radīta iespēja noteikt emisiju samazināšanas un energoefektivitātes uzlabošanas rādītājus.

2.1.1. Cieto daļiņu mērījumu procedūra

PM mērījumu procedūra ir ļoti rūpīgs process, ko veic ar augstu precizitāti. Iegūtie rezultāti ir būtiski, lai noteiktu iekārtas *PM* uztveršanas efektivitāti. *PM* mērījumu procesu var iedalīt piecās daļās.

1. Filtru izvēle. Filtri iegādāti ņemot vērā *LVS EN ISO:9096* [112] standarta prasības, pēc kurām īstenoti eksperimenti. Arī *PM* mērīšanas iekārtai atbilst minētajam standartam.

Eksperimentos lietoto filtru diametrs ir 47 milimetri, tie ir apaļas formas, izgatavoti no stikla šķiedras vai kvarca.

2. Skalojamo trauciņu nozīme. *PM* kopējās koncentrācijas noteikšanai, nepieciešams sagatavot skalojamus trauciņus. Šajos trauciņos apstrādā maisījumu, kas iegūts pēc testa, izskalojot cieto daļiņu mēriekārtas *Tecora Isostack G4* zondes uzgali ar acetonu. Skalojamajā trauciņā nonāk visas *PM*, kas ir uzkrājušās zondes uzgalī un nav nonākušas līdz filtram. Šo procedūru atkārto pēc katra veiktā testa. Katram ņemtajam paraugam atbilst viens filtrs un viens skalojamais trauciņš. Mērījumiem jā sagatavo tik daudz skalojamo trauciņu, cik testu jāveic pie emisiju avota. Jā sagatavo arī viens atsauces skalojamais trauciņš masas izmaiņas korekcijai. Pirms filtru trauku un skalojamo trauciņu tālākas apstrādes, jāpārliciecinās, ka tie ir tīri.

3. Filtru un trauciņu sagatavošana. Filtrus un tukšus skalojamus trauciņus stundu karsē žāvskapī 160 °C temperatūrā. Pēc stundas filtru trauciņus un skalojamus trauciņus izņem no žāvskapja, liek eksikatoros un notur tajos vismaz astoņas stundas. Kad pagājis noteiktais laiks, pieraksta vides apstākļus laboratorijā. Pirms svēršanas veic svaru kalibrāciju. Katru trauciņu nosver uz analītiskajiem svāriem *Kern ALT 100–5AM* (precizitāte 0,1 mg). Masu atzīmē protokolā atbilstoši numurētajam traukam un pielietojumam (filtrs vai skalojamais trauciņš).

Kad trauciņu masa ir noteikta, filtru trauciņos ievieto filtrus. Skalojamie trauciņi ir tukši, tajos neko neievieto. Trauciņu ar filtru, kā arī skalojamus trauciņus liek žāvskapī un karsē 160 °C vienu stundu. Pēc stundas trauciņus ar filtriem un skalojamus trauciņus izņem no žāvskapja un liek eksikatorā, kur tos notur tikpat ilgi cik pirmajā reizē.

Kad pagājis noteiktais laiks, katru skalojamo trauciņu nosver uz analītiskajiem svāriem. Filtru sver vienu pašu, lai samazinātu svēršanas kļūdu, kas rodas tukša trauka un filtra masu atšķirības dēļ. Masu ieraksta testēšanas protokolā. Filtru izņem no trauciņa un ievieto atbilstošajā kārtīdžā, kas ir numurēts. Testēšanas protokolā atzīmē kārtīdža numuru (turpmāk filtra numurs) atbilstoši tam filtru trauciņam, kurā filtrs iepriekš ir stāvējis. Sagatavo arī konteinerus, kas paredzēti skalošanas šķīdumu uzglabāšanai. Lai nesajauktu paraugus vietām, katram paraugam, filtram un konteineram ir jābūt ar vienādu numerāciju.

4. Filtra izmantošana eksperimentā. Pēc filtra sagatavošanas posma, tas ir gatavs lietošanai. Filtru ievieto zondes uzgalī, ko var redzēt 2.8. attēlā.



2.8. att. Cieto daļiņu mērīšanas iekārtas *Tecora Isostack G4* zondes uzgalis.

Visu *Tecora Isostack G4* iekārtu var redzēt 2.9. attēlā. Pirms testa veic iekārtas hermetizācijas pārbaudi (*leak check*). Iekārtas datu panelī ievada vairākus ar dūmvadu saistītus parametrus – mērījumu vietas dziļumu un rādiusu, dūmvada formu, dūmgāzes parametrus

(skābekļa un CO₂ saturu dūmvadā), kā arī testa ilgumu. Pēc datu ievadīšanas sāk eksperimentu. *PM* mērījumi MA veikti pēc *LVS EN ISO 9096:2017* standarta prasībām. Gan pirms, gan pēc MA *PM* mērījumiem izmantotā metode ir manuālā *PM* koncentrācijas noteikšana standarta apstākļos no stacionāra emisiju avota. Parauga ņemšana norit, izmantojot iekšējās filtrācijas metodi izokinētiskos apstākļos. Izokinētiskajā paraugu ņemšanā ievadītās gāzes ātrums un virziens paraugu ņemšanas zondēs ir tāds pats, kāds tas ir dūmvadā attiecīgajā parauga ņemšanas punktā. *PM* ņemšanu veic emisijas avotā – dūmvadā aiz katla.



2.9. att. Cieto daļiņu mērīšanas iekārta *Tecora Isostack G4*.

5. Filtru analīze. Eksperimentu rezultātā iegūti filtri ar noteiktu daudzumu *PM* uz tiem. Lai precīzi noteiktu, cik daudz *PM* uzkrātas uz filtra, to analizē laboratorijā, veicot šādas darbības:

- filtrus no kārtidzēm pārvieto atbilstošajos filtru trauciņos. Pēc tam filtru trauciņus ar filtriem liek žāvēties žāvskapī 160 °C vienu stundu;
- pēc stundas trauciņus izņem no žāvskapja, liek eksikatoros un notur vismaz astoņas stundas (tikpat ilgi, cik filtru sagatavošanā);
- pēc noteiktā laika, pieraksta vides apstākļus laboratorijā. Pirms svēršanas veic svaru kalibrāciju. Katru trauciņu nosver uz analītiskajiem svāriem. Masu atzīmē testēšanas protokolā atbilstoši numurētajam traukam;
- skalošanas šķīdumu pārlej atbilstošajos trauciņos un liek žāvskapī 160 °C stundu;
- pēc karsēšanas trauciņus ievieto eksikatorā, un notur vismaz astoņas stundas. Pēc noteiktā laika, pieraksta vides apstākļus laboratorijā. Pirms svēršanas veic svaru kalibrāciju. Katru trauciņu nosver uz analītiskajiem svāriem. Masu atzīmē testēšanas protokolā atbilstoši numurētajam traukam;
- balstoties uz iegūtajiem datiem, veic *PM* koncentrācijas aprēķinu.

Zinot filtra sākuma un beigu masu, noteikta masas starpība. Izmantojot *PM* mēriekārtu *Tecora Isostack G4* noteikts iesūknētais dūmgāzu daudzums, kuru tālāk attiecina pret nosvērtu *PM* daudzumu un rezultātā iegūst *PM* koncentrāciju. *PM* koncentrācijas uz filtriem ir atšķirīgas, kā redzams 2.10. attēlā. Gaišākas krāsa filtri ir ar zemākām *PM* koncentrācijām, un tie izmantoti mērījumos pie mazākiem iesmidzinātā ūdens daudzumiem iekārtā. Filtri ir numurēti, attiecīgi no kreisās uz labo – 5., 4., 3. un 2. 5. filtrs izmantots *PM* mērījumiem pēc MA pie iesmidzinātā ūdens daudzuma 200 l/h, 4. filtrs izmantots mērījumiem pēc MA pie iesmidzinātā ūdens daudzuma 150 l/h, 3. filtrs izmantots mērījumiem pēc MA pie iesmidzinātā ūdens daudzuma

50 l/h, savukārt 2. filtrs izmantots sākotnējās *PM* koncentrācijas noteikšanai pirms MA pēc granulu katla bez ūdens iesmidzināšanas. Līdzīga situācija novērojama pie visām izmantotajām sprauslām.



2.10. att. Filtri ar dažādām cieto daļiņu koncentrācijām.

2.1.2. Mēriekārtu pārbaude un kalibrācija

MA sistēmas iekārtas pārbaudītas ar kalibrētām iekārtām. Daži sensori pārbaudīti, veicot mērījumus pie zināmiem darba parametriem, kuri pieņemti par atsauces apstākļiem. Regulāri veiktas iekārtu apkopes un kalibrācijas, nodrošinot, ka visas iekārtas nodrošina korektu parametru mērīšanu eksperimentos.

Mitruma satura mēriekārtu pārbaudes veiktas pie 32 %, 75 % un 94 % relatīvā mitruma satura (RH), izmantojot klimata kameru un izšķīdušā sāls metodi. Pārbaudēs izmantotie sāļi bija MgCl (32 % RH); NaCl (75 % RH) un KNO₃ (94 % RH). Lielākā absolūtā nobīde, kas novērota vienam no sensoriem, bija 0,6 % RH jeb relatīvi 2,5 %. Nobīdes vērtības ņemtas vērā izstrādājot vienādojumu korekcijas koeficienta aprēķināšanai. Vienādojums ir trešās pakāpes polinoms, kuru iespējams ievadīt datu reģistratorā, saglabājot oriģinālos datus un vienlaikus aprēķinot koriģēto vērtību. Balstoties uz veiktajām pārbaudēm secināts, ka iekārtām vislielākā kļūda novērojama relatīvajam mitrumam pārsniedzot 95 %.

Dūmgāzu analizators *Testo 350* kalibrēts laboratorijas apstākļos. To pieslēdz pie speciāliem gāzes baloniem, kuros iepildīts O₂, CO₂, CO un NO gāzes maisījums. Gāzes balonos esošajām gāzēm ir zināma koncentrācija, tādēļ tās ir piemērotas kalibrācijas veikšanai. Kalibrācija veikta vismaz reizi mēnesī, vai ik pēc katriem 10 testiem, lai nepieļautu nomērīto vērtību kļūdas. Katra gāzu sensoru kalibrācija aizņem aptuveni 5 minūtes, kopā iekārtai ap 20 minūtēm. Iegūtos kalibrācijas rezultātus uzskaita elektroniskajā žurnālā.

Sprauslu raksturojums, izvēle un testēšana sīkāk veikta atsevišķā pētījumā un aprakstīta darbā [113]. Procesu, kurā izsmidzināšanās rezultātā veidojas pilieni, sauc par atomizāciju. Pilienu diametrs ir minētā procesa rezultāts. Ja spiediena kritums pie šķidrums izsmidzināšanas ir pietiekami augsts, tad šķidrums plūsmā sadalās pilienos. Starp diametru un citiem sprauslas darbības parametriem novērotas dažādas likumsakarības. Pieaugot plūsmas ātrumam un iesmidzināšanas spiedienam samazinās pilienu izmērs, šiem parametriem samazinoties, pieaug pilienu izmērs. Savukārt izsmidzināšanas leņķis pilienu diametru ietekmē apgriezti – pieaugot leņķim, pilienu diametrs samazinās un otrādi [113].

Sprauslas iedala pēc to veidotā izsmidzināšanas konusa. Iekšējās konstrukcijas dēļ, tās ir iespējams izmantot dažādos apstākļos plašam pilienu diametru intervālam. Sprauslas atveres var mainīties leņķī no 0° līdz 130°. Pilienu konuss ar sprauslas atveres izvadu veido izsmidzināšanas leņķi. No tā atkarīgs izsmidzināšanas attālums – distance no sprauslas līdz

virsmai. Izsmidzināšanas leņķis un augstums ietekmē sprauslas izsmidzinājuma noklājumu. Pamatojoties uz nepieciešamajām prasībām, MA sistēmai izvēlētas pilna konusa sprauslas, kas rada aizpildītu ūdens pilienu plūsmu, to izsmidzināšanas leņķim pie 3 bāru ūdens spiediena jābūt 90° un jānodrošina iesmidzinātā ūdens daudzums aptuveni 3,7 l/min pie 2 bāru spiediena. Sprauslu atbilstības pārbaudes ietvaros veikta sprauslas noklājuma viendabīguma pārbaude, izsmidzināšanas leņķa pārbaude, pilienu izmēru un ātruma noteikšana [113].

Sprauslas izsmidzināšanas augstums MA ir nemainīgs, tādēļ sprauslu pārbaudes testos tas netika mainīts. Speciāli izveidotā standā testētas trīs izvēlētas sprauslas (*MPL 0.77*, *MPL 1.12* un *MPL 1.51*). Katrai sprauslai noteikts ūdens izsmidzināšanas leņķis (2.11. att.). Visu sprauslu gadījumā izmantots vienāds iesmidzinātā ūdens daudzums, lai noteiktu, kā atkarībā no sprauslas izmēra mainās izsmidzināšanas leņķis. Šaurākie izsmidzināšanas leņķi iegūti ar lielāko sprauslu, platākie leņķi – ar mazāko sprauslu [113].



2.11. att. Sprauslu testēšana [113].

Sprauslas veidotais noklājums noteikts izmantojot režģa metodi, kur strūklas veidojošā konusa pamata riņķis pētīts četrās asīs, iegūstot izklājumu. Noskaidrots, ka izsmidzinātā ūdens konuss nav viendabīgs. Atsevišķos punktos nolijušā ūdens daudzums ir 2–3 reizes lielāks par citiem punktiem. Šī informācija ir lietderīga, lai noteiktu ūdens daudzumu, kas nokļūs uz reaktora iekšējām sienām, attiecīgi nepiedalīsies cieta daļiņu uztveršanā [113].

Pilienu izmēri un kustības ātrums noteikts, izmantojot fotofiksāciju. Izsmidzināšanas process filmēts ar 100 kadriem sekundē un izmantoti 1/20 000 sekundē gari gaismas impulsi, lai iegūtu nekustīgu pilienu attēlus. Attēlā nobildēta arī atsauces skala, kas sniedza iespēju nobildēto pilienu izmēru attiecināt pret skalu un attiecīgi noteikt to izmēru metriskās vienībās [113].

2.2. Eksperimenta īstenošana

Eksperimentu īstenošanai definēti pieci mainīgie parametri, kas raksturo dūmgāzes un iekārtā iesmidzināto ūdeni: iesmidzinātā ūdens temperatūra; iesmidzinātā ūdens daudzums;

iesmidzinātā ūdens pilienu diametrs; dūmgāzu plūsma; dūmgāzu temperatūra iekārtas ievadā. Parametru galvenās izmaiņu vērtības atspoguļotas zemāk (2.2. tab.).

2.2. tabula

Galveno parametru izmaiņu diapazoni

	$V_g, \text{Nm}^3/\text{s}$	$t_{g1}, ^\circ\text{C}$	$G, \text{l/h}$	$d_{d0}, \mu\text{m}$	$t_{w1}, ^\circ\text{C}$
Minimālā vērtība	0,0194	130,8	49,0	249	19,4
Maksimālā vērtība	0,0226	135,2	252,5	503	40,9

Iesmidzinātā ūdens temperatūra t_{w1} ir parametrs, kas nosaka, cik daudz siltumenerģijas tiek atgūts no dūmgāzēm, kas plūst cauri MA. Testu laikā izmantotas trīs veidu iesmidzinātā ūdens temperatūras, noapaļoti: 20 °C, 30 °C un 40 °C. Dūmgāzēm plūstot caur MA, tās sajaucas ar iesmidzināto ūdeni. Reaktorā veidojas sīkpilienu zonas jeb miglas efekts, ar kura palīdzību, notiek gan cieto daļiņu attīrīšana, gan arī siltumenerģijas atgūšana.

Cits svarīgs mainīgais faktors, kas ietekmē absolūto mitrumu, atgūto siltumenerģiju, *PM* uztveršanu un dūmgāzu temperatūru, ir **iesmidzinātais ūdens daudzums G jeb ūdens caurplūde** caur MA. Sākotnējos eksperimentos izmantotas caurplūdes robežās no aptuveni 50 l/h līdz 250 l/h, ar izmaiņu soli 50 l/h.

Iesmidzinātā ūdens pilienu sākuma diametrs d_{d0} ir vēl viens ūdeni raksturojošais parametrs, kas tieši saistīts ar sprauslu un tās izmēru. Eksperimentos izmantotas trīs lielumu sprauslas *MaxiPass L (MPL sprauslas nr.) – MPL 0.77, MPL 1.12 un MPL 1.51* (2.12. att.). Šīs sprauslas ir izturīgas pret aizsērēšanu, tajās iespējams izmantot ūdeni ar nelielu cieto daļiņu piemaisījumu, kas ir būtiska priekšrocība MA kontekstā. No izvēlētās sprauslas un ūdens iesmidzināšanas spiediena ir atkarīgs pilienu sākuma diametrs d_{d0} .



2.12. att. Eksperimentos izmantotās sprauslas.

Galvenie eksperimentu laikā kontrolējamie parametri, kas saistīti ar dūmgāzēm, ir dūmgāzu plūsma un dūmgāzu temperatūra iekārtas ievadā. Abi parametri ir atkarīgi no katla parametriem – jaudas, efektivitātes, darbināšanas režīma. Sākotnējos eksperimentos pārbaudītās **dūmgāzu plūsmas (V_g)** ir robežās no 0,0194 Nm^3/s līdz 0,0226 Nm^3/s , savukārt **dūmgāzu temperatūra (t_{g1})** pēc katla un pirms MA ir robežās no 130,8 °C līdz 135,2 °C. Šie parametri mainās minimāli, jo sistēmas pārbaude veikta pie nemainīgiem katla parametriem.

Aprēķinātie pilienu diametru lielumi

Tabulā 2.3. ir atspoguļotas spiedienu vērtības, ar kurām ūdens iesmidzināts MA reaktorā. Iesmidzinātā ūdens spiedienu vērtības iegūtas, izmantojot manometra rādījumus, kas nolasīti eksperimentu laikā. Aplūkojot iegūtos iesmidzinātā ūdens spiedienu rezultātus, var novērot

sakarību, ka sprauslai *MPL 0.77* dažos gadījumos bija nepieciešams pat 10 reizes lielāks spiediens, lai nodrošinātu konkrētu caurplūdi. Visu sprauslu gadījumā, palielinot iesmidzinātā ūdens daudzumu, pieauga arī iesmidzinātā ūdens spiediens.

2.3. tabula

Iegūtais ūdens spiediens pie dažādiem sprauslu izmēriem

		Caurplūde, l/h				
		50	100	150	200	250
Sprausla <i>MPL 0.77</i>	Spiediens, bar	0,40	1,00	1,90	3,40	-
Sprausla <i>MPL 1.12</i>		0,20	0,50	1,10	-	3,00
Sprausla <i>MPL 1.51</i>		0,05	0,10	0,50	-	1,70

Aprēķināti arī pilienu diametri pie dažādām caurplūdēm un sprauslām. Pilienu diametru rezultāti ir apkopoti 2.4. tabulā. Aprēķinā izmantoti vairāku testu rezultāti. Pilienu diametrs pie katras caurplūdes un sprauslas izmēra rēķināts četras reizes, lai iegūtu precīzāku vidējo vērtību. Iekrāsotajā rindā uzrādītas pilienu diametru vidējās vērtības pie katras caurplūdes un sprauslas izmēra. Iegūtie pilienu diametri aprēķināti, izmantojot sprauslas ražotāju sniegto vienādojumu:

$$D_2 = D_1 \times \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{-0,3} \quad (2.2.)$$

kur D_2 – piliena diametrs, kas tiek aprēķināts (μm);

D_1 – piliena diametrs pie atsauces spiediena (μm);

P_2 – testos izmantotais ūdens spiediens (bar);

P_1 – atsauces ūdens spiediens (bar).

Aprēķinātie pilienu diametri pie dažādām sprauslām un ūdens caurplūdēm

		Caurplūde, l/h			
		50	150	200	250
Sprausla <i>MPL 0.77</i>	Pilienu diametrs, μm	307	192	161	-
		315	198	166	-
		316	198	166	-
		320	200	168	-
	Vidējā vērtība	314	197	165	-
Sprausla <i>MPL 1.12</i>	Pilienu diametrs, μm	451	270	-	200
		453	272	-	201
		478	287	-	212
		450	270	-	200
	Vidējā vērtība	458	275	-	203
Sprausla <i>MPL 1.51</i>	Pilienu diametrs, μm	794	398	-	275
		786	394	-	272
		786	394	-	273
		785	393	-	272
	Vidējā vērtība	788	395	-	273

No iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka lielākie pilienu diametri – līdz 794 μm – iegūti pie caurplūdes 50 l/h. Mazākie pilienu diametri – 192 μm – iegūti pie caurplūdes 250 l/h. Novērojamas būtiskas atšķirības pilienu diametros atkarībā no izmantotās sprauslas. Sprauslai *MPL 1.51* pilienu diametrs ir būtiski lielāks par sprauslu *MPL 0.77*. Piemēram, pilienu diametrs sprauslai *MPL 1.51* pie ūdens caurplūdes 50 l/h vidēji ir 788 μm, savukārt sprauslai *MPL 0.77* pie tādas pašas caurplūdes – 314 μm.

Miglas aparāta atgūtā siltuma jauda

Ar MA atgūto siltuma jaudu var noteikt mērot dūmgāzu aparātā atdoto vai iesmidzinātā ūdens saņemto siltumu. Vienkāršāk ir noteikt ūdens saņemto siltumu. MA jauda ir atkarīga no iesmidzinātā ūdens daudzuma, iesmidzinātā ūdens temperatūras starpības un ūdens siltumietilpības:

$$Q = \frac{c_p G (t_{w2} - t_{w1})}{3600} \quad (2.3.)$$

kur Q – MA jauda, kW;

c_p – ūdens īpatnējā siltumietilpība, kJ/(kg · K);

G – iesmidzinātais ūdens daudzums, l/h;

t_{w2} – iesmidzinātā ūdens temperatūra pēc MA, °C;

t_{w1} – iesmidzinātā ūdens temperatūra pirms MA, °C.

No gāzu puses miglas aparāta jaudu nosaka vienādojums:

$$Q = L_{dg}(H_1 - H_2) \quad (2.4.)$$

kur H_1 – dūmgāzu entalpija pie t_{g1} , kJ/kg_{da};

H_2 – dūmgāzu entalpija pie t_{g2} , kJ/kg_{da};

L_{dg} – sausu dūmgāzu plūsma, kg_{da}/s.

Šis vienādojums kalpo kā pārbaudes aprēķins, jo gan ar 2.3., gan 2.4. vienādojumu iegūtajām jaudām jābūt vienādām.

Sūkņu elektroenerģijas jauda

Mainoties ūdens iesmidzināšanas sprauslas lielumam un iesmidzinātā ūdens daudzumam, pieaug vai samazinās ūdens pretestība sistēmā, kas ietekmē cirkulācijas sūkņim nepieciešamo jaudu un, attiecīgi arī elektroenerģijas patēriņu. Sūkņu jauda iegūta šādi:

- 1) izmantojot sprieguma kņābles, datu reģistrētāju un datoru, iegūtas strāvas vērtības noteiktā laika periodā;
- 2) zinot strāvas vērtības, jauda cirkulācijas sūkņim iegūta pēc 2.5.formulas, savukārt elektroenerģijas patēriņu var noteikt atbilstoši 2.6.vienādojumam:

$$P = \frac{U \times I}{1000} \quad (2.5.)$$

kur P – jauda, kW;

U – spriegums, V;

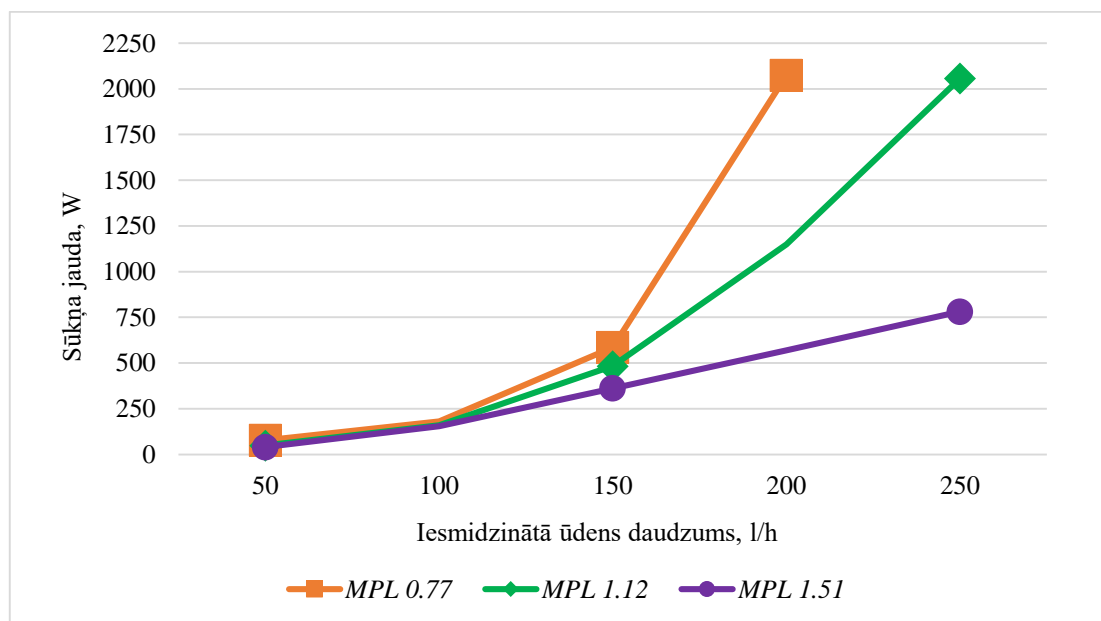
I – strāvas stiprums, A.

$$E = P \times t \quad (2.6.)$$

kur E – sūkņa elektroenerģijas patēriņš, kWh;

t – sūkņa darbības laiks, h.

2.13. attēlā redzamajā grafikā attēlota eksperimentos izmantotā sūkņa elektroenerģijas jauda (W) atkarībā no sprauslas izmēra un iesmidzinātā ūdens daudzuma. Galvenokārt jauda ir salīdzinoši zems, līdz 750 W. Uz y ass attēlota sūkņa jauda, kas mainās no 0 W līdz 2200 W. Uz x ass ir atliekti visi iesmidzinātā ūdens daudzumi, kas mainās no 50 l/h līdz 250 l/h. Attēlā redzamajā grafikā, ar oranžo līkni ir attēlota sprauslas *MPL 0.77* radītā elektroenerģijas jauda, ar zaļo krāsu ir attēlota sprauslas *MPL 1.22* radītā jauda un ar violeto krāsu ir attēlota sprauslas *MPL 1.51* radītā jauda.

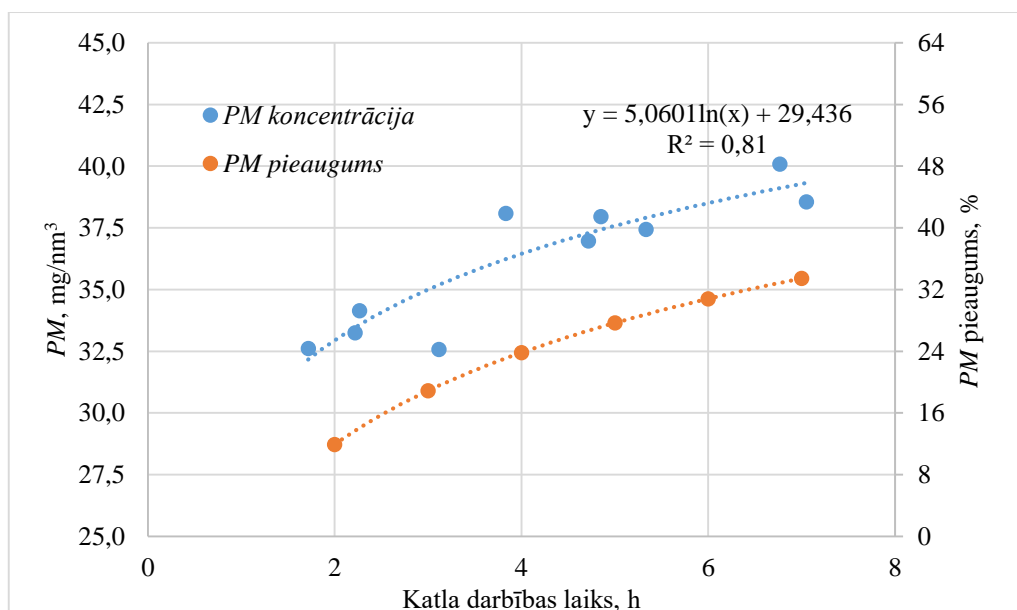


2.13. att. Sūkņa jauda pie dažādām sprauslām un iesmidzinātā ūdens daudzuma.

Vislielākā sūkņa jauda pie 50 l/h, 150 l/h un 200 l/h ir ar mazāko sprauslu (*MPL 0.77*), kas ir skaidrojams ar to, ka sprauslas atveres diametrs ir vismazākais, un veidojas vislielākā pretestība. Līdz ar to, jo mazāka sprausla izmantota, jo lielāks spiediens būs jānodrošina, lai sasniegtu nepieciešamo iesmidzinātā ūdens daudzumu, kas paaugstinās elektroenerģijas patēriņu un jaudu. Tādēļ arī *MPL 0.77* sprauslas iegūtie rezultāti grafikā, pie 50 l/h, 150 l/h un 200 l/h iesmidzinātā ūdens daudzuma, atrodas augstāk par pārējo sprauslu (*MPL 1.21* un *MPL 1.51*) iegūtajiem rezultātiem. Grafikā nav attēlota sūkņa jauda ar sprauslu *MPL 0.77* pie 250 l/h, jo sprauslas tehnisko ierobežojumu dēļ, šo iesmidzinātā ūdens daudzumu nav iespējams sasniegt. Grafikā ir skaidri redzams, ka ar sprauslu *MPL 1.51* (violetā līkne) ir sasniegta vismazākā jauda, bet ar sprauslu *MPL 1.21* iegūta vidējā jauda. Salīdzinot iegūtos atšķirīgo sprauslu jaudu datus savā starpā, var novērot, ka, palielinoties iesmidzinātā ūdens daudzumam, palielinās arī savstarpējā jaudas atšķirība. Piemēram, salīdzinot sūkņu jaudu atšķirības starp *MPL 1.51* un *MPL 1.21* pie 250 l/h, iegūtā starpība vidēji ir ap 1200 W vai aptuveni 60 %. Savukārt, salīdzinot, iegūtos sūkņu jaudas pie 50 l/h ar sprauslām *MPL 0.77*, *MPL 1.22* un *MPL 1.51*, atšķirība vidēji ir 30 W.

PM koncentrāciju ietekmējošie parametri

Lai noteiktu, kuri no izvēlētajiem MA sistēmas parametriem – dūmgāzu temperatūra, dūmgāzu plūsma, dūmgāzu retinājums, skābekļa koncentrācija dūmgāzēs, katla darbības laiks – ietekmē *PM* koncentrāciju, veikta eksperimentālo datu korelācijas un regresijas analīze. Analīzes rezultātā noteikts, ka galvenais *PM* koncentrāciju ietekmējošais parametrs ir katla darbības laiks. Katla darbības laiks ir laika intervāls no katla iekurināšanas brīža līdz *PM* mērījumu uzsākšanas brīdim. Visbiežāk šis laiks ir 1,5 stundas, sasniedzot brīdi, kad katls ir sasniedzis nemainīgus darbības parametrus. Sākotnējās *PM* koncentrācijas mērījumi veikti pie dažādiem katla darbības laikiem. Korelācija starp *PM* koncentrāciju un katla darbības laiku ir cieša, determinācijas koeficients R^2 ir 0,81, kas norāda, ka iegūtais vienādojums raksturo 81 % no rezultātiem ar 95 % statistisko nozīmīgumu. *PM* pieauguma līkne atspoguļo, par cik procentiem *PM* koncentrācija pieaug, attiecībā pret *PM* koncentrāciju pirmajā katla darbības stundā.



2.14. att. *PM* koncentrācija pirms MA atkarībā no katla darbības laika.

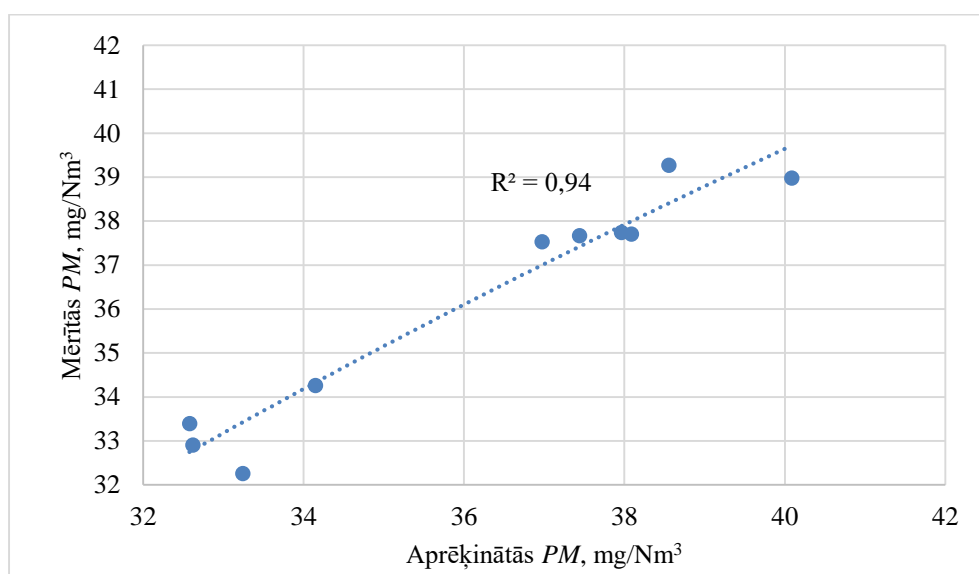
Šajā gadījumā jāņem vērā tas, ka katla darbības stabilizācijas laiks ir 1 līdz 1,5 stundas, tādēļ *PM* mērījumus visprecīzāk veikt pēc stabilizācijas laika. Rezultāti parāda *PM* koncentrācijas pieaugumu, ja mērījumi veikti pie vēlākiem katla darbības laikiem. Iepriekš minēto parametru datu analīze veikta *Statgraphics* programmā. Iegūtais regresijas vienādojums raksturo saikni starp *PM* koncentrāciju un diviem neatkarīgajiem mainīgajiem – katla darbības laiku un skābekļa saturu dūmgāzēs. Iegūts 2.7.vienādojums:

$$PM = 50,6676 + 1,14401 \times Laiks - 1,73636 \times O_2 \quad (2.7.)$$

kur Laiks – katla darbības laiks, h;

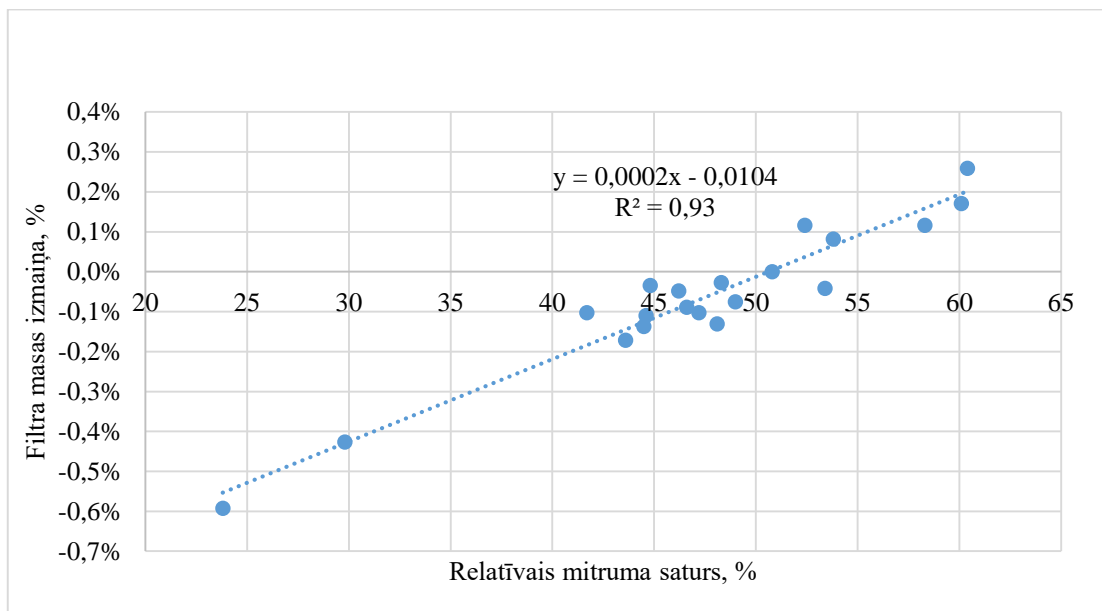
O_2 – skābekļa koncentrācija dūmgāzēs, %.

R^2 ir 0,94, p-vērtība nepārsniedz 0,05, kas raksturo statistiski nozīmīgu saikni starp vienādojumā esošajiem parametriem pie 95,0 % ticamības līmeņa. Aprēķināto mainīgo standartkļūda ir 0,76. Atšķirība starp mērītajām un ar iegūto vienādojumu aprēķinātajām *PM* koncentrācijām ir uzrādīta 2.15. attēlā.



2.15. att. Salīdzinājums starp mērītajām un aprēķinātajām *PM* koncentrācijas vērtībām.

PM koncentrācijas noteikšanu būtiski ietekmējošs parametrs ir daļiņu uztveršanas filtru masa un tās izmaiņas. Katra filtra masa var mainīties par 10 mg. Šī masas izmaiņa rodas vides relatīvā mitruma satura izmaiņu rezultātā. Pieaugot mitruma saturam, pieaug arī filtra masa un otrādi. Saikne starp relatīvajām filtru masas izmaiņām un relatīvo mitruma saturu ir atspoguļota 2.16. att. Atsauces vērtības vides apstākļus raksturojošajiem parametriem ir 50 % relatīvais mitrums un 22 °C gaisa temperatūra. Lai gan skaitlis relatīvās filtra masas izmaiņas ir mazas (līdz 1 %), realitātē tie ir 1 mg līdz 1,5 mg, kas salīdzinājumā ar uztverto *PM* masu rada būtisku ietekmi uz *PM* koncentrācijas rezultātiem.



2.16. att. Filtru masas izmaiņas (%) vides relatīvā mitruma satura izmaiņu ietekmē.

Vislielākās filtru masas izmaiņas novērojamas pie zemākām (līdz 30 %) un augstākām (virs 55 %) relatīvā mitruma satura vērtībām. Filtra masas izmaiņa veiktajos eksperimentos ir robežās no -0.6 % līdz +0,3 %.

3. APRĒĶINA MODELIS MIGLAS APARĀTA DARBĪBAS ANALĪZEI

3.1. Piliena pārvietošanās mitru gāzu plūsmā kondensācijas gadījumā

MA paredzēts mitru gāzu attīrīšanai, iesmidzinot tajās ūdeni. Ūdens pilieni mijiedarbojas ar gāzu plūsmu un *PM*, notiek tvaika kondensācija un *PM* uztveršana. Tieša kontakta kondensatoros nākas saskarties ar divu veidu situācijām: procesiem starp mitrām gāzēm un izkliedētiem ūdens pilieniem un procesiem izkliedētā vidē – pilienu un plūsmas mijiedarbību. Pēdējie ir būtiski un vieni no sarežģītākajiem procesiem plūsmu dinamikā [114].

Mitru gāzu plūsmā iesmidzinātie pilieni ir ar noteiktu sākuma diametru d_{d0} . Pieņem, ka pilienu plūsma ir viendabīga ar sfēriskas formas vienāda diametra pilieniem. Pilienam pārvietojoties mitras gāzes plūsmā, tā diametrs kondensācijas gadījumā pieaug, bet iztvaikošanas gadījumā – samazinās. Uz piliena virsmas notiek gāzes plūsmā esošo ūdens tvaiku kondensācija, kas palielina to izmērus.

Pārvietošanās laikā daļa pilienu saskaras (*collision*), tā rezultātā tie vai nu saplūst (*coalescence*), vai arī sadalās mazāka izmēra pilienos. Saplūšanas efektivitāte ir augsta, tā novērojama vairumā saskares gadījumu. Pilienu saplūšana izraisa lielāka izmēra pilienu veidošanos, un tā rezultātā pat sākuma viendabīgais pilienu diametru sadalījums kļūst polidisperss. Pilienu saskares efektivitāte ir apgriezti proporcionāla piliena diametram. Lielāka izmēra pilieni atgrūž ļoti maza izmēra pilienus, jo zem liela diametra piliena veidojas saspiestas gāzes slānis, kas atgrūž mazos pilienus. Procesa izpētei ir nepieciešams noteikt procesus raksturojošus parametrus [115].

Modeļa izveidē noteikti sekojoši pieņēmumi:

- pilienu un *PM* sadalījums ir viendabīgs ar noteiktu sākuma diametru, attiecīgi d_{d0} un d_p ;
- pilienu tilpuma un virsmas temperatūra pilienu mazo izmēru dēļ ir vienādas;
- *PM* ātrums un temperatūra ir vienāda ar gāzes ātrumu un temperatūru;
- siltuma apmaiņā neņem vērā radiācijas siltumu, jo procesa temperatūra ir zema;
- pieņem, ka pilienu saplūšana un sadalīšanās to saskares rezultātā ir vienāda;
- sauso gāzu plūsma aparātā ir nemainīga;
- pilieni ir sfēriski;
- pilienu kustībā netiek ņemti vērā Arhimēda spēki;
- neievēro gāzes plūsmas izmaiņas *PM* uztveršanas rezultātā;
- *PM* uztveršana notiek inerces mehānisma darbības rezultātā;
- gāze aplūkojama kā ideāla gāze, kurai piemērojams gāzes stāvokļa vienādojums.

Pilienu masa m_d

Pilienu kustība un mitru gāzu plūsma aparātā ir pretēji vērsta. Pilienu masa procesā mainās un kondensācijas gadījumā palielinās uz kondensētā tvaika rēķina. Siltuma un masas apmaiņas procesi norit tad, kad pilieni atrodas miglas aparātā. *Z* ass virziens ir pretējs pilienu kustības virzienam, tāpēc masas izmaiņas, ja masas pārneses virzošais spēks ir tvaika parciālo spiedienu starpība, var izteikt šādi:

$$\frac{dm_d}{dz} = -\beta \frac{\pi d_d^2}{H} M_v (p_b - p^{sat}), \text{ kg}/(m \cdot s) \quad (3.1.)$$

kur m_d – piliena masa, kg;

β_p – masas pārnese koeficients parciālo spiedienu izmaiņu gadījumā, kmol/(N · s);

dZ – iekārtas elementa augstums, m;

d_d – piliena diametrs, m;

H – aparāta augstums, m.

M_v – tvaika molmasa, 18 kg/kmol;

p^{sat} – piesātināta tvaika parciālais spiediens uz piliena, Pa;

p_b – tvaika parciālais spiediens gāzes plūsmā, Pa.

Piesātināta tvaika parciālā spiediena noteikšanai izmantota Totena (*O. Toten*) uzlabota formula [116]:

$$p^{sat} = 610,78 \exp\left(\frac{17,27 \times t_s}{t_s + 237,3}\right) \quad (3.2.)$$

kur t_s – pilienu piesātinājuma temperatūra, °C.

Tvaika parciālo spiedienu gāzes plūsmā nosaka izmantojot gāzes mitruma saturu

$$p_b(t_b) = \frac{p\omega}{0,622 + \omega} \quad (3.3.)$$

kur p – sistēmas pilnais spiediens, Pa;

ω – gāzes mitruma saturs, kg/kg_{dg}.

Mitras gāzes pilns spiediens ir sastāvdaļu parciālo spiedienu summa

$$p = p_{dg} + p_{vb} \quad (3.4)$$

kur p_{dg} – sausās gāzes parciālais spiediens, Pa;

p_{vv} – ūdens tvaiku parciālais spiediens, Pa. Iekārtās, kurās nav paaugstināta spiediena, pieņem, ka pilns spiediens $p = 101\,325$ Pa.

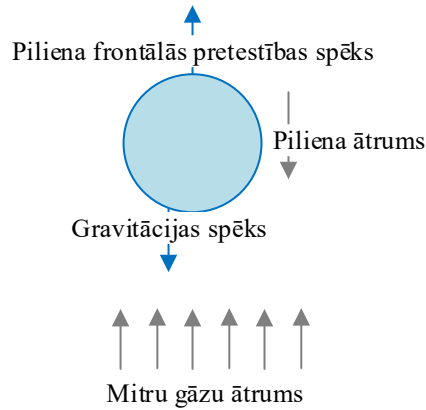
Piliena ātrumi plūsmā

Aplūkojot pilienu vertikālu kustību gāzes plūsmā, noteikti vairāki ātrumi:

- pilienu nogulsšanās ātrums gāzē (*terminal velocity*);
- plūsmas ātrums;
- pilienu ātrums aparātā.

Pilienu patiesais ātrums plūsmā nosaka laiku, cik ilgi piliens atrodas aparātā. Ātrums ir vektorāls lielums, ko raksturo vērtība un virziens. Lai noteiktu ūdens pilienu ātrumu aparātā u_r , jāaplūko spēki, kas darbojas uz pilienu: smaguma spēks, tam pretēji vērtais Arhimēda spēks; pilienu frontālās pretestības spēks. Piliens kustēsies ar ātrumu u_r , ja starp vienā virzienā vēršiem Arhimēda un pretestības spēkiem, un pretēji vērstu gravitācijas spēku būs līdzsvars, kā tas redzams 3.1. attēlā. [117].

Sistēmās, kurās gāzes plūsma ir pretēja pilienu kustībai, uz to iedarbojas gāzes plūsmas izraisīts papildus frontālās pretestības spēks. Šis spēks samazina pilienu ātrumu u_d un var būt gadījumi, kad pretplūsmas gadījumā plūsma pilienu pārvieto pretējā virzienā. MA normāla darbība ir iespējama, ja $u_d > u_g$. Pilienu ātrums plūsmā ir atkarīgs no plūsmas virziena. Pretplūsmas gadījumā pilienu ātrums plūsmā ir aprēķināms pēc vienādojuma (3.5.).



3.1. att. Piliena kustību noteicošu spēku shēma, balstīts uz [117].

$$u_d = u_r - u_g, m/s \quad (3.5)$$

Piliena ātrums plūsmā nosaka tā kustības režīmu.

Siltuma un masas apmaiņa starp pilienu un gāzes plūsmu, kā arī PM uztveršana, ir atkarīgi no piliena un gāzes plūsmas relatīvā ātruma. Piliena relatīvo ātrumu attiecībā pret gāzi pretplūsmas gadījumā nosaka kā

$$u_r = u_d + u_g, m/s \quad (3.6)$$

Sfēriskam pilienam nogulsšanās ātrumu nekustīgā gāzē var noteikt ar sekojošas sakarības palīdzību

$$u_t = \sqrt{\frac{4(\rho_w - \rho_g)gd_d}{3\rho_g C_D}}, m/s \quad (3.7)$$

kur u_t – piliena nogulsšanās ātrums nekustīgā gāzē, m/s;

ρ_w – ūdens piliena blīvums, kg/m^3 ;

ρ_g – mitru gāzu blīvums, kg/m^3 ;

g – brīvas krišanas paātrinājums, m/s^2 ;

C_D – vides pretestības koeficients.

Saistību starp piliena nogulsšanās, relatīvo, piliena un gāzes ātrumu nosaka sakarība [118]:

$$u_t = u_r = u_d + u_g, m/s \quad (3.8)$$

Vides pretestības koeficienta C_D izmaiņas

Vides pretestības koeficients ir atkarīgs no piliena krišanas režīma, tāpēc tā noteikšanai ir jāzina kustības režīmu raksturojošs Re skaitlis, kurā arī ietilpst u_r :

$$Re = \frac{u_r d_d \rho_g}{\mu_g} \quad (3.9)$$

kur μ_g – mitras gāzes dinamiskā viskozitāte, $Pa \cdot s$.

Sakarības starp nogulsšanās ātrumu un vides pretestības koeficientu nosaka gravitācijas un pretestības spēku balance. Aprēķinus sarežģī tas, ka C_D nav konstants un dažādiem kustību

režīmiem vides pretestības koeficienta izmaiņas nosaka dažādi atšķirīgi likumi: Stoksa (*Stokes*), Oseņa (*Oseen*) un Goldsteina (*Goldstein*). Katrs likums ir spēkā šaurā *Re* izmaiņu diapazonā. Paplašinot *Re* izmaiņu diapazonu teorētiskās sakarības kļūst neprecīzas, tāpēc praksē izmanto empīriskas vai pusempīriskas vides pretestības koeficienta aprēķina formulas. Formulas atšķiras ar sarežģītības pakāpi un tajās ietvertajām konstantēm [119]. Empīrisko sakarību pamatā galvenokārt ir Stoksa likums [120]. Vienotas sakarības izveide plašam *Re* diapazonam ir būtiska modelēšanā, un tās meklējumiem ir pievērsta pastiprināta uzmanība [121]. Autori [122] piedāvā vienotu sakarību *Re* izmaiņas diapazonam $0,1 \leq Re \leq 3 \cdot 10^5$, kas atspoguļota turpinājumā:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0,197Re^{0,63} + 2,6 \times 10^{-4}Re^{1,38}) \quad (3.10.)$$

Aprēķinos izmanto pakāpeniskas tuvināšanas jeb iterācijas metodes. Pieņem *Re* vērtību un, izmantojot 3.10. vienādojumu, aprēķina vides pretestības koeficientu. Izmantojot 3.8. izteiksmi, aprēķina piliena relatīvo ātrumu, izmantojot 3.9. izteiksmi, *Re* vērtību. Ja vērtība atšķiras no pieņemtās, tad aprēķinu atkārto, līdz iegūtā vērtība sakrīt ar pieņemto.

Piliena ātrums aparātā mainās atkarībā no piliena masas izmaiņām un kustības aerodinamiskās pretestības, kura savukārt atkarīga no kustības režīma (*Re*). Kā redzams iepriekš, piliena ātrums ir $u_d = u_r - u_g = u_r - u_g$. Izteiksmi piliena ātruma izmaiņām var iegūt aplūkojot piliena kinētiskās enerģijas izmaiņas spēku darbības rezultātā [123]. Uz daļiņu, kas kustas gāzes plūsmā, iedarbojas divi spēki – gravitācijas spēks un pretēji daļiņas kustībai vērsts berzes spēks. Arhimēda spēks gāzē ir mazs, tāpēc to var neņemt vērā. Piliena ātruma izmaiņas gāzes plūsmā var izteikt ar vienādojumu:

$$\frac{du_d}{dZ} = \frac{3C_D u_r \mu_g Re}{4\rho_w d_d^2 u_d} - \frac{g}{u_d}, m/(m \cdot s) \quad (3.11.)$$

Turpmākajos aprēķinos jāizmanto iepriekš iterācijas procesā noteiktās u_r un *Re* vērtības.

Piliena diametrs d_d

Piliena diametra izmaiņas ir saistītas ar piliena masas izmaiņām ūdens tvaika kondensācijas rezultātā. Šajā gadījumā netiek aplūkotas ar pilienu saskari saistītās pilienu diametra izmaiņas, kā rezultātā tie var dalīties vai saplūst. Piliena diametra izmaiņas nosaka ar vienādojumu:

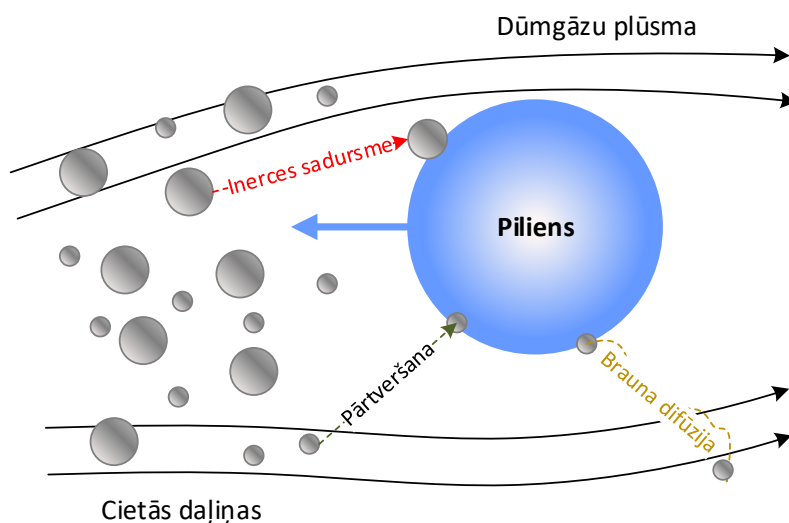
$$\frac{dd_d}{dZ} = - \frac{2\beta_p M_v (p_b - p^{sat})}{\rho_w u_d}, m/m \quad (3.12.)$$

kur β_p – masas pārejas koeficients no mitras gāzes uz pilienu virsmu, kmol/N · s.

Jāpievērš uzmanība tam, ka 3.12. vienādojums nosaka diametra izmaiņas konkrētā izmaiņu posmā – elementā. Lai noteiktu diametra vērtību elementa izejā, diametra pieaugumam jāpievieno tā vērtība elementa ieejā. Piliena sākuma diametrs d_{d0} pieņemts vai aprēķināts, ja zināms pilienu diametru sadalījuma likums pēc sprauslas [124].

3.2. Piliena cieto daļiņu uztveršana

Pilienam virzoties cauri piesārņotas gāzes plūsmai, tas uztver *PM* un attīra gāzi. *PM* koncentrācija plūsmā samazinās. Pieņemts, ka daļiņas un gāze virzās ar vienādu ātrumu un nav *PM* un gāzes relatīvās kustības. Mitros skruberos ir vērojami sekojoši *PM* uztveršanas mehānismi [125]: inerces, satveršanas un difūzijas (3.2. att.).



3.2. att. Piliena un *PM* savstarpējās saskares mehānismi, balstīts uz [126].

Specifiskos gadījumos var darboties arī difūzās forēzes, termoforēzes, elektriskā lauka u. c. mehānismi [127]. Iesmidzināšanas skruberos kurināmā degšanas produktu *PM* uztveršanā noteicošais ir inerces mehānisms [126]. Piliena *PM* uztveršanas efektivitāti inerces mehānisma gadījumā var aprēķināt šādi [128]:

$$\eta_d = \left(\frac{Stk}{Stk+0,35} \right)^2 \quad (3.13.)$$

kur *Stk* – piliena Stoksa skaitlis. Stoksa skaitļa aprēķiniem izmanto izteiksmi:

$$Stk = \frac{d_p^2 \rho_p u_r C_c}{18 \mu_w g d_d} \quad (3.14.)$$

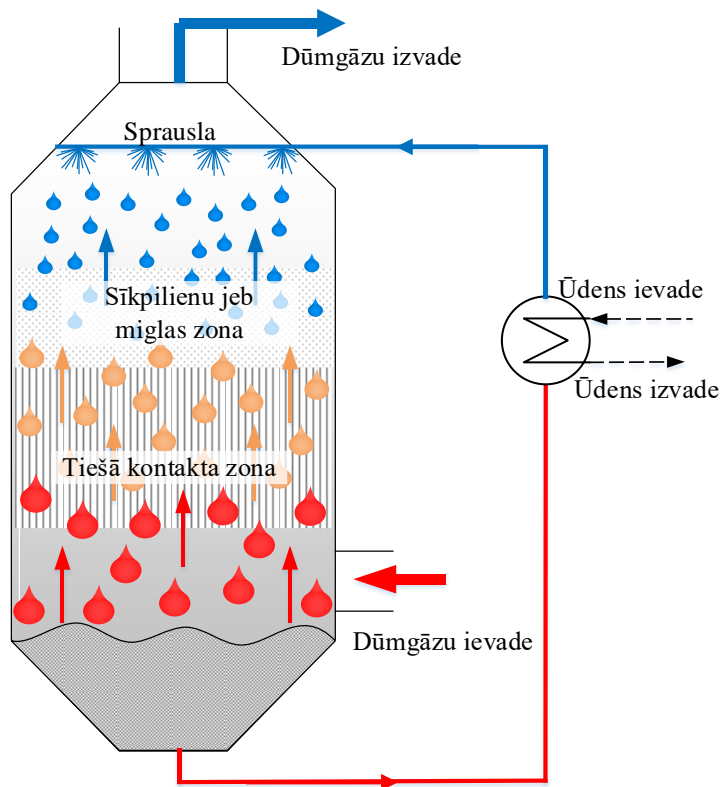
kur ρ_p – cietās daļiņas blīvums, kg/m^3 ;

d_p – cietās daļiņas diametrs, m;

C_c – Kanninghama (*Cunningham*) labojuma faktors daļiņas izmēram. Kanninghama labojuma faktors ir vērtība, ja daļiņas izmērs ir mazāks par $15 \mu\text{m}$ ($0,015 \text{ mm}$). Lielāka diametra daļiņām faktors ir aptuveni 1,33.

Procesi starp plūsmām

Tiešā kontakta kondensatoros siltuma un masas apmaiņas virsmu veido ievadītā ūdens pilienu un gāzes fāžu pārejas virsma. Fāžu pārejas virsma ir mainīga, un to lielā mērā nosaka abu plūsmu hidrodinamiskie režīmi. Paaugstināta mitruma saturs un zems ūdens temperatūras rezultātā notiek intensīva tvaiku kondensācija uz pilienu virsmas un pilienu diametrs palielinās. Savukārt gāzes mitruma saturs samazinās.



3.3 att. MA darbības shēma.

Mitras gāzes plūsmu aplūko kā sausas gāzes un ūdens tvaika maisījuma plūsmu

$$m_g = m_{dg} + m_v = m_{dg} + m_{dg}x = m_{dg} \times (1 + \omega) \quad (3.15.)$$

kur m_g – mitro gāzu masas plūsma, kg/s;
 m_{dg} – sauso gāzu masas plūsma, kg/s;
 m_v – ūdens tvaika masas plūsma, kg/s.

Gāzu mitruma satura ω izmaiņas aparātā

Gāzu mitruma saturs ir mitras gāzes ūdens tvaika masas attiecība pret sausas gāzes masu, ko var izteikt šādi:

$$\omega = \frac{m_v}{m_{dg}} = -\frac{\Delta m_g}{m_{dg}} = \frac{\Delta m_w}{m_{dg}}, \text{ kg/kg}_{dg} \quad (3.16.)$$

kur m_w – ūdens masas izmaiņas, kg/s.

Mitruma satura izmaiņas izraisa mitrās gāzes ūdens tvaika kondensācija uz pilienu virsmas. Tā rezultātā samazinās gāzes masas plūsma, pieaug ūdens masas plūsma un plūsmu izmaiņas atbilst kondensēto tvaiku daudzumam. Kondensācijas procesa virzītājspēks ir plūsmas mitruma daļējais spiediens un piesātinājuma spiediens uz pilienu virsmas starpība. Mitruma kondensācija uz pilienu virsmas izraisa tā masas izmaiņas. Kondensāta izmaiņas aparātā iegūst reizinot abas puses ar pilienu skaitu:

$$\frac{dm_w}{dz} = -\beta_p \frac{\pi d_d^2}{H} M_v (p_b - p^{sat}) n_{tot}, \text{ kg/(s} \cdot \text{m)} \quad (3.17.)$$

kur η_{tot} – pilienu skaits aparātā.

Ievērojot sakarību starp kondensāta izmaiņām un mitruma saturu (3.16. vienādojums), izteiksmi 3.17. var pārveidot un mitruma satura aprēķina gala izteiksmes formulu iegūst ievietojot pilienu skaita n_{tot} izteiksmi:

$$\frac{d\omega}{dz} = -\frac{6V_w\beta_p d_d^2 M_v (p_b - p^{sat})}{d_{d0}^3 u_d m_{dg}}, \text{ kg/kg}_{dg} \quad (3.18.)$$

kur V_w – iesmidzināmā ūdens plūsma, m^3/s .

Cieto daļiņu koncentrācijas C_p izmaiņas

Kā redzams aparāta shēmā, piesārņotās gāzes ievada aparāta lejas daļā, un tās virzās augšup Z ass pozitīvā virzienā. Ūdens pilienu veidā virzās pretēji gāzes plūsmai. Saskaroties pilieniem ar PM , notiek daļiņu uztveršana un PM koncentrācijas samazināšana mitru gāzu plūsmā. Lai vērtētu PM uztveršanas efektivitāti, ir jāzina daļiņu apjoms, kas vienlaikus aizpilda aparāta tilpumu (aizpildījums, *holdup*). To aprēķina šādi:

$$H_d = \frac{V_w \frac{H}{AZ}}{Au_d} = \frac{V_w}{Au_d} \quad (3.19.)$$

kur H_d – aparāta aizpildījums ar pilieniem;

A – aparāta šķērsriezuma laukums, m^2 ;

H – aparāta augstums, m .

Redzams, ka aizpildījumu ietekmē iesmidzinātā šķidrums daudzums un daļiņu kustības ātrums aparātā. Iesmidzinātā ūdens daudzumu nosaka ūdens un gāzes tilpuma attiecība (litri ūdens pret kubikmetriem gāzes). PM_{10} uztveršanai, ja pilienu izmērs ir no 0,5 mm līdz 2,0 mm, šo attiecību rekomendē [128] izvēlēties 0,7 l/m^3 līdz 2,7 l/m^3 robežās. Danzomola B. A. u. c. (*Bashir Ahmed Danzomol, et. al.*) veiktie eksperimentālie pētījumi liecina, ka optimāla PM uztveršana ir vērojama, ja pilienu diametrs ir 0,5 mm un ūdens un gāzes attiecība 2,7 l/m^3 . Attiecību var izteikt kā 0,0027 $V_w, \text{m}^3/V_g, \text{m}^3$.

Jāatzīmē, ka aizpildījums raksturo situāciju, kurā ātrums ir nemainīgs. Ja ātrums ir nemainīgs (nemainīga gāzes plūsma), tad koncentrācijas izmaiņas var noteikt šādi [128]:

$$\frac{C_{p\ iz}}{C_{p\ ie}} = \exp\left(-\frac{1,5G_w u_r Z \eta_d}{V_{wg}(u_r - u_{wg})d_d}\right) \quad (3.20.)$$

kur $C_{p\ iz}$; $C_{p\ ie}$ – cieto daļiņu koncentrācija aparāta izejā un ieejā, kg/m^3 .

Aparāta PM uztveršanas efektivitāte no dūmgāzēm ir:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{1,5G_u r Z \eta_d}{V_g(u_r - u_g)d_d}\right) \quad (3.21.)$$

kur η – aparāta cieto daļiņu attīrīšanas efektivitāte;

η_d – pilienu skaits aparātā laika vienībā, $1/\text{s}$.

Nemainīgas gāzu plūsmas gadījumā PM masas bilanci var izteikt ar 3.22. vienādojumu:

$$V_g \frac{dC_p}{dz} = - \frac{1,5C_p u_r \eta_d V_w d_d^2}{u_d d_{d0}^3}, kg/(s \cdot m) \quad (3.22.)$$

Ir jāievēro, ka daļiņas ātrums ir mainīgs, jo, kondensējoties tvaikam no mitrām gāzēm uz pilieniem, mainās gāzes plūsma aparātā. Daļiņu ātrums mainās, arī mainoties gāzes temperatūrai. Elementāram aparāta tilpumam daļiņu masas saglabāšanas vienādojumu var uzrakstīt [129] sekojoši:

$$\frac{d(V_g C_p)}{dz} = - \frac{1,5C_p u_r \eta_d V_w d_d^2}{u_d d_{d0}^3}, kg/(s \cdot m) \quad (3.23.)$$

Vai izvēršot vienādojuma kreiso pusi, šādi:

$$C_p \frac{d(V_g C_p)}{dz} + V_g \frac{dC_p}{dz} = - \frac{1,5C_p u_r \eta_d V_w d_d^2}{u_d d_{d0}^3}, kg/(s \cdot m) \quad (3.24.)$$

Ja pieņemam, ka gāzes plūsmas izmaiņas ir saistītas vienīgi ar temperatūras izmaiņām, tad, izmantojot gāzes stāvokļa vienādojumu, var rakstīt sekojoši:

$$\frac{dV_g}{V_g} = \frac{dt_g}{t_g} \quad (3.25.)$$

kur t_g – gāzes temperatūra, °C.

Ievērojot pēdējo sakarību, koncentrācijas izmaiņas aparātā var izteikt šādi:

$$\frac{dC_p}{dz} = - \frac{1,5C_p u_r \eta_d V_w d_d^2 \Delta Z}{u_d d_{d0}^3 V_g} - \frac{C_p dt_g}{(273+t_g)}, kg/(m^3 \cdot m) \quad (3.26.)$$

Šajā vienādojumā jāņem vērā, ka ir veikta virkne pieņēmumu: nav ievērotas gāzes plūsmas izmaiņas tvaiku kondensācijas un cieto daļiņu uztveršanas rezultātā.

3.2.1. Siltuma un masas apmaiņa starp pilieniem un mitru piesārņotu gāzes plūsmu

Ja starp pilieniem un gāzēm notiek siltuma un masas apmaiņa, tad piliena temperatūra mainās. Izmaiņas var noteikt, aplūkojot piliena siltuma bilances vienādojumu, kas saista piliena siltuma izmaiņas Z ass virzienā ar siltuma apmaiņas ceļā pievadīto siltumu, mitru gāzu tvaika kondensācijas siltumu un uztverto cieto daļiņu pienesto siltumu:

$$\frac{dQ_d}{dz} = \frac{dQ_{ht}}{dz} + \frac{dQ_c}{dz} + \frac{dQ_p}{dz}, J/(s \cdot m) \quad (3.27.)$$

kur Q_d – piliena siltums, J/s;

Q_{ht} – siltuma apmaiņas siltums, J/s;

Q_c – tvaika kondensācijas siltums, J/s;

Q_p – cieto daļiņu siltums, J/s.

Piliena siltumu un temperatūru nosaka šādi:

$$\frac{dQ_d}{dz} = c_{pw} m_{df} \frac{dt_d}{dz} = c_{pw} \frac{\pi \times d_d^3}{6} \rho_w \frac{dt_d}{dz} \rightarrow \frac{dt_d}{dz} = \frac{6 \frac{dQ_d}{dz}}{c_{pw} \pi d_d^3 \rho_w} \quad (3.28.)$$

kur m_{df} – piliena masas plūsma, kg/s;

t_d – piliena temperatūra, °C.

Siltuma apmaiņas ceļā pilienam pievadītais siltums ir aprēķināms šādi:

$$\frac{dQ_{ht}}{dZ} = \alpha \frac{F_d}{H} (t_g - t_d) = \alpha \frac{\pi d_d^2}{H} (t_g - t_d), J/(s \cdot m) \quad (3.29.)$$

kur α – siltuma pārejas koeficients no gāzes uz pilienu, $W/m^2 \cdot K$;

F_d – piliena virsmas laukums, m^2 .

Ūdens tvaika kondensācijas siltums uz piliena virsmas:

$$\frac{dQ_c}{dZ} = \beta_p \frac{F_d}{H} M_v (p_b - p^{sat}) [r + c_{pv} (t_g - t_d)] = \beta_p \frac{\pi d_d^2}{H} M_v (p_b - p^{sat}) [r + c_{pv} (t_g - t_d)], J/(s \cdot m) \quad (3.30.)$$

kur r – ūdens fāzu pārejas siltums, kuru nosaka t_d temperatūrā, J/kg ;

c_{pv} – ūdens tvaika īpatnējā siltumietilpība, $J/(kg \cdot K)$.

Piliena uztverto PM pienestais siltums aprēķināms sekojoši:

$$\frac{dQ_p}{dZ} = C_p u_r \frac{\pi d_d^2}{4H} \eta_{de} c_{pp} (t_g - t_d), J/(s \cdot m) \quad (3.31.)$$

kur C_p – cieto daļiņu koncentrācija gāzē, kg/m^3 ;

c_{pp} – cieto daļiņu īpatnējā siltumietilpība, $J/(kg \cdot K)$;

η_{de} – piliena cieto daļiņu uztveršanas efektivitāte.

Ievietojot piliena skaita η_{tot} izteiksmi, un, veicot pārveidojumus, temperatūras izmaiņas aparātā nosaka ar izteiksmi:

$$\frac{dt_d}{dZ} = \frac{6d_d^2}{\rho_w c_p d_{d0}^3 u_d} \left[-\alpha (t_g - t_d) - \beta_p M_v (p_b - p^{sat}) [r + c_{pv} (t_g - t_d)] - 1,5 C_p u_r \eta_{de} c_{pp} (t_g - t_d) \right] \quad (3.32.)$$

Vienādojuma labās puses izteiksmes ir negatīvas, jo pilienu temperatūra Z ass virzienā samazinās. Gāzes plūsmas temperatūra mainās saistībā ar siltuma atdevi siltuma apmaiņas rezultātā ar ūdens pilieniem, ūdens tvaika pārnesi masas pārejas ceļā uz pilieniem un siltuma pārnesi no gāzes uz pilieniem ar uztvertajām PM . Aplūkojot gāzes plūsmas siltuma bilanci, ir jāņem vērā visu pilienu virsmas laukums, jo caur to notiek saskare starp abiem siltumnesējiem. Ir jāzina pilienu skaits aparātā.

Lielums n_d nosaka, cik pilienu ir aparātā laika vienībā. Tā kā pieņemam, ka pilieni nesaplūst un nedalās, bet vienīgi pieaug to masa un tilpums, pilienu daudzumu var noteikt, iesmidzināmā ūdens tilpuma plūsmu dalot ar piliena sākuma tilpumu. Balstoties uz pilienu skaitu aparātā vienā sekundē, aprēķina kopējo pilienu skaitu aparāta tilpumā.

$$n_{sk} = \frac{6V_w H}{\pi d_{d0}^3 u_d} \quad (3.33.)$$

kur V_d – piliena sākuma tilpums, m^3 .

Ievērojot pilienu skaitu, no gāzes plūsmas siltuma bilances var izteikt temperatūras izmaiņas elementā.

$$\frac{dt_g}{dz} = \frac{6V_w d_d^2}{d_{d0}^3 u_d m_g c_{pg}} \left[-\alpha(t_g - t_d) - \beta_p M_v c_{pv} (p_b - p^{sat})(t_g - t_d) - \frac{1}{4} C_p u_r \eta_d c_{pp} (t_g - t_d) \right] \quad (3.34.)$$

kur c_{pg} – gāzu īpatnējā siltumietilpība, J/(kg · K).

Siltuma un masas apmaiņas koeficienti starp pilieniem un mitru piesārņotu gāzes plūsmu

Siltuma un masas apmaiņas koeficientu aprēķinam izmantotas Ranza un Maršala sakarības (*the Ranz and Marshall correlation*), kas piedāvātas darbā [130]:

$$Nu = \frac{\alpha d_d}{\lambda_g} = 2 + 0,6Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad (3.35.)$$

$$Sh = \frac{\beta c d_d}{D_v} = 2 + 0,6Sc^{1/3} Re^{1/2} \quad (3.36.)$$

kur Nu – Nuselta skaitlis (*the Nusselt number*);

Sh – Šervuda skaitlis (*the Sherwood number*);

λ_g – gāzes siltumvadītspējas koeficients, W/(m · K);

D_v – tvaika difūzijas koeficients, m²/s.

Līdzības skaitļu aprēķinam izmanto šādas izteiksmes:

$$Re = \frac{\rho_g u_r d_d}{\mu_g}$$

$$Pr = \frac{\mu_g c_{pg}}{\lambda_g} \quad (3.37. - 3.39.)$$

$$Sc = \frac{v_g}{D_v} = \frac{\mu_g}{D_v \rho_g}$$

kur μ_g – gāzes dinamiskā viskozitāte, kg/(m · s);

v_g – gāzes kinemātiskā viskozitāte, m²/s.

3.3. Modeļa realizācijas algoritms

Modeļa galvenie rezultāti ir parametru izmaiņas iekārtā, ko raksturo seši pamatvienādojumi.

$$\frac{dt_g}{dz} = \frac{n_{sk} \pi d_d^2 \Delta Z}{u_d m_g c_{pg}} \left[-\alpha(t_g - t_w) - \beta_p M_v c_{pv} (p_b - p^{sat})(t_g - t_w) - \frac{1}{4} C_p u_r \eta_d c_{pp} (t_g - t_w) \right] \quad (3.40.)$$

kur $\frac{dt_g}{dz}$ – dūmgāzu temperatūras izmaiņas, °C;

$$n_{sk} = \frac{6V_w}{\pi d_{d0}^3} - \text{pielienu skaits iekārtā, } \frac{1}{s}.$$

$$\frac{dt_w}{dz} = \frac{n_{sk} \pi d_d^2 \Delta Z}{V_w \rho_w c_{pw} u_d} \left[-\alpha(t_g - t_w) - \beta_p M_v (p_b - p^{sat}) [r + c_{pv} (t_g - t_w)] - 1,5 C_p u_r \eta_d c_{pp} (t_g - t_w) \right] \quad (3.41.)$$

kur $\frac{dt_w}{dz}$ – ūdens temperatūras izmaiņas, °C;

$$\frac{dd_d}{dZ} = -\frac{2\beta_p M_v (p_b - p^{sat}) \Delta Z}{\rho_w u_d} \quad (3.42)$$

kur $\frac{dd_d}{dZ}$ – ūdens piliena diametra izmaiņas, m;

$$\frac{du_d}{dZ} = -\frac{3C_D u_r \mu_g Re \Delta Z}{4\rho_w d_d^2 u_d} + \frac{g \Delta Z}{u_d} \quad (3.43)$$

kur $\frac{du_d}{dZ}$ – piliena ātruma izmaiņas, m/s;

$$\frac{dc_p}{dZ} = -\frac{n_{sk} 0,25 C_p u_r \eta_d \pi d_d^2 \Delta Z}{u_d V_g} + \frac{c_p dt_g}{(273+t_g)} \quad (3.44.)$$

kur $\frac{dc_p}{dZ}$ – cieto daļiņu koncentrācijas izmaiņas, kg/m³.

$$\frac{d\omega}{dZ} = -\frac{n_{sk} \beta_p \pi d_d^2 M_v (p_b - p^{sat}) \Delta Z}{u_d m_{dg}} \quad (3.45.)$$

kur $\frac{d\omega}{dZ}$ – gāzes mitruma satura izmaiņas, kg/kg_{da}.

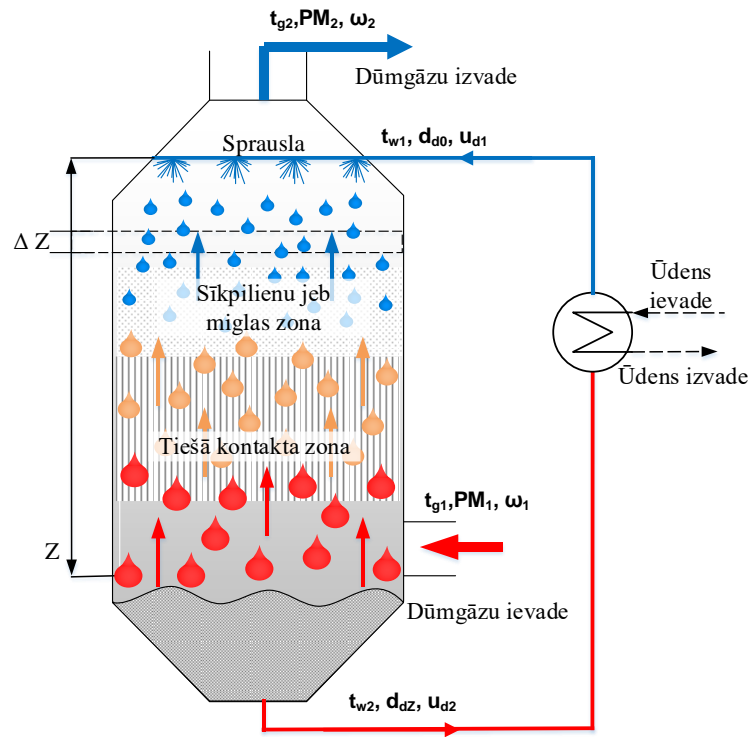
Programma, kas ietver MA aprēķina modeli, rakstūta *PYTHON 3.7*, izmantojot *Visual Studio 2019*. Programma ietver siltumfizikālo parametru aprēķinu, palīgvienādojumus un galveno parametru izmaiņu aprēķinu. Galvenie parametri, kuru izmaiņas aplūkotas modelī, ir: iesmidzinātā ūdens temperatūra; dūmgāzu temperatūra; iesmidzinātā ūdens pilienu diametrs un ātrums; cieto daļiņu koncentrācija; gāzes mitruma saturs. Izmantojot iegūtos modeļa datus, aprēķināta MA jauda. Modeļa izveidē veiktie pieņēmumi aprakstīti 3.1. apakšnodaļā “Pilienu pārvietošanās mitru gāzu plūsmā kondensācijas gadījumā”. Programmā ir vairāki iterācijas cikli. Aprēķins ietver četras galvenās darbību kopas:

- 1) siltumfizikālo parametru aprēķinu augstumā Z ;
- 2) Re skaitļa aprēķinu;
- 3) individuālā elementa aprēķinu;
- 4) parametru izmaiņu aprēķinu elementa izejā.

Aprēķinu atkārtoti līdz brīdim, kad parametri noteikti visā iekārtas augstumā un ūdens temperatūras, pilienu diametru izmaiņas ir atbilstošas noteiktajam izmaiņu diapazonam (3.4. att.). Aprēķins tiek veikts pa soļiem:

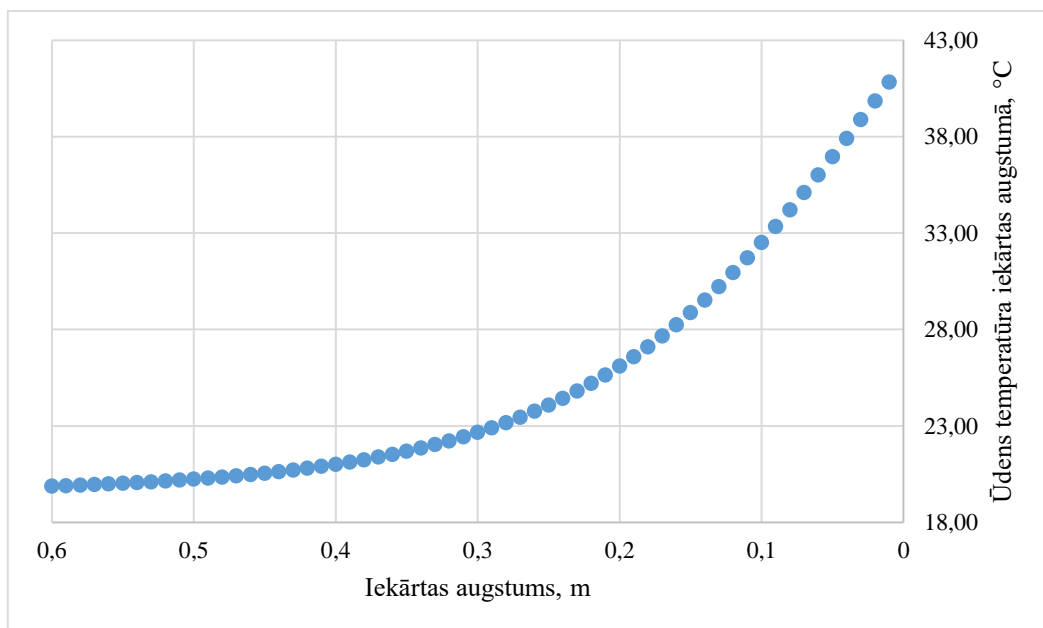
- 1) ievada sensoru mērījumus un konstantes;
- 2) nosaka elementa augstumu ΔZ (parametru izmaiņu solis);
- 3) nosaka ūdens pilienu diametru un temperatūras sākuma vērtības aprēķinā;
- 4) nosaka ūdens pilienu diametru un temperatūras atšķirības robežas ar ievaddatiem;
- 5) aprēķina siltumfizikālos parametrus konkrētā augstumā Z ;
- 6) pieņem sākotnējo Re (ievadā);
- 7) aprēķina reālo Re konkrētajā situācijā;
- 8) nosaka reālā un pieņemtā Re atšķirības robežas;
- 9) ar aprēķināto Re turpina elementa aprēķinus;
- 10) aprēķini parametru izmaiņām elementa izejā (tiek veikti iekārtas augstumā līdz $Z \geq H$, kur H ir iekārtas pilnais augstums);
- 11) pārbauda ūdens temperatūras un pilienu diametru atbilstību ievaddatiem;

12) izvada gala rezultātus, apkopotus *csv* (*comma-separated values*) failā.



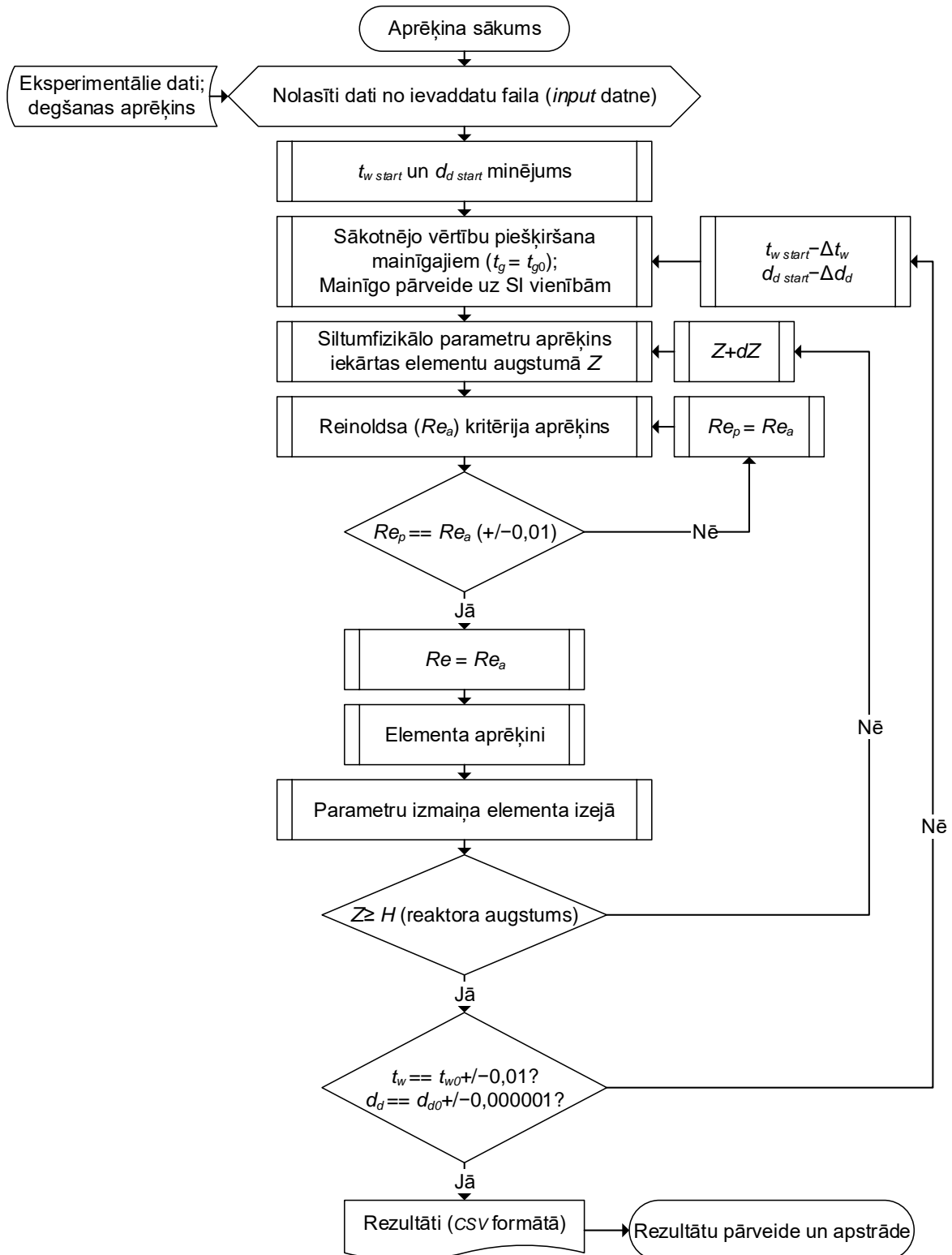
3.4. att. Modeļa darbības princips MA shēmā.

Siltumfizikālo parametru aprēķins ietver siltumietilpību, blīvumu, dinamiskās viskozitātes, siltumvadītspējas koeficientu aprēķinu dūmgāzu komponentēm, aprēķinus difūzijas koeficientam starp vidēm, ūdens fāžu pārejas siltumam. Papildus aprēķināti dažādi siltuma un masas apmaiņu raksturojošie skaitļi, piemēram, *Pr* skaitlis. Iekļauti vienādojumi, kas raksturo *PM* uztveršanu ūdenī, kā arī izmaiņu aprēķins elementos. Galvenie izvades dati ir dūmgāzu temperatūras, ūdens temperatūras, piliena diametra, piliena ātruma, cieto daļiņu koncentrācijas un dūmgāzu mitruma satura izmaiņas.



3.5. att. Modelētās iesmidzinātā ūdens temperatūras izmaiņas iekārtas augstumā.

Izvaddati attēloti izvēlētajos elementos visas iekārtas augstumā, piemēram, ja iekārtas augstums ir 0,6 m un elementa augstums ir 0,01 m, tad aplūkojamās parametru izmaiņas 60 elementos. Piemērs, kas atspoguļo iesmidzinātā ūdens temperatūras izmaiņas iekārtas augstumā, redzams 3.5. attēlā. Ūdeni iekārtā iesmidzina no augšas, tādēļ tā temperatūra pieaug, tuvojoties apakšai. Šajā gadījumā modelēts režīms: katla jauda 20 kW, iesmidzinātā ūdens daudzums ap 150 l/h, iesmidzinātā ūdens temperatūra – ap 20 °C.



3.6. att. Izstrādātā modeļa aprēķina algoritms.

Sensora rādījumi un sagaidāmie rezultāti tiek ievadīti ievades datnē, atbilstoši tajā sniegtajiem norādījumiem. Palaižot programmu, atveras logs, kurā atspoguļotas aprēķina beigu darbības. Programmas rezultāts tiek automātiski saglabāts *csv* datnē. Programma papildus piedāvā attēlot interaktīvus grafikus, ko var palielināt, samazināt vai pietuvināt.

Ievaddatu datnē jānosaka elementa izmērs, kam veiks aprēķinu. Jāievada konstantes, kas ietver katla augstumu, CO_2 , N_2 un H_2O molmasas, gāzu konstante un gravitācijas paātrinājums. Ciklā neiesaistītie lielumi, kas nepieciešami siltumfizikālo parametru aprēķinam un nolasāmi eksperimentu laikā, ir: ūdens tilpums; sausu gāzu un tvaika masas plūsmas; CO_2 , N_2 un gaisa masas plūsmas; CO_2 , sausu gāzu, N_2 , tvaika un gaisa tilpums; gaisa patēriņa koeficients; atmosfēras spiediens; *PM* diametrs un blīvums.

Ciklā iesaistītie lielumi, ko nolasa eksperimentu laikā, ir ieejas dūmgāzu un ūdens temperatūra, ieejas ūdens pilienu diametrs, ieejas dūmgāzu mitruma saturs un masa, ieejas dūmgāzu plūsmas ātrums un *PM* koncentrācija, kā arī ieejas dūmgāzu tilpums. Programmas galveno datņu piemēri aplūkojamie 1.–4. pielikumā.

4. REZULTĀTI

MA sistēmas eksperimenti veikti, izmantojot granulu katlu, ar iespēju mainīt darbības parametrus, lai sasniegtu darbināšanas jaudu diapazonā no 10 kW līdz 30 kW. Ūdens iesmidzināšanai izmantotas trīs dažāda izmēra sprauslas: *MPL 0.77*, *MPL 1.12* un *MPL 1.51*. Sprauslas ir izturīgas pret aizsērēšanu, tajās var izmantot ūdeni ar nelielu piejaukumu daļu.

4.1. Eksperimentālā stenda pārbaudes rezultāti

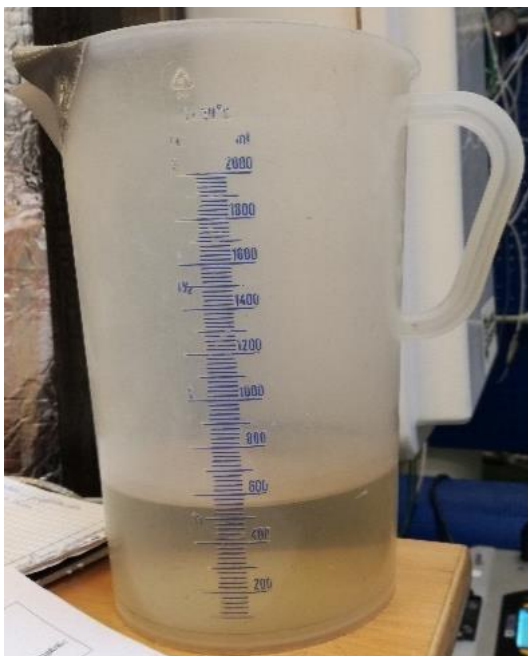
Galvenie mainīgie parametri eksperimentos ir iesmidzinātais ūdens daudzums (caurplūde, G , l/h), ūdens temperatūra kondensatora ievadā (t_{w1} , °C) un pilienu diametrs (d_{d0} , μm). Diametrs cieši saistīts ar izmantotās sprauslas parametriem (iesmidzināšanas spiediens, sprauslas izmērs). Dūmgāzu temperatūras izmaiņas ir saistītas ar katla jaudu un skābekļa daudzumu dūmgāzēs.

Pie granulu katla jaudas 20 kW veikti eksperimenti ar visām sprauslām. Pie lielākās sprauslas *MPL 1.51* veiktajos eksperimentos izmantotas iesmidzinātā ūdens temperatūras no 19,7 °C līdz 40,5 °C, pie iesmidzinātā ūdens daudzuma no 49,2 l/h līdz 250,3 l/h. Sasniegtā MA jauda ir robežās no 0,51 kW līdz 2,56 kW un *PM* uztveršanas efektivitāte no 37,0 % līdz 77,2 % attiecībā pret sākotnējo *PM* koncentrāciju pirms MA. *PM* koncentrācija pirms aparāta mērīta atsevišķos eksperimentos, un atsaucei pieņemta vidējā iegūtā koncentrācija, jo katls vienmēr darbojas vienādā režīmā. Pilienu diametri noteikti atbilstoši sprauslu ražotāju sniegtajam aprēķinam, tie ir robežās no 297 μm līdz 503 μm. Dūmgāzes eksperimentu laikā atdzesētas līdz 28,6 °C. Efektīvākā dūmgāzu dzesēšana novērota pie zemākās iesmidzinātā ūdens temperatūras un lielākās caurplūdes. Taču šajā gadījumā novērota arī pilienu aiznese ārpus iekārtas – dūmvados (4.1. att.).

4.1. tabula

Eksperimentu rezultāti, ja granulu katla jauda ir 20 kW un izmantota sprausla *MPL 1.51*

Nr.	G , l/h	t_{w1} , °C	t_{w2} , °C	Q , kW	d_{d0} , μm	t_{g1} , °C	t_{g2} , °C
1	49,2	20,2	33,2	0,75	503	130,8	74,1
2	149,9	19,7	30,8	1,93	382	135,2	38,1
3	240,9	19,7	28,9	2,56	297	133,8	28,6
4	53,4	30,5	38,8	0,51	498	130,8	74,8
5	149,9	29,4	36,7	1,28	382	130,8	46,8
6	250,3	30,4	36,8	1,86	289	130,8	36,5
7	53,7	39,5	46,5	0,44	497	130,8	77,6
8	149,6	40,0	45,5	0,95	382	130,8	53,2
9	247,8	40,5	45,1	1,32	292	130,8	44,0
	O_2 , %	$C_{p\ ie}$, mg/Nm ³		$C_{p\ iz}$, mg/Nm ³		ΔC_p , %	
1	11,0			22,8		37,0	
2	11,1			17,8		50,7	
3	10,9			18,0		50,3	
4	11,0			20,4		43,7	
5	10,7	36,2		18,8		48,1	
6	10,5			20,3		43,7	
7	11,3			9,6		73,4	
8	11,2			9,4		73,9	
9	10,9			8,2		77,2	



4.1. att. No dūmvadā izvietotās *PM* mērījumu vietas novadītais ūdens.

Iesmidzinātā ūdens daudzumam pārsniedzot 200 l/h, novērojama pilienu aiznese ārpus MA. Pie *PM* mērījumu punkta, dūmvadā aiz kondensatora, izvietota liekā ūdens novadīšanas caurule, un testu laikā novērota izteikta ūdens uzkrāšanās sistēmā aiz kondensatora. Attēlā redzamais ūdens daudzums novadīts no dūmvada viena testa laikā (30 min). Šajos gadījumos novērota arī *PM* mērījumu filtru izjukšana augstā mitruma satura dēļ, kas veidojas dūmvados.

4.2. tabula

Ekspperimentu rezultāti, ja granulu katla jauda ir 20 kW un izmantota sprausla *MPL 1.12*

Nr.	$G, \text{l/h}$	$t_{w1}, ^\circ\text{C}$	$t_{w2}, ^\circ\text{C}$	Q, kW	$d_{d0}, \mu\text{m}$	$t_{g1}, ^\circ\text{C}$	$t_{g2}, ^\circ\text{C}$
1	51,8	20,1	34,3	0,85	457		69,6
2	154,2	19,9	32,3	2,22	345		34,7
3	249,0	19,7	27,4	2,63	265		28,0
4	52,3	30,3	39,9	0,58	456		72,6
5	154,1	29,9	38,6	1,55	345	130,8	39,9
6	252,5	30,3	36,8	1,92	263		36,1
7	52,4	40,9	49,1	0,50	456		74,2
8	148,8	39,9	46,2	1,11	350		45,3
9	250,2	40,4	45,0	1,34	265		43,8
	$O_2, \%$	$C_{p\text{ie}}, \text{mg/Nm}^3$		$C_{p\text{iz}}, \text{mg/Nm}^3$		$\Delta C_p, \%$	
1	11,2			23,7		34,4	
2	11,2			24,2		33,1	
3	10,4			10,1		72,1	
4	11,6			24,0		33,5	
5	11,0	36,2		10,2		71,9	
6	10,2			10,1		72,2	
7	11,5			19,2		47,0	
8	11,0			8,2		77,3	
9	10,0			9,9		72,6	

Pie vidējās sprauslas *MPL 1.12* veiktajos eksperimentos izmantotas iesmidzinātā ūdens temperatūras no 19,7 °C līdz 40,9 °C, pie iesmidzinātā ūdens daudzuma no 51,8 l/h līdz 252,5 l/h. Sasniegtā MA jauda ir robežās no 0,50 kW līdz 2,63 kW un *PM* uztveršanas efektivitāte no 33,1 % līdz 77,3 % attiecībā pret sākotnējo *PM* koncentrāciju pirms MA. *PM* koncentrācija pirms aparāta mērīta atsevišķos eksperimentos, un atsaucei pieņemta vidējā iegūtā koncentrācija. Pilienu diametri noteikti atbilstoši sprauslu ražotāju sniegtajam aprēķinam, tie ir robežās no 263 μm līdz 457 μm. Dūmgāzes eksperimentu laikā atdzesētas līdz 28,0 °C. Efektīvākā dūmgāzu dzesēšana novērota pie zemākās iesmidzinātā ūdens temperatūras un lielākās caurplūdes. Taču arī šajā gadījumā novērota pilienu aiznese ārpus iekārtas – dūmvados. Visos eksperimentos pie 20 kW katla jaudas, skābekļa koncentrācija dūmgāzēs bija aptuveni 10 – 12 %, tādēļ novērojamas nelielas atšķirības sākotnējā dūmgāzu temperatūrā.

Pie mazākās sprauslas *MPL 0.77* veiktajos eksperimentos izmantotas iesmidzinātā ūdens temperatūras no 19,4 °C līdz 39,8 °C, pie caurplūdes no 49,0 l/h līdz 201,3 l/h. Sprauslas tehnisko ierobežojumu dēļ lielāku ūdens caurplūdi nebija iespējams sasniegt. MA jauda ir robežās no 0,52 kW līdz 2,49 kW un *PM* uztveršanas efektivitāte no 27,2 % līdz 71,2 % attiecībā pret sākotnējo *PM* koncentrāciju pirms MA. *PM* koncentrācija pirms aparāta mērīta atsevišķos eksperimentos, un atsaucei pieņemta vidējā iegūtā koncentrācija. Pilienu diametri noteikti atbilstoši sprauslu ražotāju sniegtajam aprēķinam, tie ir robežās no 249 μm līdz 376 μm. Dūmgāzes eksperimentu laikā atdzesētas līdz 29,0 °C. Efektīvākā dūmgāzu dzesēšana novērota pie zemākās iesmidzinātā ūdens temperatūras un lielākās caurplūdes. Taču arī šajā gadījumā pie lielākās caurplūdes novērota pilienu aiznese ārpus iekārtas – dūmvados.

4.3. tabula

Eksperimentu rezultāti, ja granulu katla jauda ir 20 kW un izmantota sprausla *MPL 0.77*

Nr.	<i>G</i> , l/h	<i>t_{w1}</i> , °C	<i>t_{w2}</i> , °C	<i>Q</i> , kW	<i>d_{d0}</i> , μm	<i>t_{g1}</i> , °C	<i>t_{g2}</i> , °C
1	51,8	19,4	38,2	1,13	376		65,3
2	156,6	20,2	33,1	2,36	282		32,0
3	201,3	20,1	30,7	2,49	249		29,0
4	49,0	30,3	44,0	0,78	379		68,6
5	148,0	29,9	40,1	1,76	289	130,8	38,8
6	195,0	30,4	39,0	1,95	254		37,0
7	51,4	39,7	48,5	0,52	376		70,4
8	146,7	39,5	45,5	1,03	290		44,9
9	200,7	39,8	45,0	1,20	250		43,9
	<i>O₂</i> , %	<i>C_{p ie}</i> , mg/Nm ³		<i>C_{p iz}</i> , mg/Nm ³		ΔC_p , %	
1	11,7			26,3		27,2	
2	10,7			15,5		57,1	
3	10,8			22,8		37,0	
4	11,4			23,3		35,5	
5	10,9	36,2		10,4		71,2	
6	10,8			17,8		50,7	
7	11,5			25,1		30,7	
8	11,4			15,4		57,5	
9	11,1			11,1		69,3	

Efektīvākā dūmgāzu dzesēšana novērota pie lielākās iesmidzinātā ūdens caurplūdes. Šajā gadījumā novērota arī intensīvākā pilienu aiznese ārpus iekārtas. Šie eksperimenti kalpoja kā

iekārtas darbības pārbaude pie dažādiem katla darbības parametriem. Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem, izvēlēta galvenā ūdens iesmidzināšanas sprausla, kas sniedz iespēju iesmidzināt arī visplašāko ūdens daudzumu iekārtā, potenciāli nodrošinot augstāko efektivitāti pie dažādām katla jaudām.

4.2. Miglas aparāta veiktspējas pārbaudes rezultāti

Iekārtas veiktspējas pārbaude veikta laboratorijas apstākļos, kas pēc iespējas pietuvināti reālai situācijai, kas novērojama mājssaimniecībās. Pārbaudītais kurināmais ir augstākās klases koksnes granulas. Ūdens iesmidzināšanai iekārtā izmantota viena sprausla – *MPL 1.51*, kas nodrošina optimālākās caurplūdes un pilienu diametrus robežās no 224 μm līdz 509 μm , atkarībā no spiediena uz sprauslas uzgali. Konkrētā sprausla izvēlēta, balstoties uz sistēmas pārbaudes eksperimentālajiem rezultātiem dažādos apstākļos (4.1. apakšnodaļa “Eksperimentālā stenda pārbaudes rezultāti”). Tajos ar sprauslu *MPL 1.51* iegūts ievērojams *PM* koncentrācijas samazinājums, no dūmgāzēm atgūtais siltuma daudzums un noteikta zema sūkņa jauda lietošanas laikā. Sistēmas parametri pie konkrētajām jaudām apkopoti 4.4. tabulā. Papildus, ņemot vērā sistēmas pārbaudes rezultātus, secināts, ka visaugstākos kondensatora veiktspējas rezultātus ir iespējams sasniegt smidzinot MA ūdeni ar zemāko temperatūru 20 °C. Līdz ar to netika veikti prototipa veiktspējas mērījumi pie iesmidzinātas ūdens temperatūras 30 °C un 40 °C.

4.4. tabula

MA sistēmas parametri pie dažādām katla jaudām

	10 kW	20 kW	30 kW
O ₂ dūmgāzēs, %	7,5 – 10,9	10,4 – 11,2	7,6 – 10,9
Iesmidzinātais ūdens daudzums, l/h	45,5 – 160,2	49,2 – 240,9	261,5 – 341,7
t_{w1} pirms MA, °C	19,4 – 19,9	19,7 – 20,2	19,6 – 20,3
t_{w2} pēc MA, °C	24,9 – 29,4	28,9 – 34,3	29,9 – 35,2
Atgūtais siltums, kW	0,5 – 1,1	0,7 – 2,6	4,1 – 5,2
MA energoefektivitāte, %	3,7 – 8,8	3,2 – 10,8	11,1 – 14,5
Kopējā sistēmas efektivitāte, %	89,2 – 97,0	87,6 – 97,7	95,0 – 96,8
<i>PM</i> pirms MA, mg/Nm ³	52,6 – 69,3	36,2	59,1 – 106,6
<i>PM</i> pēc MA, mg/Nm ³	17,1 – 35,5	15,5 – 24,2	28,9 – 44,8
<i>PM</i> uztveršanas efektivitāte, %	48,8 – 67,5	33,1 – 57,1	45,5 – 67,9
<i>Dūmgāzu parametri</i>			
t_{g1} pirms MA, °C	87,5 – 97,0	130,8 – 135,2	157,9 – 180,6
Relatīvais mitrums pirms MA, %	2,4 – 3,2	2,4 – 3,2	2,4 – 3,2
t_{g2} pēc MA, °C	29,1 – 52,1	28,6 – 74,1	30,3 – 36,2
Relatīvais mitrums pēc MA, %	45,1 – 85,6	16,0 – 89,2	89,5 – 92,3
Absolūtais mitrums pēc MA, g/kg _{dg}	22,1 – 50,9	22,1 – 38,8	25,8 – 36,2
Spiediena starpība pēc MA, Pa	no –9,2 līdz – 22,0	no –11,6 līdz – 20,7	no –15,0 līdz – 19,9

4.4. tabulā apkopotie rezultāti raksturo kopējo situāciju pie katras pārbaudītās katla jaudas. MA energoefektivitāte aprēķināta pēc 4.1. formulas, kurā iekļauts vidējais testa ilgums 30 min jeb 0,5 h.

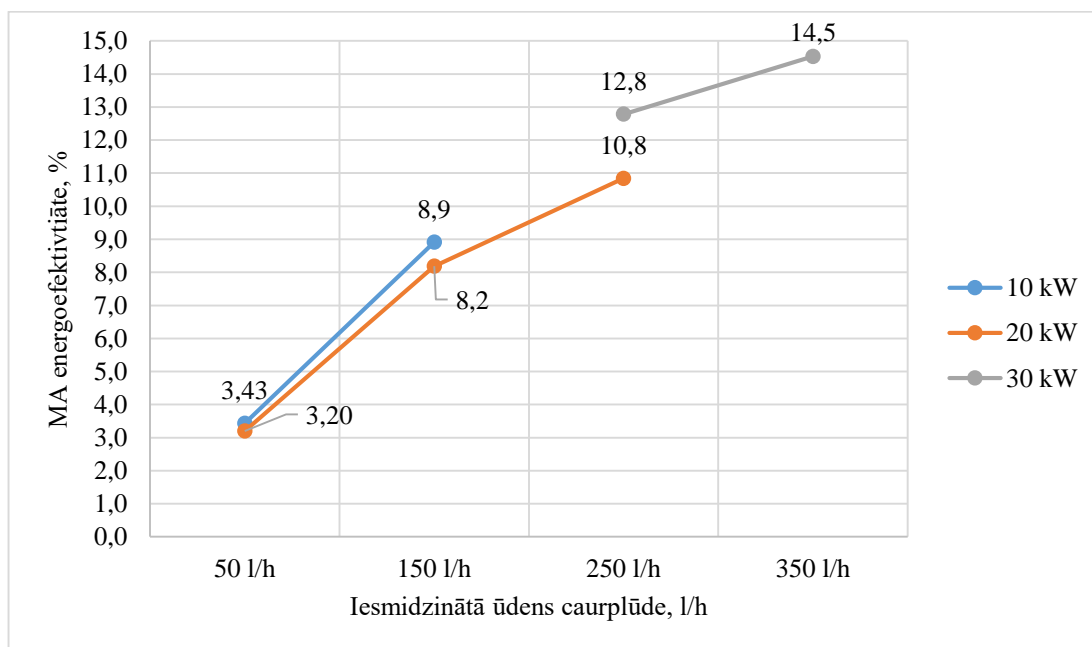
$$\eta_{fu} = \frac{Q \times 0,5}{Q_{con}} \times 100 \quad (4.1.)$$

kur η_{fu} – MA efektivitāte, %;

Q_{con} – sistēmā patērētais kurināmā enerģijas daudzums, kWh.

Dati uzrāda, ka vismazākais *PM* samazinājums ir pie katla jaudas 20 kW. Tas ir saistīts ar to, ka katls darbojas nominālos jeb optimālos apstākļos un *PM* koncentrācija jau sākotnēji ir zema (vidēji 36,2 mg/Nm³), tādēļ arī MA ir grūti panākt maksimāli augstāko dūmgāzu attīrīšanas pakāpi, jo pēc faktiskajiem skaitļiem 15,5 – 24,2 mg/Nm³ pēc MA jau ir ļoti zema koncentrācija. Kopējā sistēmas efektivitāte ir robežās no 87,6 % līdz 97,7 %. Gan augstākā, gan zemākā sistēmas efektivitāte sasniegta pie nominālās katla jaudas – 20 kW.

MA sasniegtā efektivitāte pie skābekļa satura dūmgāzēs ~ 11 % pie katras no aplūkotajām jaudām atkarībā no iesmidzinātā ūdens daudzuma redzama 4.2. attēlā.

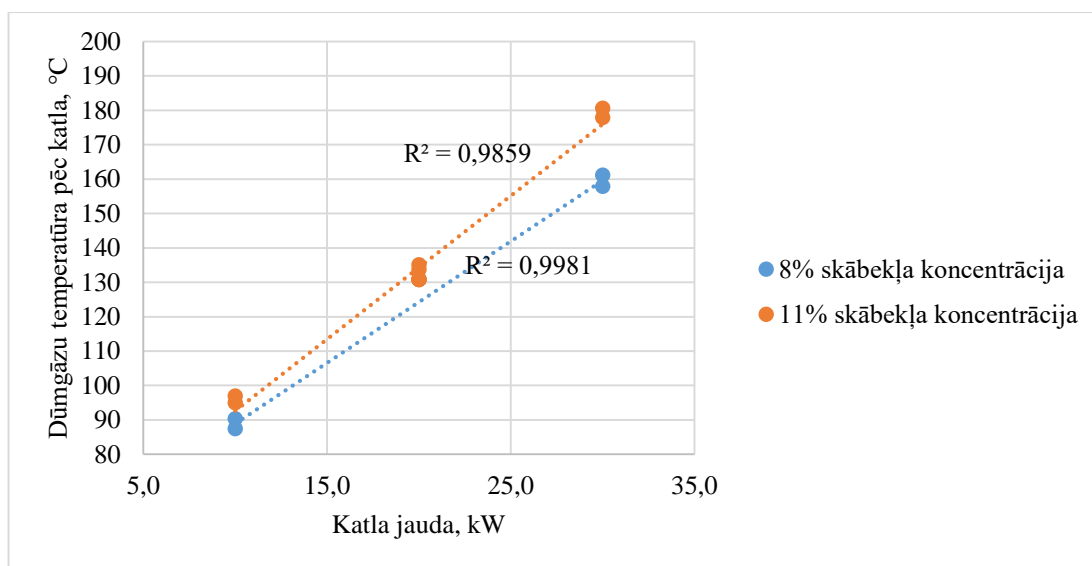


4.2. att. MA energoefektivitāte atkarībā no iesmidzinātā ūdens daudzuma pie noteiktas skābekļa koncentrācijas dūmgāzēs.

Augstākā MA efektivitāte – 14,5 % – sasniegta, ja katla jauda ir 30 kW, izmantojot lielāko iesmidzinātā ūdens daudzumu – aptuveni 340 l/h. Savukārt zemākā MA efektivitāte – 3,2% – novērota, ja katla jauda ir 20 kW, iesmidzinātā ūdens daudzums aptuveni 50 l/h. Svarīgi ir tas, ka, pieaugot katla jaudai, pieaug dūmgāzu temperatūra. Aplūkotajā gadījumā dūmgāzēs temperatūra pirms MA, ja katla jauda ir 10 kW, svārstās no 88 °C līdz 97 °C, savukārt, ja katla jauda ir 30 kW, tā svārstās robežās no 158 °C līdz 181 °C atkarībā no katlam pievadītā gaisa daudzuma un skābekļa koncentrācijas dūmgāzēs (4.2. att.). Pieaugot dūmgāzu temperatūrai, pieaug arī siltuma zudumi ar aizejošām dūmgāzēm. Rezultātā ar dūmgāzēm tiek aiznests noteikts daudzums siltumenerģijas, ko papildus var atgūt ar MA. Faktiski tas nozīmē: jo lielāka ir dūmgāzu temperatūra pirms MA, jo potenciāli lielāku energoefektivitāti MA var sasniegt.

Iesmidzinātā ūdens daudzumam pārsniedzot 200 l/h, novērojama ievērojama ūdens aiznese ārpus MA. Šis novērojums deva impulsu idejai par pielietu uztveršanas slāņa – metāla skaidiņu – ievietošanu MA, papildus no turpmākajiem eksperimentiem izslēdzot lielāko iesmidzinātā ūdens daudzumu izmantošanu. *PM* rezultātus pirms MA papildus ietekmē katla īpatnības – efektivitātes izmaiņas atkarībā no izvēlētajiem darbības parametriem. Augstāko katla efektivitāti iespējams sasniegt, ja katla jauda ir nominālā, šajā gadījumā 20 kW. Pārbaudītās sistēmas katla efektivitāte atkarībā no izvēlētajās darbības jaudas ir robežās no 82,3 % līdz 88,0 %, zemākā efektivitāte ir, ja katla jauda ir 30 kW, augstākā efektivitāte, ja – 10 kW. Kopējā sasniegtā sistēmas efektivitāte, ņemot vērā katla un MA sasniegto efektivitāti, ir robežās no 87,6 % līdz 97,7 %, kas jebkurā gadījumā paaugstina efektivitāti un apliecina MA lietderību un funkcionalitāti sistēmā.

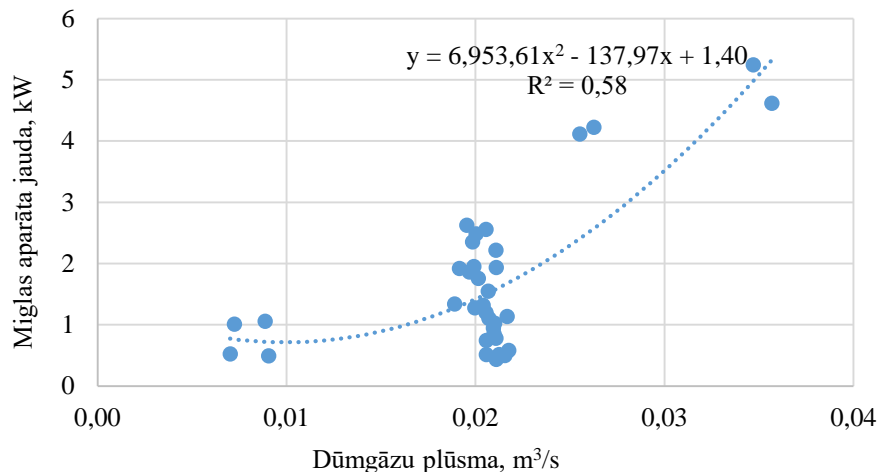
Starp dūmgāzu temperatūru pirms MA un skābekļa koncentrāciju dūmgāzēs novērojama korelācija ar augstu koeficientu, kas parāda to, ka parametri ir savstarpēji atkarīgi viens no otra. Sakarība ir ciešāka pie 8 % skābekļa koncentrācijas dūmgāzēs nekā pie 11 % skābekļa koncentrācijas dūmgāzēs.



4.3. att. Dūmgāzu temperatūra pirms MA atkarībā no katla jaudas pie dažādām skābekļa koncentrācijām.

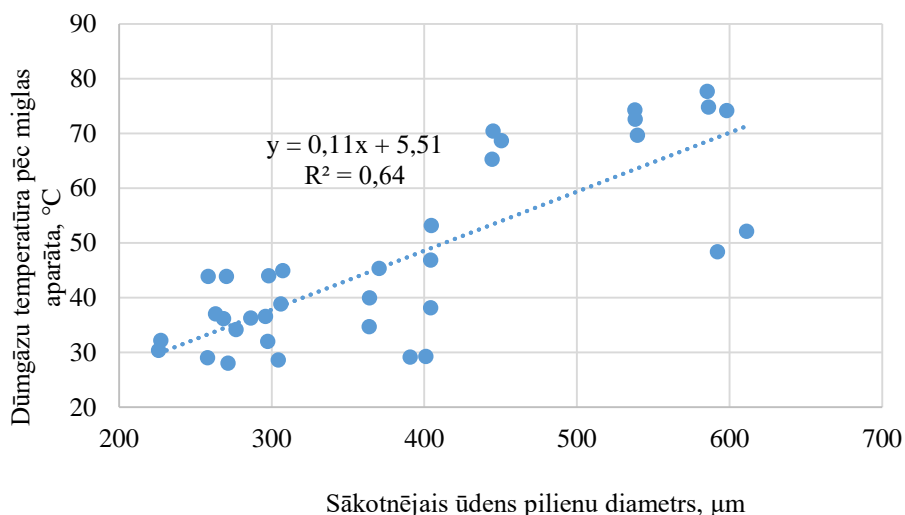
Pie lielākas katla jaudas novērojams dūmgāzu temperatūras pieaugums, kas ir izteiktāks pie augstākas skābekļa koncentrācijas dūmgāzēs, taču sakarība starp parametriem ir ciešāka mazākās skābekļa koncentrācijas gadījumā. Augstāka skābekļa koncentrācija vairāk atšķaida gāzes un nodrošina zemāku temperatūru.

Eksperimentu dati papildus analizēti, lai noteiktu parametru savstarpējās mijiedarbības. 4.4. attēlā redzamas MA jaudas izmaiņas atkarībā no dūmgāzu plūsmas. MA jauda pieaug, pieaugot dūmgāzu un iesmidzinātā ūdens plūsmām, savukārt jaudas samazinājumu vistiešāk ietekmē iesmidzinātā ūdens temperatūra. Starp dūmgāzu plūsmu un MA jauda novērojama vidēji cieša korelācija, determinācijas koeficients ir ap 0,58. Sakarības tendenci raksturo polinoms vienādojums, kas redzams 4.4. attēla grafikā.



4.4. att. MA jauda atkarībā dūmgāzu plūsmas.

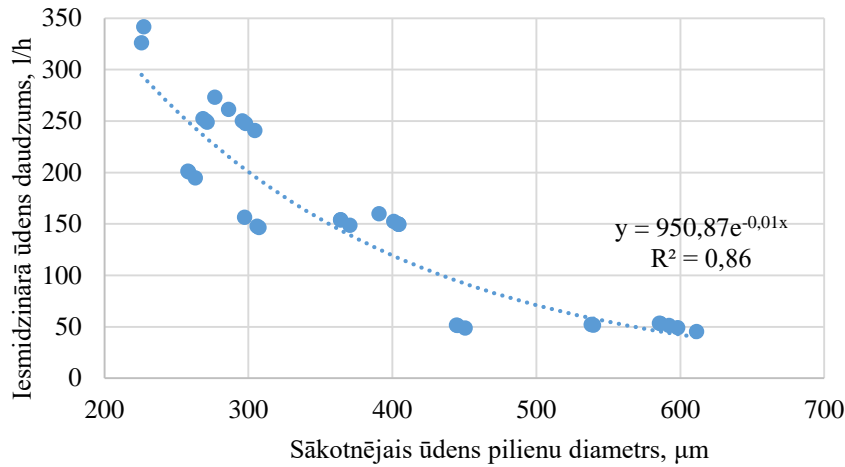
Regresijas analīze veikta ne tikai MA jaudu ietekmējošiem parametriem, bet arī galveno parametru datiem savstarpēji. Kā redzams 4.5. attēlā, meklējot matemātisko sakarību starp dūmgāzu temperatūru MA izejā un sākotnējo ūdens pilienu diametru, iegūta vidēji cieša korelācija starp datiem, determinācijas koeficients ir 0,64. Konkrētajā gadījumā iegūta lineāra saistība, kas redzama 4.5. attēlā.



4.5. att. Dūmgāzu temperatūra pēc MA atkarībā no sākotnējā ūdens pilienu diametra.

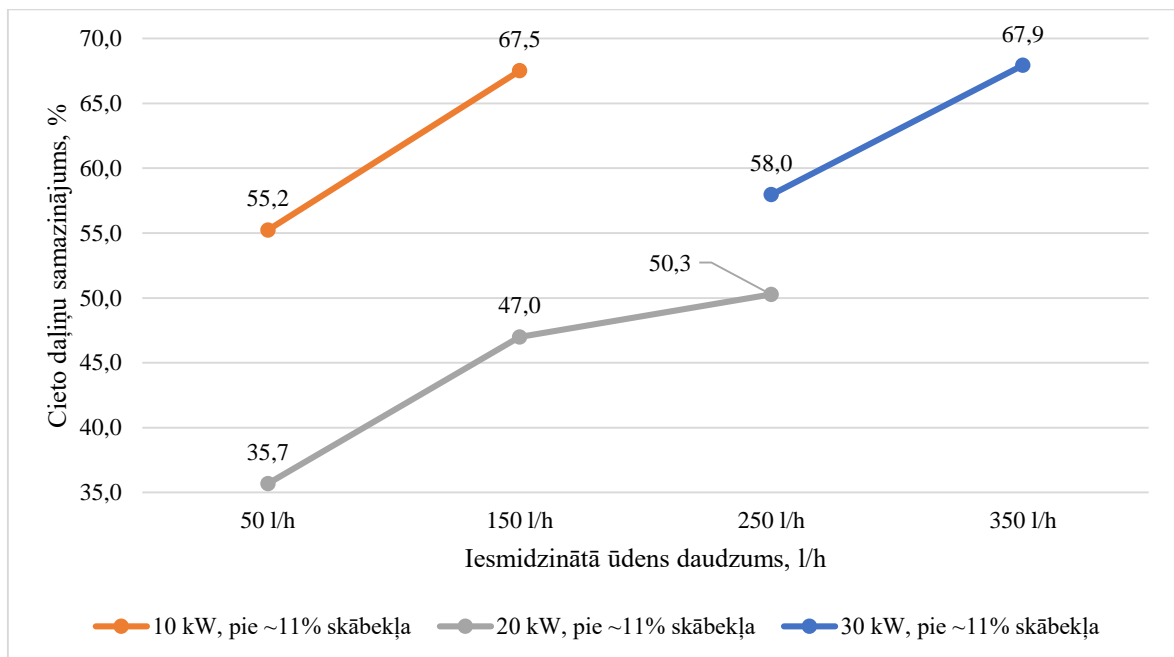
Augstāka dūmgāzu temperatūra pēc MA novērota gadījumos, kad iesmidzinātā ūdens temperatūra ir augstāka un ir lielāks pilienu diametrs. Pie augstākas dūmgāzu temperatūras novērojama arī izteikta datu izkliede.

Paaugstinot iesmidzinātā ūdens daudzumu, ūdens temperatūra MA izejā un visā aparātā pieaug. Tas nozīmē, ka pieaug arī starpība starp dūmgāzu un ūdens temperatūru, un konvektīvā siltuma apmaiņa kļūst intensīvāka. Lai palielinātu iesmidzinātā ūdens daudzumu, ir nepieciešams paaugstināt spiedienu uz izsmidzināšanas sprauslu, tādējādi nodrošinot mazākus pilienu diametrus (4.6. att.).



4.6. att. Iesmidzinātā ūdens daudzums atkarībā no ūdens pilienu diametra.

Mazāka diametra pilieni veido lielāku fāžu pārejas virsmu. Ņemot vērā to, ka siltumapmaiņas virsmu MA ierobežo iekārtas diametrs, kas ir loģisks secinājums. Mazāki pilieni virsmu aizpilda pilnīgāk nekā lielāki pilieni, un dūmgāzēm ir mazāk iespēju virzīties cauri virsmas spraugām, attiecīgi tām ir jāvirzās cauri virsmai. Tā rezultātā uzlabojas gan siltuma, gan masas apmaiņa, kā arī pieaug MA siltuma jauda.



4.7. att. *PM* samazinājums atkarībā no iesmidzinātā ūdens daudzums pie dažādām katla jaudām

PM līmenis pirms un pēc MA pie katras katla jaudas redzams 4.7. attēlā. Šajā gadījumā salīdzināti dati pie aptuveni 11 % skābekļa satura dūmgāzēs, jo šajos apstākļos veikti eksperimenti pie visām aplūkotajām jaudām. Pie 10 kW katla jaudas vidējā *PM* koncentrācija pirms MA vidēji bija 52,6 mg/Nm³. Savukārt sasniegtā *PM* koncentrācija pēc MA ir robežās no 17,1 mg/Nm³ līdz 35,5 mg/Nm³, sasniedzot *PM* samazinājumu līdz 67,5 %. Iesmidzinātā ūdens temperatūra bija ap 20 °C visos testos pie konkrētās jaudas. Kā redzams 4.7. attēlā, lielākais *PM* koncentrācijas samazinājums sasniegts pie lielākā iesmidzinātā ūdens daudzuma.

Vidējā *PM* koncentrācija pirms MA, katlam darbojoties ar jaudu 20 kW ir 36,2 mg/Nm³. Savukārt sasniegtā *PM* koncentrācija pēc MA pie šīs katla jaudas vidēji ir robežās no 18,0 mg/Nm³ līdz 23,3 mg/Nm³, sasniedzot *PM* samazinājumu līdz 50,3 %. Lielākais samazinājums *PM* koncentrācijā pēc MA aplūkotajos režīmos novērojams, ja iesmidzināmā ūdens temperatūra ir ap 20 °C, iesmidzinātā ūdens daudzums ~ 250 l/h. Zemāks *PM* samazinājums pie 20 kW katla jaudas novērojams divu iemeslu dēļ: pirmkārt, *PM* koncentrācija pirms MA ir nemainīga visos gadījumos; otrkārt, testi pie 10 kW un 30 kW veikti pēc MA uzlabošanas – ūdens separatora ieviešanas, lai samazinātu ūdens pilienu aiznesi pēc iekārtas.

Pie 30 kW katla jaudas *PM* koncentrācija pirms MA ir 106,6 mg/Nm³ pie skābekļa koncentrācijas dūmgāzēs 11 %. Lielākais *PM* samazinājums – 67,9 % – ir sasniegts pie skābekļa satura dūmgāzēs ~ 11 % un iesmidzinātā ūdens daudzuma ~ 350 l/h.

Balstoties uz veikto MA sistēmas pārbaudi mākslīgi radītā vidē, var secināt, ka *PM* uztveršanas efektivitāte ir atkarīga ne tikai no MA darbības parametriem (iesmidzinātā ūdens daudzuma, pilienu izmēra, ūdens temperatūras), bet arī no *PM* koncentrācijas aiz katla jeb sākotnējās *PM* koncentrācijas. Kopumā *PM* koncentrācija aiz katla jeb pirms MA viszemākā ir pie jaudas 20 kW – 36,2 mg/Nm³. Pie katla jaudas 10 kW *PM* koncentrācija aiz katla ir 52,6 mg/Nm³ un 69,3 mg/Nm³, atkarībā no skābekļa koncentrācijas dūmgāzēs. Savukārt pie katla jaudas 30 kW *PM* koncentrācija aiz katla ir 59,1 mg/Nm³ un 106,6 mg/Nm³ atkarībā no skābekļa koncentrācijas dūmgāzēs. Šos rezultātus var skaidrot ar to, ka visi eksperimenti veikti ar vienu katlu, mainot tā jaudu ar kurināmā patēriņu. Katla nominālā jauda ir 20 kW, sasniedzot augstāko efektivitāti un pilnīgāko kurināmā sadegšanu. Katlam strādājot ar samazinātu jaudu, samazinās arī temperatūra kurtuvē un efektivitāte, kā arī pieaug radītā emisiju koncentrācija, ieskaitot *PM* emisijas. Katlam strādājot ar paaugstinātu jaudu, būtiski pieaug radītais dūmgāzu apjoms, un tā rezultātā palielinās dūmgāzu plūsma kurtuvē un caur siltummaini. Tas negatīvi ietekmē siltumapmaiņu, un tā rezultātā samazinās katla efektivitāte. Turklāt, ja palielinās dūmgāzu plūsma, katlā ievadītais kurināmais sadalās nepilnīgi, paaugstinot radīto emisiju koncentrāciju. To apliecina arī eksperimentu rezultāti.

Eksperimentālā stenda veiktspējas analīze liecina par to, ka ar izstrādāto sistēmu ir iespējams veikt efektīvu *PM* attīrīšanu. Tomēr sistēmai ir ierobežojumi. Eksperimentālie dati liecina, ka *PM* koncentrāciju dūmgāzēs pie optimāliem MA darbināšanas parametriem var samazināt līdz 10 – 20 mg/Nm³. ES Ekodizaina direktīva nosaka to, ka mājsaimniecību katliem ar automātisku kurināmā padevi, piemēram, granulu katlam eksperimentālajā stendā, *PM* emisijas nedrīkst pārsniegt 40 mg/m³, tāpēc šī koncentrācija uzskatāma par pietiekami zemu. Tas parāda, ka, pateicoties MA tehnoloģijai ir iespējams sasniegt divreiz zemāku *PM* koncentrāciju, nekā prasīts. Jāņem vērā, ka gadījumos, kad *PM* koncentrācija pirms MA jau sākotnēji ir zema (36,2 mg/Nm³, ja katla jauda ir 20 kW), tad *PM* samazinājums ir zemāks. Taču pretēja situācija novērojama, pie katla jauda ir liela, piemēram, ar sākotnējo *PM* koncentrāciju 106,6 mg/Nm³, ja katla jauda ir 30 kW, ir iespējams sasniegt samazinājumu līdz pat 34,2 mg/Nm³.

4.3. Aprēķina modeļa validācija

Aprēķina modeļa validācija veikta izmantojot eksperimentālo un modeļa rezultātu salīdzinājumu. Līdzīga validācijas metode, kurā salīdzina modelētos un eksperimentālos datus, plaši izmantota siltuma un masas apmaiņas procesu raksturošanai. Piemēram, Ženga (*Zheng et.al.*) u.c. [131] autoru darbā izstrādāts skaitlisks algoritms, lai raksturotu pilienu dinamiku mitra gaisa pilienvēda kondensācijā un algoritms attiecināts uz visu kondensācijas procesu. Pētījumā izstrādāts individuāla piliena augšanas modelis un tas attiecināts uz ierobežotu virsmas laukumu. Lai validētu rezultātus, pilienvēda kondensācijas eksperimenti īstenoti pie 94 % un 80 % relatīvā mitruma satura. Starp modeļa un eksperimenta rezultātiem iegūta laba sakritība, pierādot modeļa ticamību.

Ar aprēķina modeli iegūtās MA jaudas vērtības salīdzinātas ar eksperimentu rezultātiem vienādos darbības režīmos. Savstarpēji salīdzināti 16 veikto eksperimentu dati un atbilstošo eksperimentu režīmu rezultāti, kas iegūti, izmantojot aprēķina modeli. Rezultātu atšķirība aprēķināta, par atsaucis vērtību 4.2. vienādojumā pieņemot eksperimentos izmantoto jaudu.

$$\Delta Q = \frac{(Q_{\text{eksp.}} - Q_{\text{apr.}})}{Q_{\text{eksp.}}} \times 100 \quad (4.2.)$$

kur ΔQ – atšķirība starp eksperimentālajām un aprēķinātajām MA jaudām, %;

$Q_{\text{eksp.}}$ – MA jauda eksperimentos, kW;

$Q_{\text{apr.}}$ – MA jauda aprēķinos, kW.

Galvenie salīdzinājumā izmantotie parametri apkopoti 4.5. tabulā. Ievades parametri no eksperimentālajiem datiem ir: dūmgāzu temperatūra pēc katla t_{g1} ; ievades ūdens temperatūra t_{w1} ; ūdens caurplūde G ; sākotnējais ūdens pilienu diametrs d_{d0} . Validācijai izmantotie eksperimentu rezultāti ir pie 20 kW katla jaudas, jo tā ir nominālā eksperimentos izmantotā katla jauda, nodrošinot precīzākos datus.

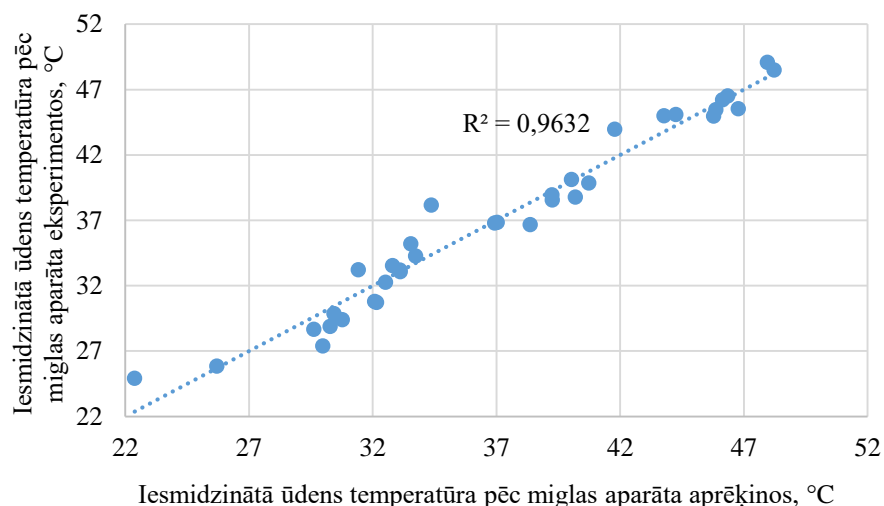
4.5. tabula

Galvenie izpētes parametri

Nr.	t_{w1} eksp. ~ t_{w1} apr., °C	t_{w2} eksp., °C	t_{w2} apr., °C	G , l/h	Q eksp., kW	Q apr., kW	ΔQ , %
1	20,2	33,2	33,2	49,2	0,75	0,77	- 2,96
2	19,7	30,8	31,0	150	1,93	2,07	- 7,09
3	30,5	38,8	38,8	53,4	0,51	0,53	- 3,15
4	29,4	36,7	36,6	150	1,28	1,32	- 3,66
5	39,5	46,5	46,5	53,7	0,44	0,44	- 1,16
6	40,0	45,5	45,5	150	0,95	0,99	- 4,08
7	20,1	34,3	34,2	51,8	0,85	0,87	- 2,08
8	19,9	32,3	32,5	154	2,22	2,41	- 8,70
9	19,7	27,4	28,0	249	2,63	2,40	8,69
10	30,3	39,9	39,9	52,3	0,58	0,60	- 3,20
11	29,9	38,6	38,6	154	1,55	1,64	- 5,74
12	40,9	49,1	48,4	52,4	0,50	0,45	9,08
13	39,9	46,2	46,3	149	1,11	1,15	- 4,05
14	19,4	38,2	38,4	51,8	1,13	1,18	- 3,93
15	30,3	44,0	43,9	49,0	0,78	0,80	- 1,75
16	29,9	40,1	40,4	148	1,76	1,91	- 8,83

Dūmgāzu temperatūra pēc katla bija vienāda 15 režīmos (131 °C), savukārt vienam režīmam temperatūra bija 135 °C, tādēļ dūmgāzu temperatūra nav iekļauta datu tabulā. Eksperimentos izmantotas trīs dažādas sprauslas, kas nodrošina līdzīgas ūdens plūsmas ar dažādiem pilienu diametriem. Iesmidzinātā ūdens daudzums ir robežās no 50 l/h līdz 249 l/h. Ievades ūdens temperatūras bija robežās no aptuveni 20 °C līdz aptuveni 40 °C.

Starp aprēķināto un eksperimentos noteikto ūdens temperatūru vērojama ļoti cieša korelācija, kas redzama 4.8. attēla grafikā.



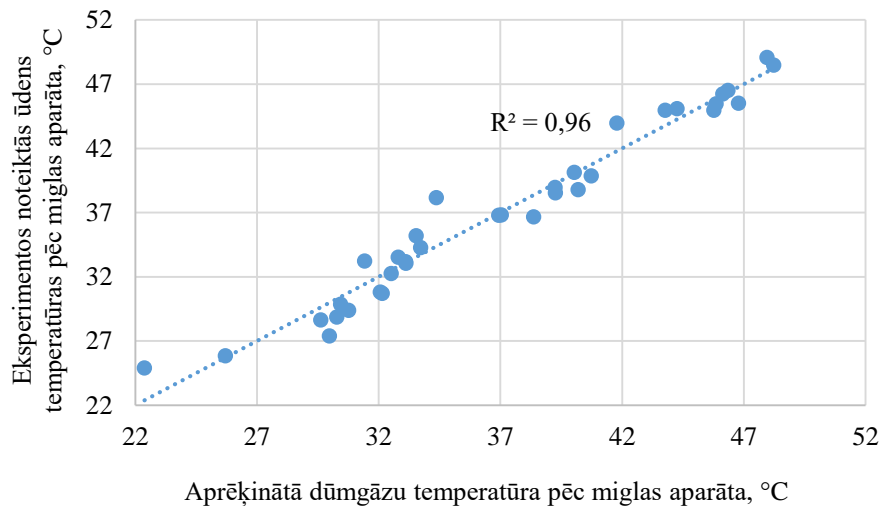
4.8. att. Eksperimentos noteiktā un aprēķinātā iesmidzinātā ūdens temperatūra pēc MA.

Loģiski, ka, paaugstinot iesmidzinātā ūdens temperatūru pirms MA, pieaugs arī ūdens temperatūra pēc MA. Pie ciešākas sakarības starp iesmidzinātā ūdens daudzumu un dūmgāzu plūsmu iesmidzinātā ūdens temperatūra pēc MA samazinās.

Dūmgāzu temperatūra pēc MA ir atkarīga no sākotnējās dūmgāzu temperatūras un ūdens parametriem – ūdens temperatūras pēc MA, sākotnējā ūdens pilienu diametra. Datu analīzes rezultātā iegūts 4.3. vienādojums.

$$t_{g_2} = -63,08 + 0,20 \times t_{g_1} + 1,03 \times t_{w_2} + 0,12 \times d_{d_0} \quad (4.3.)$$

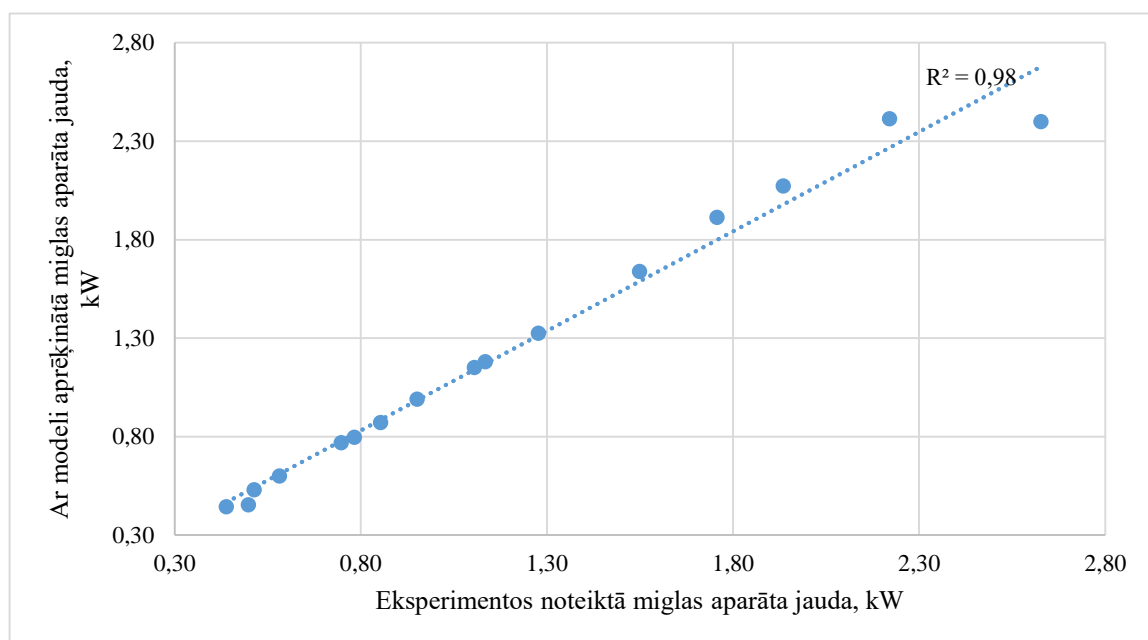
Starp parametriem ir statistiski nozīmīga sakarība 95 % ticamības līmenī. Determinācijas koeficients ir 91,1 %. Eksperimentos noteiktās ūdens temperatūras pēc MA salīdzinātas ar aprēķinātajām dūmgāzu temperatūrām pēc MA (4.9. att.).



4.9. att. Sakarība starp eksperimentālo ūdens temperatūru un aprēķināto dūmgāzu temperatūru pēc MA.

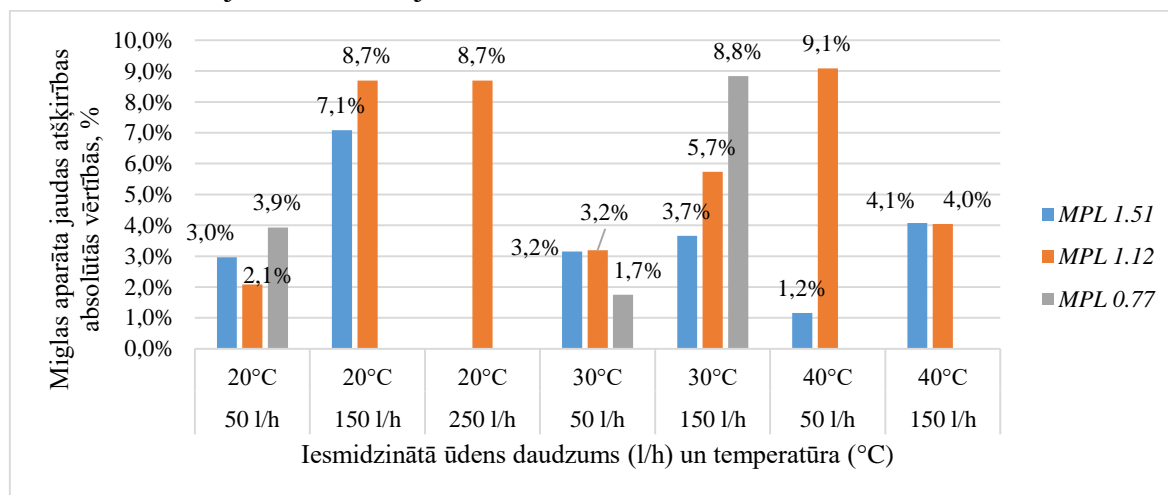
Starp datiem novērojama cieša korelācija. Pieaugot dūmgāzu temperatūrai pirms MA, pieaug arī ūdens temperatūra pēc MA. Līdzīgi, pieaugot ūdens temperatūrai pēc MA, dūmgāzu temperatūra pēc MA arī pieaug – dūmgāzu dzesēšanas būs mazāk intensīva. Ūdens pilienu diametra pieaugums samazina fāžu pārejas virsmu un siltuma daudzumu, ko atgūst no dūmgāzēm konvekcijas procesā. Dūmgāzu dzesēšana pasliktināsies, un to temperatūra pieaug.

Kondensatora jauda eksperimentos bija robežās no 0,44 kW līdz 2,63 kW, savukārt aprēķinātā jauda bija robežās 0,44 kW līdz 2,41 kW. Iesmidzinātā ūdens daudzums rada svārstības kondensatora jaudas vērtībās. Paaugstināta ievadītā ūdens temperatūra samazina MA jaudu, tādēļ iesmidzināšanai iekārtā piemērotāks aukstāks ūdens. Optimāli iesmidzinātā ūdens daudzums siltuma atgūšanai no dūmgāzēm neatkarīgi no katla jaudas ir aptuveni 150 l/h. Lai atspoguļotu datus un to savstarpējās atšķirības, izveidots kondensatora jaudas grafiks (4.10. att.).



4.10. att. Eksperimentos noteiktās un aprēķinātās MA jaudas salīdzinājums.

Kā redzams 4.10. attēlā, tad starp eksperimentālajiem un aprēķinātajiem MA jaudas datiem pastāv cieša korelācija, determinācijas koeficients ir 0,98.



4.11. att. MA jaudas rezultātu atšķirība atkarībā no izmantotās sprauslas veida, iesmidzinātā ūdens daudzuma un temperatūras.

Ir svarīgi novērtēt divu galveno ietekmes parametru - ūdens caurplūdes un ievades temperatūras, radīto ietekmi uz kondensatoru. Kā redzams 4.11. attēlā, lielākā atšķirība starp aprēķinātajām un eksperimentāli noteiktajām jaudas vērtībām ir pie ūdens temperatūras ap 20 °C un augoša iesmidzinātā ūdens daudzuma, vidējo sprauslu *MPL 1.12* un atšķirību vidēji 8,2 %. Savukārt līdzīgākie dati ir pie ūdens temperatūras ap 30 °C un iesmidzinātā ūdens daudzuma ap 50 l/h (vidēji 2,7 %). Atšķirība starp vērtībām ir robežās no 1,2 % līdz 9,1 %, datu vidējā atšķirība – 4,9 %. Datu atšķirība nepārsniedz 10 %, tāpēc secināts, ka modelētie dati veido labu sakritību ar eksperimentālajiem datiem un modelis ir piemērots kondensatora darbības analīzei. Šajā analizē iekļautie eksperimentu rezultāti iegūti, izmantojot visu trīs veidu sprauslas, katla jauda – 20 kW. Pie iesmidzinātā ūdens temperatūras 30 °C un 40 °C eksperimenti veikti pie iesmidzinātā ūdens daudzuma līdz aptuveni 150 l/h, lai nodrošinātu efektīvāko *PM* attīrīšanu un siltuma atgūšanu no dūmgāzēm bez liekas ūdens izsmidzināšanas un iespējamās aizneses dūmvados pēc MA. Eksperimenti pie 20 °C izcēla ūdens aizneses un pārāk daudz izsmidzināšanas problēmu, kas eksperimentos pie augstākas ūdens temperatūras bija ņemtas vērā un ierobežotas (pildījums ūdens aizneses ierobežošanai, optimālāks iesmidzināšanas daudzums).

4.4. Optimizācija

Eksperimenta plānošana ir matemātiska aprēķina izveide, ar noteiktu secību, kas palīdz noteikt kādu pētāmo lielumu [132]. Matemātiskajā modelī, plānojot eksperimentu, tiek izmantots mainīgais atkarīgais lielums y , kas atkarīgs no neatkarīgiem mainīgajiem faktoriem x_1, x_2, \dots, x_n . Reālajā procesā rodas neprognozējamas gadījuma rakstura pārmaiņas. Tāpēc izmantoti regresijas koeficienti $b_0, b_i, b_j, b_{uj}, b_{jj}$. Mainīgā izmaiņas raksturojošais vienādojums vispārīgā formā izteikts 4.4. formulā.

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j x_j + \sum_{\substack{u,j=1 \\ u \neq j}}^n b_{uj} x_u x_j + \sum_{j=1}^n b_{jj} x_j^2 + \dots + \epsilon \quad (4.4.)$$

kur b_0 – brīvais loceklis;

b_i, b_j, b_{ij}, b_{jj} – mainīgo parametru koeficienti;

ϵ – gadījuma kļūda [132].

Veiktajā analīzē atkarīgais mainīgais ir MA jauda (Q , kW). Neatkarīgie mainīgie:

- dūmgāzu plūsma (V_g , Nm³/s);
- dūmgāzu temperatūra pirms MA (t_{g1} , °C);
- iesmidzinātā ūdens daudzums (G , l/h);
- sākotnējais ūdens pilienu diametrs (d_{d0} , μm);
- iesmidzinātā ūdens temperatūra (t_{w1} , °C).

Analizētais dūmgāzu plūsmas diapazons ir atbilstošs granulu katliem ar jaudu no 10 kW līdz 20 kW un minimālo lietderības koeficientu 82 %. Parametru maksimālās un minimālās vērtības noteiktas, analizējot eksperimentālo datu kopu, izvēloties parametru vērtības, kas iekļaujas aprēķina modeļa izmantošanas robežās. Vērtību apkopojums redzams 4.6. tabulā.

4.6. tabula

Neatkarīgo mainīgo parametru vērtības

	V_g , Nm ³ /s	t_{g1} , °C	G , l/h	d_{d0} , μm	t_{w1} , °C	ω_1 , kg/kg _{dg}	W^d , %
min.	0,00482	90	60	425	20	0,08	4,55
maks.	0,01	140	150	600	30		
vid.	0,00735	115	105	512,5	25		

W^d – kurināmā mitruma saturs, masas %.

Analizētais kurināmais ir koksnes granulas ar mitruma saturu 4,55 %. Šajā gadījumā pie iesmidzinātā ūdens daudzuma un pilienu diametriem nav piesaistīta konkrēta sprausla. Analīzē ir pieci neatkarīgie mainīgie, tāpēc skaitliskā eksperimenta plāns jāveido $2^5 = 32$ eksperimenta režīmiem ar trīs papildus eksperimentiem pie viduspunktu vērtībām, līdz ar to kopējais eksperimentu skaits ir 35.

Mainīgo matrica izveidota, izmantojot programmu *Statgraphics Centurion XVII* un tajā ietvertu rīku *Design of Experiments*. Rīks dod iespēju ievadīt atkarīgo mainīgo (y), neatkarīgos mainīgos (x_n) un to maksimālās (max) un minimālās (min) vērtības, kā arī izvēlēties, kāda veida eksperiments ir plānots, cik daudz eksperimentu tiks veikti pie viduspunktiem (2^k eksperimentu plānā, kur $k = 1 \dots 5$, pie viduspunktiem parasti veic 3–5 eksperimentus). Rezultātā izveidota mainīgo matrica ar dažādām to vērtību kombinācijām, kas ir atbilstošas veicamajiem eksperimentiem. Izveidotā matrica, ar atbilstošo vērtības apzīmējumu (min., maks., vid.) redzama 4.7. tabulā.

Eksperimenta plānošanas mainīgo matrica

Nr.	$V_g, \text{N}\cdot\text{m}^3/\text{s}$		$t_{g1}, ^\circ\text{C}$		$G, \text{l/h}$		$d_{d0}, \mu\text{m}$		$t_{w1}, ^\circ\text{C}$	
1	0,01	maks.	90	min.	150	maks.	425	min.	30	maks.
2	0,01	maks.	140	maks.	150	maks.	425	min.	20	min.
3	0,01	maks.	140	maks.	60	min.	425	min.	30	maks.
4	0,00482	min.	140	maks.	150	maks.	600	maks.	20	min.
5	0,01	maks.	90	min.	150	maks.	600	maks.	20	min.
6	0,00482	min.	90	min.	150	maks.	425	min.	20	min.
7	0,01	maks.	90	min.	60	min.	600	maks.	30	maks.
8	0,00482	min.	90	min.	150	maks.	600	maks.	20	min.
9	0,00482	min.	90	min.	150	maks.	600	maks.	30	maks.
10	0,01	maks.	140	maks.	150	maks.	600	maks.	20	min.
11	0,01	maks.	140	maks.	60	min.	600	maks.	30	maks.
12	0,01	maks.	90	min.	60	min.	425	min.	20	min.
13	0,00482	min.	90	min.	60	min.	425	min.	20	min.
14	0,00482	min.	140	maks.	150	maks.	600	maks.	30	maks.
15	0,01	maks.	140	maks.	150	maks.	600	maks.	30	maks.
16	0,00482	min.	140	maks.	60	min.	600	maks.	30	maks.
17	0,01	maks.	140	maks.	150	maks.	425	min.	30	maks.
18	0,01	maks.	90	min.	150	maks.	600	maks.	30	maks.
19	0,00482	min.	140	maks.	150	maks.	425	min.	30	maks.
20	0,01	maks.	90	min.	60	min.	425	min.	30	maks.
21	0,00735	vid.	115	vid.	105	vid.	512,5	vid.	25	vid.
22	0,00482	min.	90	min.	150	maks.	425	min.	30	maks.
23	0,01	maks.	90	min.	60	min.	600	maks.	20	min.
24	0,00735	vid.	115	vid.	105	vid.	512,5	vid.	25	vid.
25	0,01	maks.	90	min.	150	maks.	425	min.	20	min.
26	0,00482	min.	140	maks.	60	min.	600	maks.	20	min.
27	0,00482	min.	140	maks.	150	maks.	425	min.	20	min.
28	0,00482	min.	140	maks.	60	min.	425	min.	30	maks.
29	0,00482	min.	140	maks.	60	min.	425	min.	20	min.
30	0,01	maks.	140	maks.	60	min.	425	min.	20	min.
31	0,00482	min.	90	min.	60	min.	425	min.	30	maks.
32	0,00482	min.	90	min.	60	min.	600	maks.	20	min.
33	0,00482	min.	90	min.	60	min.	600	maks.	30	maks.
34	0,00735	vid.	115	vid.	105	vid.	512,5	vid.	25	vid.
35	0,01	maks.	140	maks.	60	min.	600	maks.	20	min.

Eksperimenti īstenoti skaitliski, izmantojot izstrādāto MA aprēķina modeli programmas formā. Izmantojot iegūtos modeļa datus, aprēķināta MA jauda. Ar aprēķinu iegūtie MA jaudas rezultāti attiecīgajos režīmos apkopoti 4.8. tabulā.

Aprēķinātā miglas aparāta jauda pie dažādiem režīmiem

Nr.	$V_g, \text{Nm}^3/\text{s}$	$t_{g1}, ^\circ\text{C}$	$G, \text{l/h}$	$d_{a0}, \mu\text{m}$	$t_{w1}, ^\circ\text{C}$	Q, kW
1	0,01	90	150	425	30	2,23
2	0,01	140	150	425	20	3,43
3	0,01	140	60	425	30	1,66
4	0,00482	140	150	600	20	1,67
5	0,01	90	150	600	20	2,47
6	0,00482	90	150	425	20	1,36
7	0,01	90	60	600	30	1,08
8	0,00482	90	150	600	20	1,34
9	0,00482	90	150	600	30	1,09
10	0,01	140	150	600	20	3,05
11	0,01	140	60	600	30	1,34
12	0,01	90	60	425	20	1,98
13	0,00482	90	60	425	20	1,31
14	0,00482	140	150	600	30	1,42
15	0,01	140	150	600	30	2,50
16	0,00482	140	60	600	30	1,09
17	0,01	140	150	425	30	2,90
18	0,01	90	150	600	30	1,94
19	0,00482	140	150	425	30	1,44
20	0,01	90	60	425	30	1,39
21	0,00735	115	105	512,5	25	1,99
22	0,00482	90	150	425	30	1,10
23	0,01	90	60	600	20	1,48
24	0,00735	115	105	512,5	25	1,99
25	0,01	90	150	425	20	2,75
26	0,00482	140	60	600	20	1,35
27	0,00482	140	150	425	20	1,69
28	0,00482	140	60	425	30	1,35
29	0,00482	140	60	425	20	1,63
30	0,01	140	60	425	20	2,30
31	0,00482	90	60	425	30	1,05
32	0,00482	90	60	600	20	1,10
33	0,00482	90	60	600	30	0,85
34	0,00735	115	105	512,5	25	1,99
35	0,01	140	60	600	20	1,77

Nākamais solis eksperimenta plānošanā ir neatkarīgo mainīgo pārveide bezdimensiju lielumos, kur mainīgie apzīmēti attiecīgi x_1, x_2, x_3 u. c. Katra mainīgā maksimālā vērtība līdzvērtīga +1, minimālā –1. Šajā gadījumā vērā netiek ņemti viduspunktu rezultāti, tas nozīmē, ka pārveidoti mainīgie 32 režīmos. Mainīgo vērtību intervāla un vidējās vērtības iegūst ar 4.5. un 4.6.vienādojumu palīdzību.

$$Z_n^0 = \frac{(Z_{n \max} + Z_{n \min})}{2} \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (4.5.)$$

$$\Delta Z_n = \frac{(Z_{n \max} - Z_{n \min})}{2} \quad (4.6.)$$

kur Z_n – j-tais neatkarīgais mainīgais;
 Z_n^0 – punkts ar koordinātām līdz k;
 ΔZ_n – vērtību intervāls Z_n asij. [132]

Aprēķinātās parametru vērtības ar pieņemtajiem koeficientiem apkopotas 4.9. tabulā.

4.9. tabula

Mainīgo intervāla un vidējās vērtības

	V_g	t_{g1}	G	d_{d0}	t_{w1}
maks.	0,01	140	150	600	30
min.	0,00482	90	60	425	20
Z_n^0	0,00735	115	105	512,5	25
ΔZ_n	0,00253	25	45	87,5	5
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5

Koeficientu $x_1 - x_5$ pārrēķins uz bezdimensiju koordinātām veikts pēc 4.7. formulas. Papildus analīzē ieviests brīvais koeficients x_0 , kas bezdimensiju koordinātās ir +1. Iegūtā bezdimensiju matrica attēlota 4.10. tabulā.

$$x_n = \frac{(Z_n - Z_n^0)}{\Delta Z_n} \quad (4.7.)$$

4.10. tabula

Mainīgie lielumi bezdimensiju koordinātās

Nr.	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Nr.	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	+1	1	-1	1	-1	1	17	+1	1	1	1	-1	1
2	+1	1	1	1	-1	-1	18	+1	1	-1	1	1	1
3	+1	1	1	-1	-1	1	19	+1	-1	1	1	-1	1
4	+1	-1	1	1	1	-1	20	+1	1	-1	-1	-1	1
5	+1	1	-1	1	1	-1	21	+1	-1	-1	1	-1	1
6	+1	-1	-1	1	-1	-1	22	+1	1	-1	-1	1	-1
7	+1	1	-1	-1	1	1	23	+1	1	-1	1	-1	-1
8	+1	-1	-1	1	1	-1	24	+1	-1	1	-1	1	-1
9	+1	-1	-1	1	1	1	25	+1	-1	1	1	-1	-1
10	+1	1	1	1	1	-1	26	+1	-1	1	-1	-1	1
11	+1	1	1	-1	1	1	27	+1	-1	1	-1	-1	-1
12	+1	1	-1	-1	-1	-1	28	+1	1	1	-1	-1	-1
13	+1	-1	-1	-1	-1	-1	29	+1	-1	-1	-1	-1	1
14	+1	-1	1	1	1	1	30	+1	-1	-1	-1	1	-1
15	+1	1	1	1	1	1	31	+1	-1	-1	-1	1	1
16	+1	-1	1	-1	1	1	32	+1	1	1	-1	1	-1

Nākamais solis ir aprēķināt mainīgo koeficientus b_n . Jebkura koeficienta b_n iegūšanai izmanto 4.8. vienādojumu, kur x_{ni} un y_{ni} reizinājumu summu dala ar eksperimentu skaitu N .

$$b_n = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ni} y_i}{N} \quad (4.8.)$$

kur b_n – n-tais koeficients;

N – eksperimentu skaits;

x_{ni} – katra eksperimenta mainīgais pie attiecīgā b koeficienta;
 y_i – atkarīgais mainīgais pie attiecīgā x . [132]

4.11. tabula

Mainīgo koeficientu vērtības

	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
$\sum x_n$	55,1274	13,4358	6,0499	9,6420	-4,0206	-6,2705
b_n	1,7227	0,4199	0,1891	0,3013	-0,1256	-0,1960

Iegūtais vienādojums bezdimensiju lielumiem izskatās šādi:

$$\hat{y} = 1,7227 + 0,4199x_1 + 0,1891x_2 + 0,3013x_3 - 0,1256x_4 - 0,1960x_5 \quad (4.9.)$$

Kad iegūts bezdimensiju vienādojums, nepieciešams pāriet pie reālajiem skaitļiem. x_n tiek aizstāts ar eksperimenta lielumiem. Vienādojums izskatās šādi:

$$Q = 1,7227 + 0,4199 \frac{V_g - 0,00735}{0,0025} + 0,1891 \frac{t_{g1} - 115}{25} + 0,3013 \frac{G - 105}{45} - 0,1256 \frac{d_{d0} - 512,5}{87,5} - 0,1960 \frac{t_{w1} - 25}{5} \quad (4.10.)$$

Iegūts reālo skaitļu vienādojums:

$$Q = 0,6458 + 165,8865V_g + 0,0076t_{g1} + 0,0067G - 0,0014d_{d0} - 0,0392t_{w1} \quad (4.11.)$$

Pēc bezdimensiju vienādojuma var noteikt, ka mainīgais ar lielāko ietekmi uz MA jaudu ir dūmgāzu plūsma V_g . Lai noteiktu, vai vienādojums ir adekvāts MA jaudas raksturošanai un atbilst 95 % ticamības robežai, programmā *Statgraphics Centurion XVII* veikta daudzfaktoru regresijas analīze veiktajiem eksperimentiem (32 režīmi). Analīzes rezultātā iegūts šāds MA jaudu raksturojošs vienādojums:

$$Q = 0,6458 + 165,887V_g + 0,0076t_{g1} + 0,0067G - 0,0014d_{d0} - 0,0392t_{w1} \quad (4.12.)$$

Iegūtais regresijas vienādojuma koriģētais determinācijas koeficients apraksta 82,26 % no MA jaudas rezultātiem. Salīdzinot ar eksperimenta plānošanā iegūto vienādojumu, var redzēt, ka atšķirības starp mainīgajiem praktiski nav. Starp vienādojuma mainīgajiem nav novērojamas savstarpējas korelācijas. Šis rezultāts apstiprina to, ka eksperimenta plānošanā iegūtais vienādojums adekvāti apraksta MA jaudu un nav nepieciešams atsevišķi veikt vienādojuma mainīgo statistiskās nozīmības pārbaudi.

Optimizācijai izvēlēta stāvā kāpuma Boksa–Wilsona (*Box–Wilson*) metode. Bezdimensiju vienādojums (4.9. vienādojums) ir skaitliskā eksperimenta atsauces funkcija, un ar tās palīdzību tiek realizēta stāvā kāpuma optimizācija. Ar vienādojuma koeficientu palīdzību nosaka stāvā kāpuma virzienu un kāpuma soli. Soli nosaka katram faktoram kā faktora koeficienta b_i un proporcionalitātes koeficienta γ reizinājumu. No bezdimensiju vienādojuma (4.9. vienādojums)

izvēlas faktoru, kurš būtiski ietekmē atsaucēs vērtību y , pieņem tā izmaiņas soli δ'_k un aprēķina proporcionalitātes koeficienta γ . Aprēķiniem tiek izmantota šāda izteiksme:

$$\gamma = \frac{\delta_k}{\delta_k b_k} \quad (4.13.)$$

Citu faktoru soļu izmaiņas ir proporcionālas galvenā faktora soļu izmaiņām

$$\delta'_i = \gamma \delta_i b_i \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (4.14.)$$

Pēc pirmā optimizācijas soļa faktoru vērtības aprēķina šādi [133]:

$$x_{in} = x_{i0} + u \delta'_i \quad (4.15.)$$

Optimizācijas mērķis ir atrast faktoru kopumu, kas nodrošinātu maksimālo Q vērtību. Optimizācijai izvēlēta stāvā kāpuma vai gradienta metode. Šim nolūkam izmantots modelis, kas aplūko tikai galveno faktoru iedarbību (izslēdzot faktoru savstarpējās iedarbes efektus).

Skaitliskā eksperimenta matricā augstākā Q vērtību var sasniegt, ja V_g^{max} ; t_{g1}^{max} ; G^{max} ; d_{d0}^{min} un t_{w1}^{min} . Tas nozīmē, ka optimālās vērtības meklējumos jāpalielina V_g , t_{g1} , G vērtības un jāsamazina d_{d0} un t_{w1} . No regresijas vienādojuma (4.9. vienādojums) bezdimensiju vērtībām redzams, ka būtiskāk jaudu ietekmē gāzes plūsma, jo šī faktora koeficientam ir lielākā vērtība.

Tiek izvēlēts gāzes plūsmas pieauguma solis un atkarība no tā, noteiktas pārējo faktoru izmaiņas. Optimizāciju sāk no skaitliskā eksperimenta plāna centra. Nepieciešamo darbību secība redzama 4.12. tabulā.

4.12. tabula

Faktoru izmaiņu soļi optimizācijā

Mainīgie lielumi	V_g , Nm ³ /s	t_{g1} , °C	G , l/h	d_{d0}	t_{w1} , °C	Q , kW
Plāna centrs	0,00741	115	105	512,5	25	1,755
Izmaiņu intervāls	0,00259	25	45	57,5	5	
Augšējā robeža	0,01	140	150	600	30	
Apakšējā robeža	0,00482	90	60	425	20	
Bezdimensiju vienādojuma (4.8.) koeficienti b_i	0,4199	0,1891	0,3013	-0,1256	-0,196	
b_i * izmaiņu intervāls	0,00109	4,7275	13,5585	-10,99	-0,98	
Parametra izmaiņas solis	0,0013	5,62	16,13	-13,078	-1,07	

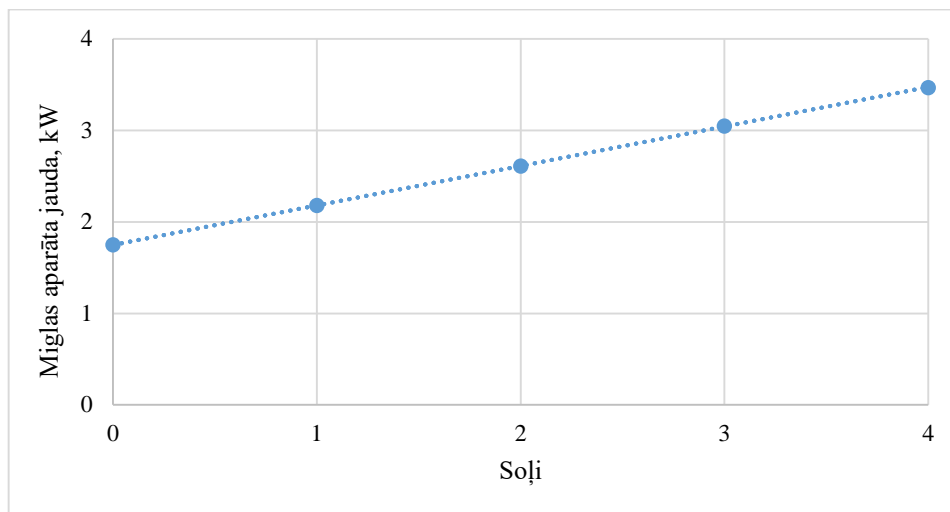
Ar faktoru izmaiņu soļu palīdzību definētie turpmākie režīmi stāvā kāpuma virzienā apkopoti 4.13. tabulā.

4.13. tabula

Režīmi optimuma noteikšanai

	V_g	t_{g1}	G	d_{d0}	t_{w1}	Q
1.	0,0087	120,6	121,13	499	23,8	2,18
2.	0,01	126,2	137,26	486	22,6	2,61
3.	0,0113	131,8	153,39	473	21,5	3,05
4.	0,0126	137,4	169,5	460	20,33	3,47

Atsaucēs parametra Q vērtības atkarībā no optimizācijas soļa grafiski redzamas 4.6. attēlā.



4.12. att. MA jaudas izmaiņas stāvā kāpuma virzienā.

Kā redzams 4.12. attēlā, kondensatora jaudas izmaiņas ģenerētajos režīmos un plāna centrā ir lineāras, tajās nav optimuma, un jauda pieaug ar katru soli. 4.13. tabulā apkopotie stāvā kāpuma soļu aprēķini liecina, ka jaudas pieaugumam nepieciešams palielināt gāzes plūsmu, iesmidzināmo ūdens daudzumu, samazināt pilienu diametrus un iesmidzināt ūdeni ar zemāku temperatūru. Aplūkotajā iekārtā maksimālo kondensatora jaudu ierobežo dūmgāzu plūsmas vērtība $0,01 \text{ Nm}^3/\text{s}$. Plūsmu nosaka granulu katla jauda (20 kW) un kvalitatīva kurināmā sadedzināšana (skābekļa daudzums dūmgāzēs). Cits būtisks gāzu plūsmu ierobežojošs apstāklis ir gāzes un pilienu mijiedarbība kondensatorā. Pieaugot plūsmai palielinās smalko pilienu iznešana no aparāta.

Veiktā izpēte rāda, ka MA, kas projektēts 20 kW granulu katlam, var atgūt līdz 2,6 kW dūmgāzu siltuma. Tas ir 13 % no katla jaudas. Šajā režīmā (4.13. tab.) gāzu plūsmai jābūt $V_g = 0,01 \text{ Nm}^3/\text{s}$, gāzu temperatūrai $t_{g1} = 126 \text{ }^\circ\text{C}$, ūdens plūsmai $G = 137 \text{ l/h}$, ūdens pilienu diametram $d_{d0} = 486 \text{ } \mu\text{m}$ un iesmidzināmā ūdens temperatūrai $t_{w1} = 22,6 \text{ }^\circ\text{C}$.

Izpētē aplūkoti soļi stāvā kāpuma virzienā, tāpēc katra soļa (režīma) parametri uzskatāmi par optimāliem. Optimālo režīmu parametru vērtības apkopotas 4.13. tabulā. Būtiski atzīmēt, ka, mainoties vienam izvēlētam parametram, pārējie mainās pēc noteiktas likumsakarības, ko apraksta regresijas vienādojums (4.9. vienādojums). Brīvi var mainīt tikai vienu parametru. Ja MA iekārtas optimālai darbināšanai nepieciešami citi izmaiņu soļi, tad jāveic jauni soļu aprēķini.

MA jauda pieaug, palielinoties dūmgāzu plūsmai, dūmgāzu temperatūrai un iesmidzinātā ūdens daudzumam un samazinoties pilienu izmēram un iesmidzinātā ūdens temperatūrai. Reālos apstākļos dūmgāzu plūsmu nav iespējams mainīt, jo tā ir atkarīga no katla jaudas, izmantotā kurināmā un katla darbināšanas parametriem. Arī dūmgāzu temperatūra ir atkarīga no katla konstruktīvās daļas un katla darbības parametriem. Pilienu izmērs ir atkarīgs no izvēlētas sprauslas, tomēr pilienu izmēra regulēšana, darbinot MA, ir ierobežota. Ir svarīgi panākt zemu iesmidzinātā ūdens temperatūru, lai sasniegtu augstāku MA jaudu. Tomēr arī iesmidzinātā ūdens temperatūras izvēle un regulēšana mājāsaimniecībās ir ierobežota un lielā mērā atkarīga no apkures sistēmas īpatnībām, kā arī sistēmas siltuma patēriņa.

SECINĀJUMI

1. Izgatavota, pārbaudīta un turpmākai izmantošanai piedāvāta efektīva mazas jaudas granulu katliem piemērota dūmgāzu attīrīšanas un siltuma atgūšanas tehnoloģija, lai uzlabotu katla un tā sistēmas kopējo energoefektivitāti un samazinātu *PM* emisijas. To veic MA, realizējot siltuma un masas pārejas procesus starp katla dūmgāzēm, pilienu veidā iesmidzinātu ūdeni un *PM*.

2. MA sistēmas pārbaudes eksperimentu rezultāti liecina, ka iekārtas *PM* uztveršanas efektivitāte ir līdz aptuveni 68 %, kas ir augsts efektivitātes rādītājs. Galvenie mainīgie parametri, kas pārbaudīti šajos eksperimentos, ir iesmidzinātā ūdens daudzums, iesmidzinātā ūdens pilienu sākuma diametrs un pilienu temperatūra MA ievadā, dūmgāzu plūsma un temperatūra pirms MA.

3. Galvenie MA sistēmu raksturojošie rādītāji, kas iegūti sistēmas veiktspējas analīzes rezultātā, ir: MA jauda robežās no 0,5 kW līdz 5,2 kW; energoefektivitāte robežās no 3,2 % līdz 14,5 %; *PM* uztveršanas efektivitāte robežās no 33,1 % līdz 67,9 %. Zemākā sasniegtā *PM* koncentrācija dūmgāzēs pēc MA ir līdz 10 mg/Nm³, kas iekļaujas ES Ekodizaina direktīvas noteiktajos robežlielumos automātiski darbināmiem katliem, kas ir līdz 40 mg/m³. Eksperimenti pierādīja, ka MA spēj nodrošināt zemāku *PM* koncentrāciju 93 % gadījumu. Vienīgie gadījumi, kad *PM* koncentrācija pēc MA pārsniedza 40 mg/m³, ir pie paaugstinātas – 30 kW – katla jaudas un caurplūdes, kas pārsniedz 250 l/h, kas pārsniedz optimālo iesmidzinātā ūdens daudzumu. Šie rezultāti ir attiecināmi uz iekārtas darbību reālai situācijai pietuvinātā laboratorijas vidē. Ar MA sistēmas pārbaudi mākslīgā vidē ir nodrošināts, ka izstrādātā tehnoloģija ir atbilstoša tehnoloģiju gatavības līmenim – *TRL 5*.

4. Darba gaitā izstrādāts MA simulācijas jeb aprēķina modelis, kas raksturo tā darbību dažādos darbināšanas apstākļos. Tas raksturo siltuma un masas apmaiņas procesu norisi kondensatorā, ja procesos iesaistītas arī *PM*. Ar modeļa palīdzību var noteikt pilienu diametru, gāzu temperatūras, ūdens temperatūras, *PM* koncentrācijas un ūdens tvaika piesātinājuma stāvokļa un plūsmas parciālo spiedienu starpību izmaiņas MA augstumā. Aprēķina modelis validēts, izmantojot eksperimentu un aprēķina datu salīdzinājumu vienādos iekārtas darbības režīmos. Validācija veikta datiem, ja katla jauda ir 20 kW, kas ir modeļa šī brīža pielietojamības robežas. Modeļa rezultātiem ir augsts ticamības līmenis, jo starp modeļa un eksperimenta datiem iegūtā atšķirība nepārsniedz 10 %.

5. Modelēšanas rezultāti papildina eksperimentu rezultātus un sniedz informāciju par procesu norisi aparātā. Tvaika parciālo spiedienu izmaiņas liecina par to, vai aparātā notiek kondensācija uz pilieniem, vai pilienu iztvaikošana un par to, vai procesi noris visā aparātā, vai tikai tā daļā. Kondensācijas procesa pāreja iztvaikošanā ir aktuāla augstas iesmidzināmā ūdens temperatūras gadījumā, jo pilieni, uzsilstot aparātā, var sasniegt rasas punkta temperatūru, un seko pilienu iztvaikošana. Parametru eksperimentāla noteikšana aparātā ir komplicēta, jo piesārņotās dūmgāzes ir sajauktas ar iesmidzinātiem ūdens pilieniem un veido komponentu maisījumu.

6. Optimizācijā izmantota Boksa–Vilsona (*Box–Wilson*) stāvā kāpuma metode. Tajā veikts skaitlisks eksperiments. Izstrādāta un analizēta eksperimentālo datu matrica MA jaudas noteikšanai, kurā galvenie jaudu ietekmējošie parametri ir: dūmgāzu plūsmas ātrums; dūmgāzu temperatūra pirms MA (pēc katla); iesmidzinātā ūdens daudzums; ūdens pilienu diametrs;

iesmidzinātā ūdens temperatūra MA ievadā. Noteiktās datu robežas balstījās eksperimentu rezultātos, kas pielīdzināmas rezultātiem pie katla jaudām, sākot no 10 kW līdz 20 kW. Ir iegūta aparāta optimālo režīmu karte. Galvenie datu analīzes un optimizācijas rezultāti uzrāda to, ka MA jaudai ir lineāra pieauguma tendence. Realitātē tas ir iespējams līdz iesmidzinātā ūdens daudzuma optimuma – 150 l/h – sasniegšanai. Iesmidzinātā ūdens daudzumam pārsniedzot 200 l/h, iekārtas efektivitāte samazinās. Cits parametrs, kas ietekmē iekārtas darbību praksē, ir dūmgāzu plūsma, kas nedrīkst pārsniegt 0,01 Nm³/s. Plūsmu ietekmē katla jauda un izmantotā kurināmā kvalitāte. Papildus jāņem vērā gāzu un pilienu mijiedarbības veids kondensatorā.

7. Darba izstrādes laikā iegūtie rezultāti apstiprina, ka ir iespējams izveidot efektīvu *PM* uztveršanas un dūmgāzu siltuma atgūšanas iekārtu mājsaimniecību siltuma avotiem – mazas jaudas granulu kurināmā katliem. No dūmgāzēm atgūto siltumu var izmantot karstā ūdens apgādē.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. “Earth’s CO2 Home Page”. [Online]. Available: <https://www.co2.earth/>. [Accessed: 07-Jun-2020].
2. H. Thomson and C. Liddell, “The suitability of wood pellet heating for domestic households: A review of literature”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 1362–1369, 2015.
3. M. Ståhl and F. Wikström, “Swedish perspective on wood fuel pellets for household heating: A modified standard for pellets could reduce end-user problems”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, no. 5, pp. 803–809, 2009.
4. G. Skjevraak and B. M. Sopha, “Wood-Pellet Heating in Norway: Early Adopters’ Satisfaction and Problems That Have Been Experienced”, *Sustainability*, vol. 4, no. 6, pp. 1089–1103, 2012.
5. H. A. C. Denier Van Der Gon *et al.*, “Particulate emissions from residential wood combustion in Europe - revised estimates and an evaluation”, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 15, no. 11, pp. 6503–6519, 2015.
6. R. J. Olave, E. G. A. Forbes, C. R. Johnston, and J. Relf, “Particulate and gaseous emissions from different wood fuels during combustion in a small-scale biomass heating system”, *Atmos. Environ.*, vol. 157, pp. 49–58, 2017.
7. A. Williams, J. M. Jones, L. Ma, and M. Pourkashanian, “Pollutants from the combustion of solid biomass fuels”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 38, no. 2, pp. 113–137, 2012.
8. C. Alves, C. Gonçalves, A. P. Fernandes, L. Tarelho, and C. Pio, “Fireplace and woodstove fine particle emissions from combustion of western Mediterranean wood types”, *Atmos. Res.*, vol. 101, no. 3, pp. 692–700, 2011.
9. M. C. Claudy, C. Michelsen, and A. O’Driscoll, “The diffusion of microgeneration technologies - assessing the influence of perceived product characteristics on home owners’ willingness to pay”, *Energy Policy*, vol. 39, no. 3, pp. 1459–1469, 2011.
10. “EUR - Lex - 32009L0125 - EN - EUR-Lex”. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32009L0125>. [Accessed: 12-Apr-2019].
11. “Noteikumi par ekodizaina prasībām ar enerģiju saistītām precēm (produktiem)”. [Online]. Available: <https://likumi.lv/doc.php?id=241282>. [Accessed: 10-May-2019].
12. B. Miller, *3 - Particulate formation and control technologies*. 2015.
13. M. T. Lim, A. Phan, D. Roddy, and A. Harvey, “Technologies for measurement and mitigation of particulate emissions from domestic combustion of biomass: A review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 574–584, 2015.
14. T. Kaivosoja *et al.*, “Effects of a catalytic converter on PCDD/F, chlorophenol and PAH emissions in residential wood combustion”, *Chemosphere*, vol. 88, no. 3, pp. 278–285, 2012.
15. R. Wieland, K. Groth, F. Linde, and W. Mirschel, “Spatial Analysis and Modeling Tool Version 2 (SAMT2), a spatial modeling tool kit written in Python”, *Ecol. Inform.*, vol. 30, pp. 1–5, 2015.
16. S. Fournel, B. Marcos, S. Godbout, and M. Heitz, “Predicting gaseous emissions from small-scale combustion of agricultural biomass fuels”, *Bioresour. Technol.*, vol. 179, pp. 165–172, 2015.
17. A. Hukkanen, T. Kaivosoja, O. Sippula, K. Nuutinen, J. Jokiniemi, and J. Tissari, “Reduction of gaseous and particulate emissions from small-scale wood combustion with a catalytic combustor”, *Atmos. Environ.*, vol. 50, pp. 16–23, 2012.
18. R. Singh and A. Shukla, “A review on methods of flue gas cleaning from combustion of biomass”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 854–864, 2014.
19. L. Cui *et al.*, “Life cycle assessment of ultra-low treatment for steel industry sintering flue gas emissions”, *Sci. Total Environ.*, vol. 725, p. 138292, 2020.
20. D. K. Yoo, H. C. Woo, and S. H. Jung, “Removal of particulate matter with metal-

- organic framework-incorporated materials”, *Coord. Chem. Rev.*, vol. 422, p. 213477, 2020.
21. A. Bandyopadhyay and M. N. Biswas, “Fly ash scrubbing in a novel dual flow scrubber”, *Waste Manag.*, vol. 27, no. 12, pp. 1845–1859, 2007.
 22. S. H. Byeon, B. K. Lee, and B. Raj Mohan, “Removal of ammonia and particulate matter using a modified turbulent wet scrubbing system”, *Sep. Purif. Technol.*, vol. 98, pp. 221–229, 2012.
 23. G. Liu, J. Wang, T. Chen, J. Liu, and J. Yan, “Experimental study on heat transfer characteristics of a condenser in the presence of air”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 120, pp. 170–178, 2017.
 24. M. Owen and D. G. Kröger, “A numerical investigation of vapor flow in large air-cooled condensers”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 127, pp. 157–164, 2017.
 25. I. Voytkov, R. Volkov, and P. Strizhak, “Reducing the flue gases temperature by individual droplets, aerosol, and large water batches”, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 88, pp. 301–316, 2017.
 26. B. C. Meikap, G. Kundu, and M. N. Biswas, “Scrubbing of fly-ash laden SO₂ in modified multistage bubble column scrubber”, *AIChE J.*, vol. 48, no. 9, pp. 2074–2083, 2002.
 27. C. Carotenuto, F. Di Natale, and A. Lancia, “Wet electrostatic scrubbers for the abatement of submicronic particulate”, *Chem. Eng. J.*, vol. 165, no. 1, pp. 35–45, 2010.
 28. T. Bortolotto *et al.*, “Evaluation of toxic and genotoxic potential of a wet gas scrubber effluent obtained from wooden-based biomass furnaces: A case study in the red ceramic industry in southern Brazil”, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 143, no. May, pp. 259–265, 2017.
 29. H. Ali, F. Plaza, and A. Mann, “Flow visualization and modelling of scrubbing liquid flow patterns inside a centrifugal wet scrubber for improved design”, *Chem. Eng. Sci.*, vol. 173, pp. 98–109, 2017.
 30. D. Mussatti, “Section 6 Particulate Matter Controls Chapter 2 Wet Scrubbers for Particulate Matter”.
 31. A. G. Bhawe, D. K. Vyas, and J. B. Patel, “A wet packed bed scrubber-based producer gas cooling-cleaning system”, *Renew. Energy*, vol. 33, no. 7, pp. 1716–1720, 2008.
 32. D. Cheng, E. A. J. F. (Frank) Peters, and J. A. M. (Hans) Kuipers, “Performance study of heat and mass transfer in an adsorption process by numerical simulation”, *Chem. Eng. Sci.*, vol. 160, no. September 2016, pp. 335–345, 2017.
 33. M. Bal and B. Charan, “Prediction of hydrodynamic characteristics of a venturi scrubber by using CFD simulation”, *South African J. Chem. Eng.*, vol. 24, pp. 222–231, 2017.
 34. J. Grigonytė-Lopez Rodriguez *et al.*, “A novel electrical charging condensing heat exchanger for efficient particle emission reduction in small wood boilers”, *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 521–529, 2020.
 35. E. Tian, Y. Gao, and J. Mo, “Electrostatically assisted air coarse filtration for energy efficient ambient particles removal: Long-term performance in real environment and influencing factors”, *Build. Environ.*, vol. 164, no. June, 2019.
 36. E. Tan, S. Ünal, A. Doğan, E. Letournel, and F. Pellizzari, “New ‘wet type’ electron beam flue gas treatment pilot plant”, *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 119, no. 3, pp. 109–115, 2016.
 37. A. H. Hultén, P. Nilsson, M. Samuelsson, S. Ajdari, F. Normann, and K. Andersson, “First evaluation of a multicomponent flue gas cleaning concept using chlorine dioxide gas – Experiments on chemistry and process performance”, *Fuel*, vol. 210, no. July, pp. 885–891, 2017.
 38. J. D. Herner *et al.*, “Effect of advanced aftertreatment for PM and NO_x reduction on heavy-duty diesel engine ultrafine particle emissions”, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 6, pp. 2413–2419, 2011.
 39. N. Karvosenoja, Z. Klimont, A. Tohka, and M. Johansson, “Cost-effective reduction of fine primary particulate matter emissions in Finland”, *Environ. Res. Lett.*, vol. 2, no. 4,

- p. 044002, 2007.
40. A. Messerer, V. Schmatloch, U. Pöschl, and R. Niessner, “Combined particle emission reduction and heat recovery from combustion exhaust-A novel approach for small wood-fired appliances”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 31, no. 7, pp. 512–521, 2007.
 41. Y. Feng, Y. Li, and L. Cui, “Critical review of condensable particulate matter”, *Fuel*, vol. 224, no. March, pp. 801–813, 2018.
 42. E. D. Vicente and C. A. Alves, “An overview of particulate emissions from residential biomass combustion”, *Atmos. Res.*, 2017.
 43. Eiropas parlaments un Eiropas savienības padome, *Eiropas parlamenta un padomes direktīva 2008/50/EK par gaisa kvalitāti un tīrāku gaisu Eiropai*. 2008.
 44. World health organization Media centre, “WHO | Ambient (outdoor) air quality and health”, *WHO*, 2016.
 45. “Par piesārņojumu”. [Online]. Available: <https://likumi.lv/doc.php?id=6075>. [Accessed: 10-May-2019].
 46. “Noteikumi par gaisa kvalitāti”. [Online]. Available: <https://likumi.lv/doc.php?id=200712>. [Accessed: 10-May-2019].
 47. Latvijas Republikas Ministru kabinets, “Noteikumi par gaisa kvalitāti”. [Online]. Available: <https://likumi.lv/doc.php?id=200712>. [Accessed: 21-Mar-2018].
 48. Latvijas Republikas Ministru kabinets, “Kopējo gaisu piesārņojošo vielu emisiju samazināšanas un uzskaites noteikumi”. [Online]. Available: <https://likumi.lv/ta/id/301989-kopejo-gaisu-piesarnojoso-vielu-emisiju-samazinanas-un-uzskaites-noteikumi>. [Accessed: 02-Oct-2020].
 49. Latvijas Republikas Ministru kabinets, “Siltumnīcefekta gāzu inventarizācijas un prognožu sagatavošanas nacionālās sistēmas izveidošanas un uzturēšanas noteikumi”. [Online]. Available: <https://likumi.lv/ta/id/295801-siltumnicefekta-gazu-inventarizacijas-un-prognozu-sagatavosanas-nacionalas-sistemas-izveidosanas-un-uzturesanas-noteikumi>. [Accessed: 02-Oct-2020].
 50. J. Chen *et al.*, “A review of biomass burning: Emissions and impacts on air quality, health and climate in China”, *Sci. Total Environ.*, vol. 579, no. November 2016, pp. 1000–1034, 2017.
 51. Clean Heat, “Residential wood burning. Environmental impact and sustainable solutions”, 2016.
 52. European Environment Agency (EEA), “Emissions of the main air pollutants in Europe”, 2018. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/main-anthropogenic-air-pollutant-emissions/assessment-6>. [Accessed: 02-Oct-2020].
 53. S. Yang, B. Chen, M. Wakeel, T. Hayat, A. Alsaedi, and B. Ahmad, “PM2.5 footprint of household energy consumption”, *Appl. Energy*, vol. 227, no. 19, pp. 375–383, 2018.
 54. European Environment Agency (EEA), “European Air Quality Index”. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-index>. [Accessed: 02-Oct-2020].
 55. European Environment Agency (EEA), *The European environment-state and outlook 2020. Knowledge for transition to a sustainable Europe*, vol. 60, no. 3. 2020.
 56. W. Wu, Y. Jin, and C. Carlsten, “Inflammatory health effects of indoor and outdoor particulate matter”, *J. Allergy Clin. Immunol.*, vol. 141, no. 3, p. 845, 2018.
 57. K. H. Kim, E. Kabir, and S. Kabir, “A review on the human health impact of airborne particulate matter”, *Environ. Int.*, vol. 74, pp. 136–143, 2015.
 58. W. J. Shaughnessy, M. M. Venigalla, and D. Trump, “Health effects of ambient levels of respirable particulate matter (PM) on healthy, young-adult population”, *Atmos. Environ.*, vol. 123, pp. 102–111, 2015.
 59. A. Jiao *et al.*, “Short-term impacts of ambient fine particulate matter on emergency department visits: Comparative analysis of three exposure metrics”, *Chemosphere*, vol. 241, p. 125012, 2019.
 60. R. V. Martin, M. Brauer, A. van Donkelaar, G. Shaddick, U. Narain, and S. Dey, “No

- one knows which city has the highest concentration of fine particulate matter”, *Atmos. Environ. X*, vol. 3, no. June, p. 100040, 2019.
61. SIA Vidzemes Elektrotehnikas fabrika, “Pētījums par tehnoloģijām putekļu smalko daļiņu sastāva un morfoloģijas noteikšanai un metodes izstrāde putekļu paraugu savākšanai Rīgas gaisa monitoringa stacijās un atklātā vidē”, 2013.
 62. Latvijas Vides ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs, “Valsts rīcības programma, lai samazinātu smalko daļiņu $PM_{2.5}$ emisiju valstī un to radīto negatīvo ietekmi uz cilvēku veselību”, p. 153, 2014.
 63. Centrālā statistikas pārvalde, “Mājsaimniecību energoresursu patēriņa apsekojuma rezultāti”, 2016. [Online]. Available: <https://www.csb.gov.lv/lv/statistika/statistikas-temas/vide-energetika/energoresursu-paterins/meklet-tema/2147-majsaimniecibu-energoresursu>. [Accessed: 30-Sep-2020].
 64. Centrālā statistikas pārvalde, “EPM340. Energoresursu patēriņš mājsaimniecībās, ieskaitot patēriņa lauku saimniecībās un citās ekonomiskās aktivitātēs (TJ)”, 2016. [Online]. Available: http://data1.csb.gov.lv/pxweb/lv/vide/vide__energetika__energ_pat/EPM340.px/table/tableViewLayout1/. [Accessed: 30-Sep-2020].
 65. Centrālā statistikas pārvalde, “Energobalance, TJ, tūkst.toe (NACE 2. red.) - Rādītāji, Energoresursu veids un Laika periods”, *ENB060. Energobalance, TJ, tūkst.toe (NACE 2. red.) 2008 - 2020, 2021*. [Online]. Available: https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_PUB/START__NOZ__EN__ENB/ENB060/table/tableViewLayout1/.
 66. LVĢMC, “Latvia’s Informative Inventory Report 1990-2018”, 2020.
 67. Latvijas Vides ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs, “Gaisa piesārņojošo vielu emisijas no stacionāriem avotiem (tūkst. tonnu)”, *VIG020. Gaisa piesārņojošo vielu emisijas no stacionāriem avotiem (tūkst. tonnu)*, 2021. [Online]. Available: https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_OD/OSP_OD__vide_geogr__vide/VIG020.px/table/tableViewLayout1/.
 68. Oficiālās statistikas portāls and Latvijas oficiālā statistika, “GPE010. Gaisa emisiju konti (NACE 2.red.) - Rādītāji, Gaisa piesārņotāji un Laika periods”, *Gaisa emisiju konti*, 2020. [Online]. Available: https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_PUB/START__ENV__GP__GPE/GPE010.
 69. Pārresoru koordinācijas centrs, “Latvijas Nacionālais attīstības plāns 2014. - 2020. gadam”, 2012.
 70. Latvijas Republikas Saeima, “Latvijas ilgtspējīgas attīstības stratēģija līdz 2030. gadam”, 2010.
 71. Latvijas Republikas Saeima, “Vides aizsardzības likums”, 2006. [Online]. Available: <https://likumi.lv/doc.php?id=147917>. [Accessed: 01-Oct-2020].
 72. Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrija, “Vides politikas pamatnostādnes 2014.–2020. gadam”, no. 130, 2014.
 73. The Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), “ESAO vides raksturlielumu pārskati”, 2019.
 74. Pārresoru koordinācijas centrs, “Latvijas nacionālais attīstības plāns 2021. – 2027. gadam”, no. 418, 2021.
 75. Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrija, “Priekšlikumi par kārtību, kādā jānovērš, jāierobežo un jākontrolē gaisu piesārņojošo vielu emisijas no sadedzināšanas iekārtām”. [Online]. Available: <https://www.varam.gov.lv/lv/aktualitates-1>. [Accessed: 02-Oct-2020].
 76. Latvijas Republikas Ministru kabinets, “Kopējo gaisu piesārņojošo vielu emisiju samazināšanas un uzskaites noteikumi”. [Online]. Available: <https://likumi.lv/ta/id/301989>. [Accessed: 02-Oct-2020].
 77. Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrija (VARAM), “GAISA PIESĀRŅOJUMA SAMAZINĀŠANAS RĪCĪBAS PLĀNS 2020. - 2030. GADAM”. p.

- 115, 2020.
78. R. Enayatollahi, R. J. Nates, and T. Anderson, "Characterising the heat and mass transfer coefficients for a crossflow interaction of air and water", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 111, pp. 94–104, 2017.
 79. L. D. Gu, J. C. Min, and Y. C. Tang, "Effects of mass transfer on heat and mass transfer characteristics between water surface and airstream", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 122, pp. 1093–1102, 2018.
 80. J. Lu, H. Cao, and J. M. Li, "Condensation heat and mass transfer of steam with non-condensable gases outside a horizontal tube under free convection", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 139, pp. 564–576, 2019.
 81. P. Barabash, A. Solomakha, and V. Sereda, "Experimental investigation of heat and mass transfer characteristics in direct contact exchanger", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 162, p. 120359, 2020.
 82. E. Cao, *Heat Transfer in Process Engineering*. McGrawHill, 2009.
 83. J. Huang, J. Zhang, and L. Wang, "Review of vapor condensation heat and mass transfer in the presence of non-condensable gas", *Appl. Therm. Eng.*, vol. 89, pp. 469–484, 2015.
 84. S. Boroomandi Barati, N. Pionnier, J. C. Pinoli, S. Valette, and Y. Gavet, "Investigation spatial distribution of droplets and the percentage of surface coverage during dropwise condensation," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 124, no. March 2017, pp. 356–365, 2018.
 85. H. B. Mahood, "Experimental and Theoretical Investigation of a Three-Phase Direct Contact Condenser", no. August, 2015.
 86. H. . Jacobs, "Direct Contact Heat Transfer", *A-to-Z Guid. to Thermodyn. Heat Mass Transf. Fluids Eng.*, vol. d, no. November, 2006.
 87. A. Macháčková, R. Kocich, M. Bojko, L. Kunčická, and K. Polko, "Numerical and experimental investigation of flue gases heat recovery via condensing heat exchanger", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 124, pp. 1321–1333, 2018.
 88. M. Ahlers, A. Buck-embeden, and H. Bart, "Is dropwise condensation feasible ? A review on surface modifications for continuous dropwise condensation and a profitability analysis", *J. Adv. Res.*, vol. 16, pp. 1–13, 2019.
 89. M. Terhan and K. Comakli, "Design and economic analysis of a flue gas condenser to recover latent heat from exhaust flue gas", *Appl. Therm. Eng.*, vol. 100, pp. 1007–1015, 2016.
 90. Comsol, "What Is Mass Transfer?", *Multiphysics cyclopedia*, 2015. [Online]. Available: <https://www.comsol.co.in/multiphysics/what-is-mass-transfer>. [Accessed: 29-Sep-2020].
 91. Z. Wang, X. Zhang, and Z. Li, "Evaluation of a flue gas driven open absorption system for heat and water recovery from fossil fuel boilers", *Energy Convers. Manag.*, vol. 128, pp. 57–65, 2016.
 92. I. Marinez, "Fundamentals of Heat Transfer (What Is It)", *Module*, pp. 1–27, 2008.
 93. D. Cheng, E. A. J. F. F. Peters, and J. A. M. H. Kuipers, "Numerical modelling of flow and coupled mass and heat transfer in an adsorption process", *Chem. Eng. Sci.*, vol. 152, pp. 413–425, 2016.
 94. L. Z. Zhang, "Transient and conjugate heat and mass transfer in hexagonal ducts with adsorbent walls", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 84, pp. 271–281, May 2015.
 95. A. Pakari and S. Ghani, "Comparison of 1D and 3D heat and mass transfer models of a counter flow dew point evaporative cooling system: Numerical and experimental study", *Int. J. Refrig.*, vol. 99, pp. 114–125, 2019.
 96. M. Al-Zareer, I. Dincer, and M. A. Rosen, "Heat and mass transfer modeling and assessment of a new battery cooling system", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 126, pp. 765–778, 2018.
 97. M. S. Fernandes, A. R. Gaspar, V. A. F. Costa, J. J. Costa, and G. J. V. N. Brites, "Optimization of a thermal energy storage system provided with an adsorption module – A GenOpt application in a TRNSYS/MATLAB model", *Energy Convers. Manag.*, vol.

- 162, no. February, pp. 90–97, 2018.
98. J. Nyers and A. Nyers, “Investigation of Heat Pump Condenser Performance in Heating Process of Buildings using a Steady-State Mathematical Model”, *Energy Build.*, vol. 75, pp. 523–530, 2014.
 99. H. Qiao, V. Aute, H. Lee, K. Saleh, and R. Radermacher, “A new model for plate heat exchangers with generalized flow configurations and phase change”, *Int. J. Refrig.*, vol. 36, no. 2, pp. 622–632, 2013.
 100. J. C. Pacio and C. A. Dorao, “A review on heat exchanger thermal hydraulic models for cryogenic applications”, *Cryogenics (Guildf.)*, vol. 51, no. 7, pp. 366–379, 2011.
 101. H. B. Mahood, R. B. Thorpe, A. N. Campbell, and A. O. Sharif, “Experimental measurements and theoretical prediction for the transient characteristic of a two-phase two-component direct contact condenser”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 87, pp. 161–174, 2015.
 102. X. Ou, W. Cai, X. He, and Y. Wu, “Dynamic model development of heat and mass transfer for a novel desiccant regeneration system in liquid desiccant dehumidification system”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 145, no. August, pp. 375–385, 2018.
 103. Q. Shen, D. Sun, S. Su, N. Zhang, and T. Jin, “Development of heat and mass transfer model for condensation”, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 84, pp. 35–40, 2017.
 104. “Energy2D - Interactive Heat Transfer Simulations for Everyone” .
 105. H. Li, B. Wang, J. Yan, C. A. Salman, E. Thorin, and S. Schwede, “Performance of flue gas quench and its influence on biomass fueled CHP”, *Energy*, vol. 180, pp. 934–945, 2019.
 106. C. Studies and S. Stories, “Case Studies & Success Stories”, vol. I.
 107. D. Broberg *et al.*, “PyCDT: A Python toolkit for modeling point defects in semiconductors and insulators”, *Comput. Phys. Commun.*, vol. 226, pp. 165–179, 2018.
 108. J. T. White, M. N. Fienen, and J. E. Doherty, “A python framework for environmental model uncertainty analysis”, *Environ. Model. Softw.*, vol. 85, pp. 217–228, 2016.
 109. C. R. Severance, “Python for Everybody | Trinket”, p. 245, 2018.
 110. O. Svedovs, M. Dzikevics, V. Kirsanovs, and I. Veidenbergs, “Development of New Compact Water Treatment System for Flue-Gas Condenser for Households”, *Environ. Clim. Technol.*, vol. 25, no. 1, pp. 563–573, 2021.
 111. O. Švedovs, M. Dzikēvičs, and V. Kirsanovs, “Methods for Determining the Performance and Efficiency Parameters of the Flue-gas Condenser Sedimentation Tank”, vol. 24, no. 2, pp. 337–347, 2020.
 112. ISO, “LVS EN 9096:2018”, *Starptautisks standarts*, 2018. [Online]. Available: <https://www.lvs.lv/lv/products/preview/137324>. [Accessed: 06-Apr-2018].
 113. V. Kostevica, “Sprauslu darbības analīze”, *Bakal. darbs*, 2018.
 114. D. Wunsch, “Theoretical and numerical study of collision and coalescence-Statistical modeling approaches in gas-droplet turbulent flows”, 2009.
 115. C. Magono and T. Nakamura, “On the Behavior with of Water a Large Droplets Water during Drop Collision”, 1959.
 116. J. Monteith L. and M. Unsworth H., *Principles of Environmental Physics*, Fourth Edi. Elsevier Ltd, 2013.
 117. Neutrium, “Terminal Velocity of Particles for Gravity Separation”, 2013. [Online]. Available: <https://neutrium.net/unit-operations/terminal-velocity-of-particles-for-gravity-separation/>.
 118. R. Flagan C. and J. Seinfeld H., *FUNDAMENTALS OF AIR POLLUTION ENGINEERING*. Mineola New York: Dover Publications Inc., 2012.
 119. N. S. Cheng, “Comparison of formulas for drag coefficient and settling velocity of spherical particles”, *Powder Technol.*, vol. 189, no. 3, pp. 395–398, 2009.
 120. H. Yang, M. Fan, A. Liu, and L. Dong, “General formulas for drag coefficient and settling velocity of sphere based on theoretical law”, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 2, pp. 219–223, 2015.

121. F. A. (Michigan T. U. Morrison, “Data Correlation for Drag Coefficient for Sphere”, vol. 6, no. 1955, pp. 1–2, 2006.
122. M. I. Shilyaev and E. M. Khromova, “Modeling of Heat and Mass Transfer and Absorption-Condensation Dust and Gas Cleaning in Jet Scrubbers”, *Intech*, vol. Chapter 7, p. 33, 2013.
123. D. D. Joseph, “Potential flow of viscous fluids: Historical notes”, *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 32, no. 3, pp. 285–310, 2006.
124. A. O. Sæbø, R. Wighus, and R. Wighus, “Droplet sizes from deluge nozzles”.
125. F. Ahmad and R. K. Jain, “An Experimental Study of Parameters of Wet Scrubber for Environmental Benefit”, *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 6, pp. 9675–9680, 2016.
126. B. A. Danzomo, M. E. Salami, S. Jibrin, and I. M. Nor, “Performance Evaluation of wet scrubber system for industrial air pollution control”, *ARPJ. Eng. Appl. Sci.*, vol. 7, no. 12, pp. 1669–1677, 2012.
127. D. Blumberga and I. Veidenbergs, *Tehnoloģisko gāzu attīrīšana un dzesēšana*. Rīga: Latvijas Universitāte, 1990.
128. W. Licht, *Air Pollution Control Engineering: Basic Calculations for Particulate Collection*, 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1988.
129. A. Rahimi and A. Bakhshi, “A Simple One-Dimensional Model for Investigation of Heat and Mass Transfer Effects on Removal Efficiency of Particulate Matters in a Venturi Scrubber”, *Iran. J. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 3–14, 2009.
130. M. S. El-Morsi, “Optimization of direct contact spray coolers”, 2002.
131. S. Zheng, F. Eimann, C. Philipp, T. Fieback, and U. Gross, “Modeling of heat and mass transfer for dropwise condensation of moist air and the experimental validation”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 120, pp. 879–894, 2018.
132. Р. И. Эстеркин, “Теплотехнические измерения при сжигании газового и жидкого топлива ... - Рахмиель Иосифович Эстеркин - Google grāmatas”, 1981. [Online]. Available:
<https://books.google.lv/books?id=L11mGwAACAkJ&dq=inauthor:%22Рахмиель+Иосифович+Эстеркин%22&hl=lv&sa=X&ved=0ahUKewjJ4dmzqYzaAhVBqi>.
 [Accessed: 27-Mar-2018].
133. V.-M. Tapani, “Experimental Optimization and Response Surfaces”, *Chemom. Pract. Appl.*, 2012.

PIELIKUMI

Modeļa ievaddatu aprēķina datne

Ievaddati (var mainīt sākumā)				Avots	
1.	Dūmgāzu temperatūra (ievadā)	t_{g0}		°C	Eksperimenti
2.	Ūdens pilienu diametrs	d_{d0}		m	Eksperimenti
3.	Aparāta augstums	H	0.6	m	Konstruktīvais
4.	Dūmgāzu mitruma saturs	ω_0		kg/kg _{s.g.}	Degšanas aprēķins
5.	Cietās daļiņas diametrs	d_p	0.0001	m	Pieņemts
6.	Ūdens temperatūra gāzes ievadā (ūdens izvadā, apakšā)	$t_{w2} = t_{s2}$		°C	Salīdzinājumam no eksperimenta
7.	Ūdens temperatūra gāzes izvadā (augšā)	$t_w(t_d) = t_s$		°C	Sākuma temperatūra (tiekas uz šo)
8.	Dūmgāzu ātrums (uz ievades apstākļiem!)	u_{g0}	0.1504	m/s	Eksp. datu pārrēķins uz t_{g0}
9.	Cieto daļiņu koncentrācija (pirms MA, vidējais)	C_{p0}		mg/nm ³	Eksperimenti
10.	Mitru dūmgāzu masas plūsma	m_{g0}		kg/s	Degšanas aprēķins
11.	Sausu dūmgāzu masas plūsma	m_{dg}		kg/s	Degšanas aprēķins
12.	Ūdens tvaika masas plūsma	m_{v0}		kg/s	Degšanas aprēķins
13.	Iesmidzināmā ūdens daudzums	V_{w0}		kg/s	Eksperimenti
14.	Degšanai nepieciešamā gaisa masas plūsma	m_a	-0.00404328034079912	kg/s	Degšanas aprēķins
15.	CO ₂ masas plūsma stehiometriskos apstākļos	m_{CO_2}	0.00120443617517593	kg/s	Degšanas aprēķins
16.	Slāpekļa masas plūsma stehiometriskos apstākļos	m_{N_2}	0.00309112140993967	kg/s	Degšanas aprēķins
17.	Sausas gāzes plūsma	V_{dg}		m ³ /s	Degšanas aprēķins
18.	Tvaika plūsma	V_v		m ³ /s	Degšanas aprēķins
19.	Reinoldsas kritērijs	Re_0	150.0	-	Pieņemts
21.	Gāzu tilpums	V_{g0}		m ³ /s	Degšanas aprēķins
22.	Katla jauda	N	10.0	kW	Eksperimenti
23.	Iekārtas augstuma izmaiņas solis	ΔZ	0.01	m	Pieņemts
24.	Gaisa patēriņa koeficients uz kg kurināmā	α_{gais}		-	Degšanas aprēķins
25.	Degšanai nepieciešamā gaisa plūsma	V_a	0.00312705362784155	m ³ /s	Degšanas aprēķins
26.	Degšanai nepieciešamā slāpekļa plūsma	V_{N_2}	0.00247092039163843	m ³ /s	Degšanas aprēķins
27.	Degšanai nepieciešamā CO ₂ plūsma	V_{CO_2}	0.00060312277174558	m ³ /s	Degšanas aprēķins
	Pilienu skaits aparātā	nsk	#DIV/0!	gab.	Aprēķins, salīdzinājumam
	Dūmgāzu piesātinājuma temperatūra	t_{beigu}		°C	Salīdzinājumam no eksperimenta
Nr.	Nosaukums	Apz.	Vērtība	Mērv.	

Modeļa ievaddatu datne

```

input - Notepad
File Edit Format View Help
#
#
#
#
#
#
dZ = 0.01                #Elementa izmērs (m)

# Konstantes

H=0.6                    # Katla augstums (m)
Mco2=44.01               # CO2 molmasa
Mn2=28.02                # N2 molmasa
Mv=18.0                  # H2O molmasa
R=8314                   # Gāzu konstate
g=9.81                   # Gravitācijas paātrinājums

# Ciklā NE-iesaistītie lielumi

mw=0.0277777777777778  #sensora dati - ūdens tilpums
mdg=0.0132371262485451 #sensora dati - sausu gāzu masas plūsma
mv=0.00127841628373328 #sensora dati - tvaika masas plūsma
mco2=0.00243595809964169 #sensora dati - CO2 masas plūsma
mn2=0.00625175695542231 #sensora dati - N2 masas plūsma
ma=0.00327099490974786 #sensora dati - gaisa masas plūsma
Vco2=0.00180067007866305 #sensora dati - CO2 tilpums
Vdg=0.0129122206463811 #sensora dati - sausu gāzu tilpums
Vn2=0.00737712556119263 #sensora dati - N2 tilpums
Va=0.00933606251631345 #sensora dati - gaisa tilpums
alpha=1.40               #sensora dati - gaisa patēriņa koeficients
Vv=0.00234724619733071 #sensora dati - tvaika tilpums
p=101325                 #sensora dati - atmosfēras spiediens
dp=0.0001                #sensora dati - cietās daļiņas diametrs
Rop=150.0                #sensora dati - cietās daļiņas blīvums

# Ciklā iesaistītie lielumi

tg0=130.0                #sensora dati - ieejas gāzu temperatūra
tw0=54.1                 #sensora dati - ieejas ūdens temperatūra
dd0=0.0005               #sensora dati - ieejas piliena diametrs
w0=0.106902524393934    #sensora dati - ieejas gāzu mitruma saturs
mg0=0.0119587099648119 #sensora dati - ieejas gāzu masa
ug0=0.247818324196287   #sensora dati - ieejas gāzes plūsmas ātrums
Cp0=36.1679244232884    #sensora dati - ieejas cieto daļiņu koncentrācija
Vg0=0.0152594668437118 #sensora dati - ieejas gāzu tilpums

```


Programmas izpildes logs

```
54.09998825769315
57.886904477500266
0.000500000001917778
915
54.100011586643774
57.88690565173095
0.0005000000079734608
916
54.09998856695547
57.886904493066574
0.0005000000019980557
917
54.10001128148133
57.886905636371026
0.0005000000078942474
918
54.09998886807241
57.88690450822289
0.0005000000020762189
919
54.10001098435627
57.88690562141565
0.00050000000781712
920
54.09998916125876
57.886904522980025
0.0005000000021523237
921
54.1000106950565
57.88690560685415
0.0005000000077420248
922
54.099989446723335
57.8869045373485
0.0005000000022264237
923
54.10001041337609
57.886905592676165
0.0005000000076689059
924
54.09998972466964
57.88690455133855
0.0005000000022985727
925
54.1000101391145
57.88690557887159
0.0005000000075977138
926
54.0999899952953
57.88690456496014
0.0005000000023688208
927
54.10000987207649
57.88690556543061
0.0005000000075283971
928

Aprekins ir veikts! Dati saglabati CSV faila!
Vai attelot grafikus? Lai attelotu, spied - Y. Lai izlaistu - N. Un ENTER!
```

4. pielikums

Modeļa aprēķinātie dati konvertēti no csv formātā

Z	tg	dtg	tw	dtw	w	dw	dd	ddd	ud	dud	ur	cpw	Rog	pb-psat	Talpha	Cp	Vg	Vw0, kg/s
0.01	122.1607	-8.6512	40.8365	-0.9757	0.0542	-9.93E-06	3.66E-04	-5.05E-10	1.0443	8.28E-05	1.3965	4181.57	0.8739	10.1635	283.9682	2.39E-05	2.17E-02	0.0428
0.02	114.3659	-7.7948	39.8641	-0.9724	0.0538	-3.96E-04	3.66E-04	-2.01E-08	1.0844	8.15E-05	1.4367	4181.61	0.8935	416.3507	288.4257	2.35E-05	2.17E-02	
0.03	107.2427	-7.1232	38.8912	-0.9728	0.0531	-7.10E-04	3.66E-04	-3.61E-08	1.0894	8.28E-05	1.4416	4181.66	0.9120	750.2060	287.1240	2.30E-05	2.17E-02	
0.04	100.7230	-6.5197	37.9245	-0.9667	0.0522	-9.65E-04	3.66E-04	-4.91E-08	1.0935	8.40E-05	1.4458	4181.71	0.9298	1023.6817	286.0111	2.26E-05	2.17E-02	
0.05	94.7466	-5.9764	36.9697	-0.9548	0.0510	-1.17E-03	3.66E-04	-5.93E-08	1.0970	8.53E-05	1.4492	4181.78	0.9469	1243.0258	285.0591	2.23E-05	2.16E-02	
0.06	89.2603	-5.4862	36.0319	-0.9378	0.0497	-1.32E-03	3.66E-04	-6.73E-08	1.0998	8.65E-05	1.4521	4181.84	0.9633	1414.1544	284.2435	2.19E-05	2.16E-02	
0.07	84.2172	-5.0431	35.1156	-0.9163	0.0482	-1.44E-03	3.66E-04	-7.32E-08	1.1022	8.77E-05	1.4544	4181.91	0.9790	1542.6719	283.5432	2.16E-05	2.16E-02	
0.08	79.5754	-4.6418	34.2246	-0.8910	0.0467	-1.52E-03	3.66E-04	-7.73E-08	1.1041	8.89E-05	1.4563	4181.99	0.9940	1633.8683	282.9401	2.13E-05	2.16E-02	
0.09	75.2977	-4.2777	33.3620	-0.8626	0.0451	-1.57E-03	3.65E-04	-7.98E-08	1.1056	9.00E-05	1.4579	4182.06	1.0084	1692.7061	282.4187	2.11E-05	2.15E-02	
0.1	71.3509	-3.9468	32.5303	-0.8317	0.0436	-1.60E-03	3.65E-04	-8.11E-08	1.1069	9.11E-05	1.4591	4182.14	1.0221	1723.8034	281.9658	2.09E-05	2.15E-02	
0.11	67.7055	-3.6454	31.7314	-0.7989	0.0420	-1.60E-03	3.65E-04	-8.13E-08	1.1078	9.21E-05	1.4600	4182.21	1.0351	1731.4185	281.5703	2.06E-05	2.15E-02	
0.12	64.3349	-3.3706	30.9667	-0.7647	0.0404	-1.58E-03	3.65E-04	-8.06E-08	1.1085	9.32E-05	1.4608	4182.28	1.0475	1719.4393	281.2227	2.04E-05	2.14E-02	
0.13	61.2155	-3.1194	30.2371	-0.7296	0.0388	-1.56E-03	3.65E-04	-7.91E-08	1.1091	9.41E-05	1.4613	4182.35	1.0593	1691.3794	280.9150	2.02E-05	2.14E-02	
0.14	58.3259	-2.8896	29.5429	-0.6941	0.0373	-1.52E-03	3.65E-04	-7.71E-08	1.1095	9.51E-05	1.4617	4182.42	1.0705	1650.3807	280.6406	2.01E-05	2.14E-02	
0.15	55.6469	-2.6789	28.8844	-0.6585	0.0358	-1.47E-03	3.65E-04	-7.46E-08	1.1098	9.60E-05	1.4620	4182.48	1.0812	1599.2225	280.3939	1.99E-05	2.14E-02	
0.16	53.1614	-2.4855	28.2612	-0.6232	0.0344	-1.41E-03	3.65E-04	-7.18E-08	1.1099	9.68E-05	1.4622	4182.54	1.0912	1540.3371	280.1704	1.97E-05	2.13E-02	
0.17	50.8537	-2.3077	27.6727	-0.5885	0.0331	-1.35E-03	3.65E-04	-6.87E-08	1.1100	9.77E-05	1.4623	4182.60	1.1007	1475.8293	279.9662	1.96E-05	2.13E-02	
0.18	48.7098	-2.1439	27.1182	-0.5545	0.0318	-1.28E-03	3.65E-04	-6.54E-08	1.1100	9.84E-05	1.4623	4182.65	1.1097	1407.4995	279.7782	1.95E-05	2.13E-02	
0.19	46.7169	-1.9929	26.5967	-0.5215	0.0306	-1.22E-03	3.65E-04	-6.21E-08	1.1100	9.92E-05	1.4622	4182.70	1.1182	1336.8693	279.6039	1.94E-05	2.13E-02	
0.2	44.8634	-1.8535	26.1071	-0.4896	0.0294	-1.15E-03	3.65E-04	-5.87E-08	1.1099	9.99E-05	1.4622	4182.75	1.1262	1265.2077	279.4412	1.92E-05	2.13E-02	
0.21	43.1387	-1.7246	25.6482	-0.4589	0.0283	-1.08E-03	3.65E-04	-5.53E-08	1.1098	1.01E-04	1.4621	4182.79	1.1337	1193.5583	279.2886	1.91E-05	2.12E-02	
0.22	41.5333	-1.6054	25.2186	-0.4296	0.0273	-1.02E-03	3.65E-04	-5.20E-08	1.1097	1.01E-04	1.4620	4182.83	1.1408	1122.7654	279.1446	1.90E-05	2.12E-02	
0.23	40.0385	-1.4949	24.8170	-0.4016	0.0264	-9.56E-04	3.65E-04	-4.87E-08	1.1096	1.02E-04	1.4618	4182.87	1.1475	1053.4988	279.0082	1.90E-05	2.12E-02	
0.24	38.6460	-1.3924	24.4420	-0.3750	0.0255	-8.94E-04	3.64E-04	-4.56E-08	1.1094	1.02E-04	1.4617	4182.90	1.1538	986.2776	278.8787	1.89E-05	2.12E-02	
0.25	37.3487	-1.2973	24.0922	-0.3498	0.0246	-8.34E-04	3.64E-04	-4.25E-08	1.1093	1.03E-04	1.4615	4182.93	1.1597	921.4919	278.7552	1.88E-05	2.12E-02	
0.26	36.1397	-1.2090	23.7663	-0.3260	0.0239	-7.77E-04	3.64E-04	-3.97E-08	1.1091	1.03E-04	1.4614	4182.96	1.1653	859.4225	278.6374	1.87E-05	2.12E-02	
0.27	35.0129	-1.1269	23.4627	-0.3035	0.0231	-7.23E-04	3.64E-04	-3.72E-08	1.1090	1.04E-04	1.4612	4182.99	1.1705	800.2588	278.5247	1.87E-05	2.12E-02	
0.28	33.9624	-1.0505	23.1803	-0.2824	0.0225	-6.72E-04	3.64E-04	-3.43E-08	1.1088	1.04E-04	1.4611	4183.01	1.1754	744.1142	278.4169	1.86E-05	2.12E-02	
0.29	32.9830	-0.9794	22.9177	-0.2626	0.0218	-6.24E-04	3.64E-04	-3.18E-08	1.1087	1.05E-04	1.4609	4183.03	1.1800	691.0403	278.3137	1.85E-05	2.11E-02	
0.3	32.0698	-0.9132	22.6737	-0.2440	0.0213	-5.78E-04	3.64E-04	-2.95E-08	1.1085	1.05E-04	1.4608	4183.05	1.1843	641.0387	278.2148	1.85E-05	2.11E-02	
0.31	31.2183	-0.8515	22.4471	-0.2266	0.0207	-5.35E-04	3.64E-04	-2.73E-08	1.1084	1.05E-04	1.4606	4183.07	1.1884	594.0715	278.1202	1.84E-05	2.11E-02	
0.32	30.4242	-0.7941	22.2367	-0.2104	0.0202	-4.96E-04	3.64E-04	-2.53E-08	1.1083	1.06E-04	1.4605	4183.09	1.1921	550.0696	278.0296	1.84E-05	2.11E-02	
0.33	29.6837	-0.7405	22.0414	-0.1953	0.0198	-4.58E-04	3.64E-04	-2.34E-08	1.1081	1.06E-04	1.4604	4183.11	1.1957	508.9407	277.9430	1.83E-05	2.11E-02	
0.34	28.9932	-0.6905	21.8603	-0.1811	0.0193	-4.23E-04	3.64E-04	-2.16E-08	1.1080	1.06E-04	1.4602	4183.12	1.1990	470.5755	277.8602	1.83E-05	2.11E-02	
0.35	28.3492	-0.6440	21.6923	-0.1680	0.0190	-3.91E-04	3.64E-04	-2.00E-08	1.1079	1.07E-04	1.4601	4183.13	1.2021	434.8523	277.7810	1.82E-05	2.11E-02	
0.36	27.7487	-0.6005	21.5365	-0.1558	0.0186	-3.61E-04	3.64E-04	-1.84E-08	1.1078	1.07E-04	1.4600	4183.14	1.2050	401.6419	277.7055	1.82E-05	2.11E-02	
0.37	27.1887	-0.5600	21.3921	-0.1444	0.0183	-3.33E-04	3.64E-04	-1.70E-08	1.1077	1.07E-04	1.4599	4183.15	1.2077	370.8107	277.6335	1.82E-05	2.11E-02	
0.38	26.6666	-0.5221	21.2583	-0.1338	0.0180	-3.07E-04	3.64E-04	-1.57E-08	1.1076	1.07E-04	1.4598	4183.16	1.2103	342.2233	277.5648	1.81E-05	2.11E-02	
0.39	26.1798	-0.4868	21.1343	-0.1240	0.0177	-2.83E-04	3.64E-04	-1.45E-08	1.1075	1.08E-04	1.4597	4183.17	1.2126	315.7450	277.4995	1.81E-05	2.11E-02	
0.4	25.7259	-0.4539	21.0195	-0.1149	0.0174	-2.61E-04	3.64E-04	-1.33E-08	1.1074	1.08E-04	1.4596	4183.18	1.2148	291.2436	277.4374	1.81E-05	2.11E-02	
0.41	25.3027	-0.4232	20.9130	-0.1064	0.0172	-2.41E-04	3.64E-04	-1.23E-08	1.1073	1.08E-04	1.4596	4183.19	1.2169	268.5902	277.3783	1.81E-05	2.11E-02	
0.42	24.9083	-0.3945	20.8144	-0.0986	0.0169	-2.22E-04	3.64E-04	-1.13E-08	1.1073	1.08E-04	1.4595	4183.19	1.2188	247.6605	277.3223	1.80E-05	2.11E-02	
0.43	24.5406	-0.3677	20.7231	-0.0913	0.0167	-2.05E-04	3.64E-04	-1.05E-08	1.1072	1.08E-04	1.4594	4183.20	1.2206	228.3354	277.2691	1.80E-05	2.11E-02	
0.44	24.1979	-0.3427	20.6385	-0.0846	0.0166	-1.89E-04	3.64E-04	-9.64E-09	1.1071	1.09E-04	1.4594	4183.21	1.2223	210.5014	277.2188	1.80E-05	2.11E-02	
0.45	23.8785	-0.3194	20.5601	-0.0784	0.0164	-1.74E-04	3.64E-04	-8.88E-09	1.1071	1.09E-04	1.4593	4183.21	1.2239	194.0511	277.1711	1.80E-05	2.11E-02	
0.46	23.5808	-0.2977	20.4875	-0.0726	0.0162	-1.60E-04	3.64E-04	-8.19E-09	1.1070	1.09E-04	1.4592	4183.22	1.2254	178.8829	277.1260	1.80E-05	2.11E-02	
0.47	23.3035	-0.2774	20.4203	-0.0672	0.0161	-1.48E-04	3.64E-04	-7.54E-09	1.1070	1.09E-04	1.4592	4183.22	1.2267	164.9015	277.0834	1.79E-05	2.11E-02	
0.48	23.0450	-0.2584	20.3580	-0.0623	0.0159	-1.36E-04	3.64E-04	-6.95E-09	1.1069	1.09E-04	1.4591	4183.23	1.2280	152.0174	277.0431	1.79E-05	2.11E-02	
0.49	22.8043	-0.2408	20.3004	-0.0577	0.0158	-1.25E-04	3.64E-04	-6.41E-09	1.1069	1.09E-04	1.4591	4183.23	1.2292	140.1469	277.0051	1.79E-05	2.11E-02	
0.5	22.5800	-0.2243	20.2469	-0.0534	0.0157	-1.16E-04	3.64E-04	-5.91E-09	1.1068	1.09E-04	1.4591	4183.23	1.2303	129.2123	276.9693	1.79E-05	2.11E-02	
0.51	22.3710	-0.2089	20.1974	-0.0495	0.0156	-1.07E-04	3.64E-04	-5.45E-09	1.1068	1.09E-04	1.4590	4183.24	1.2313	119.1408	276.9355	1.79E-05	2.10E-02	
0.52	22.1764	-0.1946	20.1516	-0.0459	0.0155	-9.83E-05	3.64E-04	-5.02E-09	1.1068	1.09E-04	1.4590	4183.24	1.2323	109.8652	276.9037	1.79E-05	2.10E-02	
0.53	21.9952	-0.1812	20.1091	-0.0425	0.0154	-9.06E-05	3.64E-04	-4.63E-09	1.1067	1.10E-04	1.4590	4183.24	1.2332	101.3230	276.8738	1.79E-05	2.10E-02	
0.54	21.8264	-0.1688	20.0697	-0.0394	0.0153	-8.36E-05	3.64E-04	-4.27E-09	1.1067	1.10E-04	1.4589	4183.24	1.2340	93.4564	276.8456			