



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Kieto kuro katilo skaitinis modeliavimas

Baigiamojo magistro projektas

Valdas Skališius
Projekto autorius

Lekt. dr. Linas Paukštaitis
Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Kieto kuro katilo skaitinis modeliavimas

Baigiamojo magistro projektas
Termoinžinerija (6211EX023)

Valdas Skališius
Projekto autorius

Lekt. dr. Linas Paukštaitis
Vadovas

Doc. dr. Robertas Poškas
Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Valdas Skališius

Kieto kuro katilo skaitinis modeliavimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, *Valdo Skališiaus*, baigiamasis projektas tema „*Kieto kuro katilo skaitinis modeliavimas*“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(Vardas, Pavardė įrašomi ranka)

(parašas)



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Studijų programa – Termoinžinerija (6211EX023)

Bakalauro studijų baigiamojo projekto užduotis

Studentui – Valdui Skališiui

1. Baigiamojo projekto tema –

Kieto kuro katilo skaitinis modeliavimas

(Lietuvių kalba)

The Numerical Modelling of a Solid Fuel Boiler

(Anglų kalba)

2. Baigiamojo projekto tikslas ir uždaviniai –

Baigiamojo projekto tikslas – skaitiniu baigtinių tūrių metodu sumodeliuoti kietojo kuro katilo „Liepsnelė“ papildomą šilumokaitį.

Uždaviniai:

1. Sudaryti skaitinį modelį pagal patobulintą katilo konstrukciją.
2. Nustatyti proceso kraštines sąlygas.
3. Ištirti termodinaminius procesus vykstančius tokiam katile.
4. Palyginti modeliavimo rezultatus su eksperimentiniu tyrimu.

3. Pradiniai baigiamojo projekto duomenys –

Katilo brėžiniai, kraštinės sąlygos

4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos –

Baigiamasis projektas privalo atitikti jam keliamus reikalavimus

Projekto autorius

Valdas Skališius

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

2019-02-12

(data)

Baigiamojo projekto vadovas

Linas Paukštaitis

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

2019-02-12

(data)

Krypties studijų programos vadovas

Algimantas Balčius

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

2019-02-14

(data)

Skališius, Valdas. Kieto kuro katilo skaitinis modeliavimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Linas Paukštaitis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų sritis (studijų krypčių grupė), studijų kryptis: energijos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: katilas, šilumos mainai, skaitinis, greitis, temperatūra, slėgių skirtumas.

Kaunas, 2019. 50 p.

Santrauka

Baigiamajame darbe tyrimui pasirinktas kieto kuro katilo „Liepsnelė 20u“ modelis. Sukurtas skaitinis modelis ir jis patikrintas eksperimentiniais tyrimais. Darbe yra pateikiamas Ansys CFX programinio paketo aprašymas skirtas termohidrodinaminiam procesams tirti. Tyrime nustatytos pagrindinės patobulinto katilo charakteristikos: dūmų ir vandens temperatūros, greičiai, skirtingose terpės susidarantys slėgio nuostoliai dėl papildomo šilumokaičio. Tyrimas parodė silpnąsias papildomo šilumokaičio vietas, tokias kaip: mažas šilumos atidavimo koeficientas tiek vandeniui tiek iš dūmų pusės. Suformuluotos pagrindinės išvados.

Skališius, Valdas. The Numerical Modelling of a Solid Fuel Boiler. Master's Final Project / supervisor Linas Paukštaitis; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study area (study field group), study field: Energy Engineering

Key words: boiler, heat transfer, numerical, velocity, temperature, pressure drop.

Kaunas, 2019. 50 p.

Summary

"Liepsnelė 20u" model solid fuel boiler selected for the final thesis. A numerical model was created and tested by experimental research. In this work Ansys CFX software package with thermohydrodynamic processes is described. The main characteristics of the improved boiler were determined in the study: flue gas and water temperatures, velocities, pressure losses due to additional heat exchanger in different fluids. The study showed weak areas of an additional heat exchanger such as: low heat transfer coefficient both with water and flue gas. Key conclusions were formulated.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Literatūros analizė.....	11
1.1. Šilumokaičių klasifikacija ir tiriamas katilas	11
1.2. Dūmavamzdžių katilai.....	12
1.3. Biokuro katilo naudingumo koeficientas.....	14
1.4. Šilumos nuostoliai su išeinančiais dūmais	14
1.5. Šilumos nuostoliai atsiradę dėl nesudegusių cheminių medžiagų.....	15
1.6. Šilumos nuostoliai gaunami dėl pelenų.....	16
1.7. Šilumos nuostoliai gaunami dėl spinduliavimo.....	16
1.8. Kieto kuro katilų skaitiniai tyrimai.....	17
1.9. Katilo eksperimentinis tyrimas.....	20
1.10. Literatūros apibendrinimas.....	21
2. Tyrimo metodika	22
2.1. Ansys CFX matematinės lygtys	22
2.2. Katilo modelis ir kraštinės sąlygos.....	24
2.3. Tyrimo metodikos apibendrinimas.....	28
3. Rezultatų analizė	29
3.1. Įrenginio galios nustatymas.....	29
3.2. Kuro savybių nustatymas	29
3.3. Teorinio oro kiekio skaičiavimas malkoms.....	30
3.4. Katilo galios skaičiavimas.....	31
3.5. Oro reikalingo katilo degimui skaičiavimas.....	31
3.6. Dūmų kiekio skaičiavimas	32
3.7. Katilo šilumos balansas tiesioginiu ir atvirkštiniu būdais	33
3.8. Degimo produktų ir vandens temperatūra	34
3.9. Degimo produktų ir vandens greičiai	39
3.10. Slėgio nuostoliai degimo produktų ir vandens traktuose	42
3.11. Metalų temperatūra ir šilumos atidavimo koeficientas	45
3.12. Rezultatų apibendrinimas	47
4. Išvados	48
5. Literatūra	49

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Dūmų kiekiai ir temperatūros dūmtakyje įvairiuose katilo režimuose	32
2 lentelė. Katilo naudingumas	34
3 lentelė. Rezultatų patikra	47

Paveikslų sąrašas

1 pav. Viršutinio degimo katilo principinė schema.....	12
2 pav. Dūmavamzdžio katilo principinė schema.....	13
3 pav. Bendras dūmavamzdžio katilo vaizdas.....	13
4 pav. Katilo bendrasis vaizdas ir jo skaitinis modelis [3].....	17
5 pav. Skaitinis tinklelis	18
6 pav. Greičių vektoriai, katilą apskaičiavus baigtinių tūrių metodu	19
7 pav. Temperatūrų ir greičio profiliai supaprastintame modelyje	19
8 pav. Katilo „L20u Liepsnelė“ bendrasis vaizdas.....	20
9 pav. „L-20u“ katilo tyrimo sistema ir parametrų matavimo portalų vietos.....	21
10 pav. Katilo „Liepsnelė“ pagrindiniai matmenys.....	24
11 pav. Katilo vaizdas iš viršaus	24
12 pav. Katilo vandens talpos brėžiniai Solidworks (a.) ir Ansys CFX (b) terpėje	25
13 pav. Katilo vandens talpos skaitinis tinklelis.....	26
14 pav. Tinklelis hidrodinaminiam pasienio sluoksniui.....	26
15 pav. Pagrindiniai CFX modulio elementai	27
16 pav. Degimo produktų kraštinių sąlygų ir turbulencijos modelio parinkimas	28
17 pav. Vandens kraštinių sąlygų ir turbulencijos modelio parinkimas.....	28
18 pav. Degimo produktų temperatūra katile ir įtekėjime į vandens talpą.....	35
19 pav. Degimo produktų temperatūra vandens talpos vamzdžiuose	36
20 pav. Vandens temperatūra talpoje	37
21 pav. Vandens temperatūra talpoje, įtekėjimo zona.....	38
22 pav. Vandens temperatūros stratifikacija pagal vandens talpos aukštį.....	38
23 pav. Vandens pašilimo ir dūmų ataušimas priklausomai nuo dūmų pradinės temperatūros.....	39
24 pav. Degimo produktų greitis katile ir įtekėjime į vandens talpą.....	40
25 pav. Degimo produktų greitis vandens talpos vamzdžiuose	40
26 pav. Vandens greitis katilo vandens talpoje	41
27 pav. Vandens greitis katile ir įtekėjime į vandens talpą	42
28 pav. Degimo produktų slėgio nuostoliai katile ir įtekėjime į vandens talpą.....	43
29 pav. Degimo produktų slėgio nuostoliai katilo vandens talpos vamzdžiuose	43
30 pav. Vandens slėgio nuostoliai katile	44
31 pav. Vandens slėgio nuostoliai įtekėjime į vandens talpą.	44
32 pav. Metalų skiriančio degimo produktus ir vandenį temperatūros kitimas.....	45
33 pav. Šilumos atidavimo koeficientas nuo dūmų metalui.....	46
34 pav. Šilumos atidavimo koeficientas nuo metalo vandeniui	46

Įvadas

Europos Sąjungos keliami reikalavimai aplinkosauginiams katilų reikalavimas griežtėja nuolatos. Esami maži buitiniai katilai retai užtikrina šiuos reikalavimus, todėl būtina tokių katilų modernizacija ir optimizavimas. Siekiant padidinti katilų naudingumą ar optimizuojant šilumos mainus juose galime pasinaudoti kompiuterinėmis programomis, kurios įgalina spręsti hidrodinamikos lygtys sujungiant jas su šilumos mainais. Gauti rezultatai leidžia pamatyti ir geriau įsivaizduoti tai kas vyksta su fluidu katile. Vienas iš tokių katilų yra gaminamas Lietuvoje įmonės „Vakaro rasa“. Šio tipo katilai yra viršutinio degimo katilai. Jie pasižymi ilgu pakuros degimo laiku, gali deginti praktiškai bet kokią kietą kurą, tačiau žalingų degimo produktų juose susidaro ypač daug. Taip pat dūmai išeina palyginti karšti ir nėra panaudojama šių dūmų temperatūra.

Baigiamajame darbe tyrimui pasirinktas kieto kuro katilo „Liepsnelė 20u“ modelis. Su šiuo modeliu KTU Šilumos ir atomo energetikos degimo laboratorijoje buvo atliekami optimizavimo eksperimentiniai tyrimai, labiau orientuoti ne į termohidrodinamiką, bet į aplinkosauginius klausimus. Šių tyrimų metu gauti rezultatai yra panaudojami skaitinio modelio kūrimo bei skaičiavimuose. Be to sprendžiant aplinkosauginius klausimus iškilo eilė klausimų būtent su katilo termohidrodinamika, bei jame patalpintu papildomu šilumokaičiu, kuris leido sumažinti išmetamų dūmų temperatūrą.

Darbe yra pateikiamas Ansys CFX programinio paketo aprašymas skirtas termohidrodinaminiam procesams tirti. Gauti skaitinio tyrimo rezultatai palyginami su eksperimentiniais duomenimis.

Tyrime nustatytos pagrindinės patobulinto viršutinio degimo katilo charakteristikos: dūmų ir vandens temperatūros, greičiai, skirtingose terpės susidarantys slėgio nuostoliai dėl papildomo šilumokaičio. Tyrimas parodė silpnąsias papildomo šilumokaičio vietas, tokias kaip: mažas šilumos atidavimo koeficientas tiek vandeniui tiek iš dūmų pusės. Suformuluotos pagrindinės išvados.

1. Literatūros analizė

Literatūros analizėje apžvelgiami katilai ir juose vykstantys procesai bei kitų mokslininkų vykdyti tyrimai. Kietojo kuro katilo naudingumo koeficientas susideda iš keturių dalių: šilumos nuostolių su išeinančiais dūmais, šilumos nuostoliai dėl cheminio kuro nesudegimo, šilumos nuostoliai su pelenais ir šilumos nuostoliai į aplinką per katilo sieneles. Pateiktos katilų modeliavimo bendrosios gairės.

1.1. Šilumokaičių klasifikacija ir tiriamas katilas

Pagal veikimo principą šilumokaičiai yra skirstomi į regeneracinius, rekuperacinius ir maišymosi šilumokaičius.

Regeneraciniai šilumokaičiai – tai tokie įrenginiai, kuriuose tas pats paviršius apiplaunamas skirtingos temperatūros šilumnešiais.

Rekuperaciniai įrenginiai tai šilumokaičiai, kuriuose šiluma perduodama per sienelę nuo šildančiojo šilumnešio šildomajam.

Maišymosi tipo šilumokaičiuose šiluma perduodama šilumnešiams betarpiškai maišantis tarpusavyje.

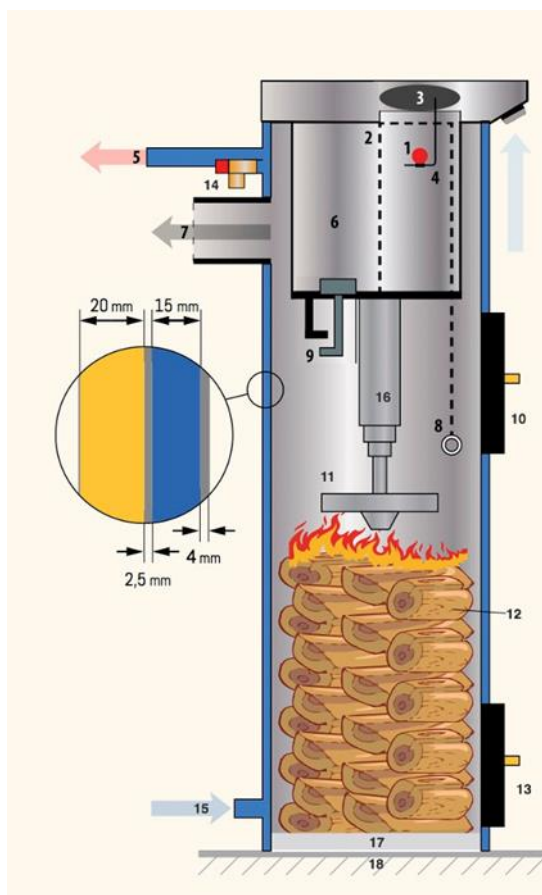
Katilų gali būti įvairių, žemiau pateikiamas viršutinio degimo, kieto kuro katilo „LIEPSNELĖ“ bendras aprašymas ir charakteristika. Šiame katile įgyvendintas vertikalus degimo principas yra kuro degimas iš viršaus į apačią, dega tik viršutinis kuro sluoksnis, o ne visa pakura, kaip kituose katiluose. Šio tipo katilas naudoja teleskopinį oro padavimo būdą, kurio pagalba kuro degimo procesas viso degimo eigoje yra kontroliuojamas.

Katilai „LIEPSNELĖ“ atitinka visus standartus ir tarptautinius reikalavimus, dėl šios priežasties katilai LIEPSNELĖ yra žinomi daugiau nei 20-yje valstybių, tačiau griežtėjant išmetamų dujų normoms šio katilo tobulinimas yra būtinas.

Katilas „LIEPSNELĖ“ gaminamas dviejų tipų (malkinis ir universalus) ir trijų galingumų 10 kW, 20 kW, ir 40 kW. Katilai „LIEPSNELĖ“ gali apšildyti tiek gyvenamąsias, tiek gamybines, tiek kitos paskirties patalpas nuo 50 m² iki 400 m² šildomo ploto [1].

Tokio tipo katilo ypatumai:

- Kuras: malkos, įvairūs pjuvenų briketai, pjuvenos, medienos atliekos.
- ilgas vienos įkrovos degimo laikas (malkomis iki 30 val., o akmens anglimi iki 7 parų, šalčiausiomis žiemos dienomis).
- labai kompaktiškas (katilinėje užima iki 1m²).
- aukštas NVK (naudingo veikimo koeficientas), kuris siekia iki 91%.
- paprasta konstrukcija ir lengvas aptarnavimas.
- minimali automatika.
- gražus dizainas.
- maža kaina.



1 pav. Viršutinio degimo katilo principinė schema [1]

1 Termostatinis oro traukos reguliatorius. 2. Trosų pakėlimo sistema. 3. Oro sklendė su oro įputimo kolektoriumi. 4. Traukos reguliatoriaus kojėlė (strypelis). 5. Pašildyto vandens mova. 6. Oro pašildymo kamera. 7. Dūmų šalinimo anga. 8. Oro skirstytuvo pakėlimo trosas. 9. Užtvaros (malkos/anglis) perjungimo rankena, įrengta už oro padavimo vamzdžio. (tik universaliuose katiluose) 10. Kuro pakrovimo durelės. 11. Oro skirstytuvas. 12. Kuras. 13. Pelenų šalinimo durelės. 14. Apsauginis vožtuvas. 15. Grįžtančio vandens mova. 16. Oro padavimo vamzdis (teleskopinis). 17. Montuojant katilą, įliejamas betoninis dugnas. 18. Betoninės, ar kitos karščiui atsparios grindys.

1.2. Dūmavamzdžių katilai

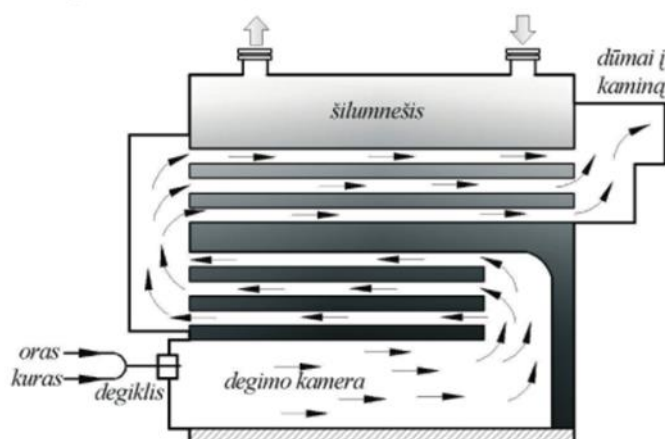
Kietojo kuro katilai yra slėginiai indai, naudojami vandens šildymui arba garo gamybai siekiant aprūpinti įvairių pramonės šakų energetinius įrenginius, o taip pat gaminti elektros energiją garo turbinomis.

Kadangi standartinis viršutinio degimo katilas neturi šilumokaičio, o tiriamame objekte sumontuotas papildomas dūmavamzdis šilumokaitis tai trumpai apžvelgsiu tokius katilus.

Katilas paprastai naudojamas garo gamyboje ir sistemų šildymo procesuose. Šiluminės jėgainės katilus naudoja elektrai gaminti. Vis dar, didelė dalis pasaulio energijos suvartojimo pagaminama kieto kuro katiluose. Tipinis katilo energetinis efektyvumas siekia 75-90%, o likusi dalis energijos prarandama į aplinką ar nesudegant pilnai kurui. Norint įvertinti katilo efektyvumą ir šilumos kiekį, kuris yra prarandamas iš katilo yra atliekami energetiniai auditai. Auditai padeda kiekybiškai įvertinti

dėl atskirų procesų prarastą šilumos kiekį ar nustatyti galimą šilumos nuostolių vietas. Katilo efektyvumą galima pagerinti taikant įvairias priemones, kaip vienas iš jų yra skaitiniai metodai.

Didžioji dalis katilų yra dūmavamzdžiai katilai. Tokiuose katiluose degimo metu išsiskiriantys dūmai teka vamzdžių vidumi, o vamzdžių išorė aušinama vandeniu, kuris tiekiamas į šildymo sistemą ar perkaitintuvus. Principinė kietojo kuro dūmavamzdžio katilo schema pavaizduota 2 paveiksle.



2 pav. Dūmavamzdžio katilo principinė schema [2]

2 paveiksle pavaizduotas trijų ejų katilas. Dūmai katilo viduje teka keisdami kryptį tris kartus. Degimo kameroje sumaišomas kuras su oru, kuris dega ir susidaro degimo produktai. Dūmai teka dūmų vamzdžiais ir perduoda šilumą vandeniui taip atvėsdami. Dūmų temperatūra priklauso nuo kelių aspektų: medžiagos iš kurios pagaminti vamzdžiai, temperatūrų skirtumo tarp dūmų ir vandens, dūmų vamzdžių paviršiaus ploto, dūmų tekėjimo greičio ir t.t. Katile esančius elementus gaubia metalinis korpusas. Tokio tipo katilo viduje būna nemažas kiekis vandens, todėl jis veikia kaip šilumos akumuliatorius. Pasikeitus šilumos poreikiui, vandens parametrai kinta lėtai. Ši savybė gali būti ir teigiama ir neigiama, priklauso nuo to kokio tipo vartotojui tiekiamą šilumą. Bendras šio tipo katilo vaizdas pateiktas 2 paveiksle [2].



3 pav. Bendras dūmavamzdžio katilo vaizdas [3]

Dūmavamzdžiai katilai būna dviejų tipų: su galine „sausą“ arba „drėgna“ dalimi. Su „sausą“ galine dalimi už katilo korpuso yra įrengiama dūmų tekėjimo kryptį keičianti kamera, tam kad dūmai kurie išsiskyrė iš degimo kameros galėtų pakeisti savo kryptį ir patektų į dūmų vamzdžius. Ši kamera yra išklota šilumą atspindinčia medžiaga. Tokia kamera atpigina ir palengvina katilo aptarnavimą, nes galima katilo dalis išvalyti iš abiejų pusių.

Su „drėgna“ galine dalimi kryptį keičianti kamera yra korpuso dalis. Vanduo ją apiplauna, o ji yra šilumos perdavimo paviršius, todėl nereikia šilumą atspindinčių paviršių, kuriuos būtina prižiūrėti. Vidinį katilo paviršių yra sunku prižiūrėti ir tai brangesnis procesas.

Dūmavamzdžiai katilai gaminami skirtingo galingumo, jis gali siekti iki 11MW. Galingi katilai retai naudojami galingose šilumos sistemose. Didinant galią reikalingi storesni paviršiai, dėl šios priežasties katilai tampa sunkesni ir brangesni.

Dūmavamzdžiai katilai už kitus katilus yra pranašesni, nes jie yra kompaktiški ir užima mažiau vietos, taip pat yra pigesni. Šie katilai yra patikimi, nes dažniausiai juos lengviau prižiūrėti, bet kai kurių tipų katilų dėl jų kompaktiškumo yra sunku išvalyti vidinius elementus. [3]

1.3. Biokuro katilo naudingumo koeficientas

Pagrindinis katilų statybos, eksploatavimo ir optimizacijos tikslas yra maksimaliai panaudoti kuro energiją ir pagamintą šilumą bei didinti įrangos efektyvumą. Tai taikoma tiek didžiųjų elektrinių katilams, tiek ir nedideliems katilams. Efektyvumas tapo svarbiu, nes padidėjo įvairių biokuro ar jų mišinių su anglimi ar kitomis kuro rūšimis naudojimas. Kuro fizikinių ir cheminių savybių atskyrimas gali apsunkinti katilo veiklą, todėl būtina pritaikyti katilą įvairiems kurams, siekiant išlaikyti jų našumą, galingumą ir efektyvumą. [4]

Katilų efektyvumą galima nustatyti tiesioginiais ar netiesioginiais būdais. Netiesioginiu metodu - energijos vartojimo efektyvumas yra apskaičiuojamas katilo energijos balanso lygtimi ir apskaičiuojamas taip:

$$\eta_b = 1 - \sum_i S_i \quad (1)$$

kur: η_b - šilumos nuostoliai; S_i suminiai šilumos nuostoliai (su išeinančiais dūmais, dėl cheminio nesudegimo, šilumos nuostoliai su pelenais, šilumos nuostoliai į aplinką) apibrėžiami kaip tam tikro nuostolio absoliutinės vertės koeficiento santykis su kuro grynąja šilumine verte. [5]

1.4. Šilumos nuostoliai su išeinančiais dūmais

Nuostoliai dėl išeinančių dūmų priklauso nuo kuro sudėties, dūmų temperatūros išėjimo vietoje, deguonies kiekio dūmuose ir kuro žemutinės degimo šilumos.

Šilumos nuostoliai nuo kuro sudėties susideda iš pašildyto oro, azoto, triatomųjų dujų ir vandens garo šiluminių nuostolių. [6]

Nuostoliai dėl pašildyto oro skaičiuojami pagal (2) formulę:

$$Q_{O_2} = V_0^t \cdot C_{p_{O_2}} \cdot \Delta t_{i\bar{s}} \text{ kJ}; \quad (2)$$

kur:

V_0^t - kiek reikia oro norint sudeginti 1 kg kuro, m^3/kg ;

$C_{p_{O_2}}$ - deguonies specifinė šiluma, $kJ/kg \cdot K$;

$\Delta t_{i\check{s}}$ – tiekiamo oro ir išeinančių dūmų temperatūrų skirtumas, $^{\circ}C$.

Dėl azoto kiekio nuostoliai skaičiuojami pagal (3) formulę:

$$Q_{N_2} = V_{N_2}^t \cdot C_{p_{N_2}} \cdot \Delta t_{i\check{s}} \text{ kJ}; \quad (3)$$

kur:

$V_{N_2}^t$ - azoto tūris esant oro pertekliui, m^3/kg ;

$C_{p_{N_2}}$ - azoto specifinė šiluma, $kJ/kg \cdot K$;

$\Delta t_{i\check{s}}$ – tiekiamo oro ir išeinančių dūmų temperatūrų skirtumas, $^{\circ}C$.

Šilumos nuostoliai dėl dūmuose esančių triatomių dujų skaičiuojami pagal (4) formulę:

$$Q_{RO_2} = V_{RO_2} \cdot C_{p_{RO_2}} \cdot \Delta t_{i\check{s}} \text{ kJ}; \quad (4)$$

kur:

V_{RO_2} - triatomių dujų tūris esant oro pertekliui, m^3/kg ;

$C_{p_{RO_2}}$ - triatomių dujų specifinė šiluma, $kJ/kg \cdot K$;

$\Delta t_{i\check{s}}$ – tiekiamo oro ir išeinančių dūmų temperatūrų skirtumas, $^{\circ}C$.

Nuostoliai dėl dūmuose esančių vandens garų skaičiuojami pagal (5) formulę:

$$Q_{H_2O} = V_{H_2O} \cdot C_{p_{H_2O}} \cdot \Delta t_{i\check{s}} \text{ kJ}; \quad (5)$$

kur:

V_{H_2O} – vandens garo tūris, m^3/kg ;

$C_{p_{H_2O}}$ – vandens garo specifinė šiluma, $kJ/kg \cdot K$;

$\Delta t_{i\check{s}}$ – tiekiamo oro ir išeinančių dūmų temperatūrų skirtumas, $^{\circ}C$.

1.5. Šilumos nuostoliai atsiradę dėl nesudegusių cheminių medžiagų

Šio tipo nuostoliai apskaičiuojami pasinaudojus dūmų analizatoriumis. Dūmų analizatorius išmatuoja anglies monoksido koncentraciją dūmuose. Anglies monoksidas susidaro dėl neužbaigto degimo [7].

Šiluminiai nuostoliai dėl anglies monoksido skaičiuojami pagal (6) formulę:

$$q_{CO} = \frac{\%CO}{\%CO + \%CO_2} \cdot \frac{5744}{\text{kuro bendra šiluminė vertė}} \cdot 100, \% \quad (6)$$

Kur:

5744 - šilumos nuostoliai dėl anglies dalinio degimo;

$\%CO$, $\%CO_2$ – matuoja dūmų analizatorius.

1.6. Šilumos nuostoliai gaunami dėl pelenų

Šie nuostoliai gaunami dėl pilnai nesudegusio kuro. Kuro peleningumas priklauso nuo jame esančių mineralinių medžiagų kiekio. Kuo didesnis pelenų kiekis, tuo katilo efektyvumas mažėja. Pelenų kiekiui skaičiuoti atliekama tyrimai paėmus kuro ėminį. [8]

Pelenų kiekis A_d , išreikštas sausos medžiagos masės procentais apskaičiuojamas pagal (7) formulę:

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \cdot \frac{100}{100 - M_{ad}}, \text{ g} \quad (7)$$

kur:

m_1 – tuščios lėkštelės masė, g;

m_2 – lėkštelės ir ėminio masė, g;

m_3 – lėkštelės ir pelenų masė, g;

M_{ad} – nustatymui naudoto ėminio drėgmės kiekis, %.

Nuostoliui skaičiuoti naudojama (8) formulė:

$$q_{pelenų} = 0,1 \cdot z \cdot (B_{kuro.val.} \cdot A_d), \% \quad (8)$$

z – koeficientas kuris lygus 0,2;

A_d – kuro peleningumas, %;

$B_{kuro.val.}$ – suvartojamas valandinis kuro kiekis, kg/val.

1.7. Šilumos nuostoliai gaunami dėl spinduliavimo

Yra katilo išorinio paviršiaus temperatūros skirtumas, pagalbinė įranga ir garų paskirstymo vamzdžiai bei aplinkinės zonos. Todėl šilumos nuostoliai atsiranda dėl spinduliavimo, konvekcijos ir laidumo nuo karštų katilo sistemų paviršių. Šilumos praradimo kiekis priklauso nuo karšto paviršiaus temperatūros, kuri savo ruožtu priklauso nuo izoliacijos (storio, šilumos laidumo ir būklės). Siekiant sumažinti šilumos nuostolius, karštu paviršiumi reikia padengti izoliacine medžiaga, pakankamai atspariu šilumos perdavimui. Be to, izoliacija turėtų būti tinkamo storio ir turėtų būti geros būklės.

Taip pat šilumos nuostoliai priklauso nuo karšto paviršiaus ploto. Kadangi katilai turi didelius paviršiaus plotus, šilumos nuostoliai iš katilo gali būti dideli, kai jie veikia mažomis apkrovomis. Tipiško katilo, veikiančio esant pilnai apkrovai, šilumos nuostoliai dėl spinduliuotės ir konvekcijos yra maždaug 2%, palyginti su visais nuostoliais. [9]

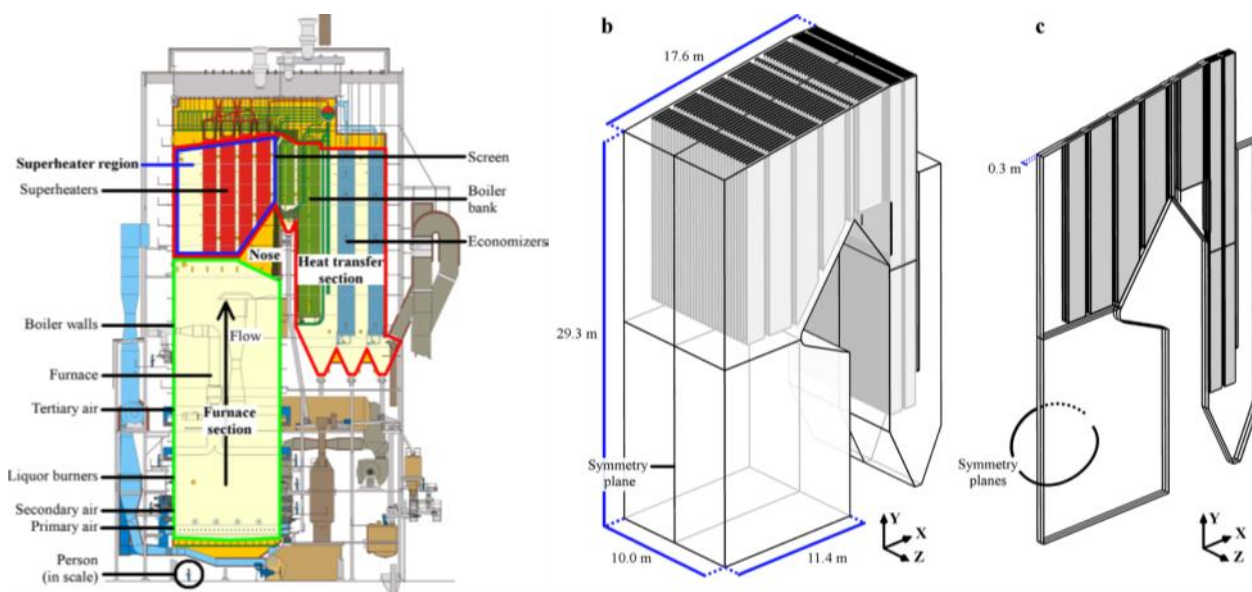
1.8. Kieto kuro katilų skaitiniai tyrimai

Dūmų temperatūra yra vienas iš svarbiausių parametrų saugiai ir ekonomiškai šiluminių elektrinių eksploatacijai. Katilo erdvėje, kurioje susidaro aukštos temperatūros, temperatūrą sunku išmatuoti tiesiogiai, nes jautikliai yra veikiami pelenų erozijos ir kitų procesų. Katilo šilumos mainų modeliai, įvertinantys procesus šilumokaičiuose, metalinėje sienelėje ir šilumos nuostolius aplinkai nustatomi pagal katilo šiluminės absorbcijos greitį. Sprendžiant katilų optimizavimo problemas, sukurti dinaminiai šilumos perdavimo modeliai [10]. Šilumos perdavimas priklauso ne tik nuo temperatūros bet ir nuo tekėjimo srauto pobūdžio.

Aerodinaminis optimizavimas tapo nepakeičiamu bet kokio aerodinaminio įrenginio elementu, panaudojamu orlaivių, automobilių, traukinių, tiltų, vėjo turbinų, vamzdynų ir juose susidarančių srautų bei katilų technologiniam projektavimui [11]. Sujungus aerodinaminis ir šilumos mainų optimizavimo metodus bei panaudojant skaitinius baigtinių tūrių metodu gautus rezultatus galima patobulinti jau esamus katilus bei kitus energetinius įrenginius.

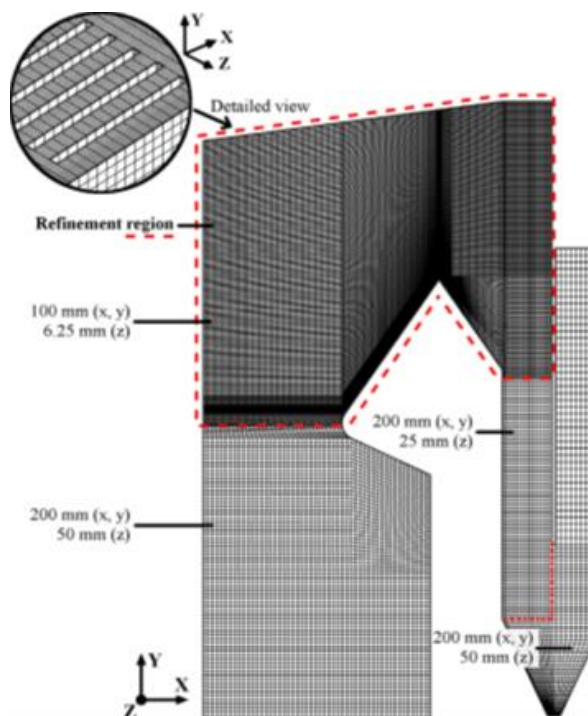
Katilų ir panašių įrenginių modeliavimo metodikos gerai aprašytos žemiau pateiktame darbe.

4 paveiksle parodyta viso katilo modelio schema, bei tyrimo zona, kurias būtina detaliai analizuoti. Ši zona prasideda nuo dūmų srauto įtekėjimo į perkaitintuvą, pratekėjus jį, pasikeičia dūmų kryptis. Tuomet jie patenka į kondensacinį ekonomaizerį ir kamino atvamzdį. Katilo sienos, galinis sieninis ekranas ir katilinė yra vadinamieji virimo paviršiai, kurie skirti vandenį paversti garais. Dėl fazinių vandens virsmų, manoma, kad temperatūra šiuose paviršiuose turi būti pastovi. Perkaitintuvai naudojami siekiant padidinti aukšto slėgio garo temperatūrą. Taigi, garo temperatūra, tekančio perkaitintuvuose, priklauso nuo šilumos perdavimo greičio ir išmetamųjų dujų temperatūros. Siekiant nustatyti procesų intensyvumą sudaromas skaitinis modelis [12].



4 pav. Katilo bendrasis vaizdas ir jo skaitinis modelis [12]

Lygtys aprašančios srautų tekėjimą ir šilumos mainus sprendžiamos naudojant komercinę CFD sprendiklį, o pagalbinais modeliais programuojami kaip vartotojo apibrėžtos funkcijos. Skaičiavimui naudojamas baigtinių tūrių tinklelis yra sudarytas iš šešiakampių formos (5 pav.). Vietinis tinklelio smulkinimas atliekamas naudojant standartinę 2:1 formos dalijimo metodą. ICM CFD programa naudojama tinkleliui generuoti.

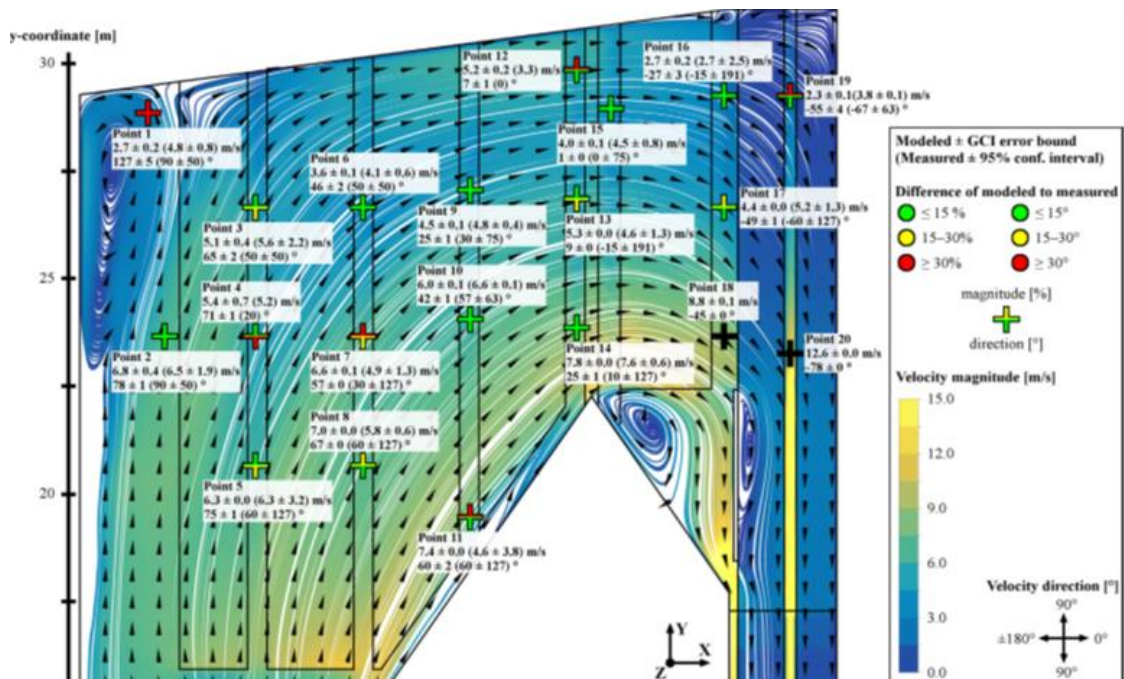


5 pav. Skaitinis tinklelis

Toliau modeliavimo tikslumas patvirtinamas eksperimentiniais duomenimis. Atliekant matavimus, katilas veikė 87% nuo pilnos apkrovos. Greičio matavimai buvo pakartoti nuo vieno iki trijų kartų kiekvienoje matavimo vietoje, o temperatūra matuojama tik vieną kartą. Išmatuotų verčių patikimumo intervalai buvo apskaičiuoti naudojant t-pasiskirstymą 95% patikimumo lygiu. Nors išmatuotos vidutinės vertės laikomos tipiškėmis, dideli pasikliautinieji intervalai apskaičiuojami pagal gana griežtą 95% patikimumo lygį.

6 paveiksle pateikiamas tipinis sprendinio vaizdas aiškiai parodantis dūmų srauto greičio laukus ir trajektoriją. Kiekvienoje matavimo vietoje rodomos išspręstos ir išmatuotos greičio dydžio ir krypties vertės. Vidutinis absoliutus skirtumas tarp modeliujamų ir išmatuotų greičio dydžių yra 0,9 m/s arba 20%. Skirtumas gali būti paaiškintas kampo sūkurio regionu, kuris yra labai sudėtingas tiek matuojant, tiek modeliujant. Taškiniai skirtumai taip pat gali būti paaiškinti kampiniu sūkuriumi susidarymu, kuris gali egzistuoti tikrovėje, bet nėra užfiksuotas modelyje. Kitas galimas neatitikimo paaiškinimas yra lokalizuotas užterštumas, kuris nėra įtrauktas į modelį, bet yra gana dažnas praktikoje katilo degimo regione. Daugumoje matavimo vietų santykinis skirtumas yra aiškiai mažesnis nei 15% (žalios spalvos). Bendras modeliujamų rezultatų ir matavimų atitikimas yra gana geras, greičio kryptimi vidutinis absoliutus skirtumas tarp modeliujamų ir išmatuotų verčių yra 15%. Didžiausi skirtumai (daugiau kaip 30%, raudonos spalvos) stebimi 4 (51%) ir 1 (37%) taškuose. Tačiau modeliavimo metu gautos vertės yra matavimų patikimumo intervaluose. Šie konkretūs taškai, kuriuose didžiausi neatitikimai yra sudėtingoje srauto dalyje, kurioje pats srautas keičia kryptį ir susidaro sūkurinė zona. Tačiau bendros greičio krypties vertės atitinka matavimus.

Atsinaujinančios energijos katilų optimizavimo potencialas yra didžiulis. Šio darbo rezultatai ir sukurtas CFD modelis yra naudingi optimizuojant katilų efektyvumą. Darbe [12] sukurta ir aprašyta CFD sistema gali būti naudojama ne tik modeliuojant katilus, bet ir kitus didelės apimties energijos gamybos įrenginius.

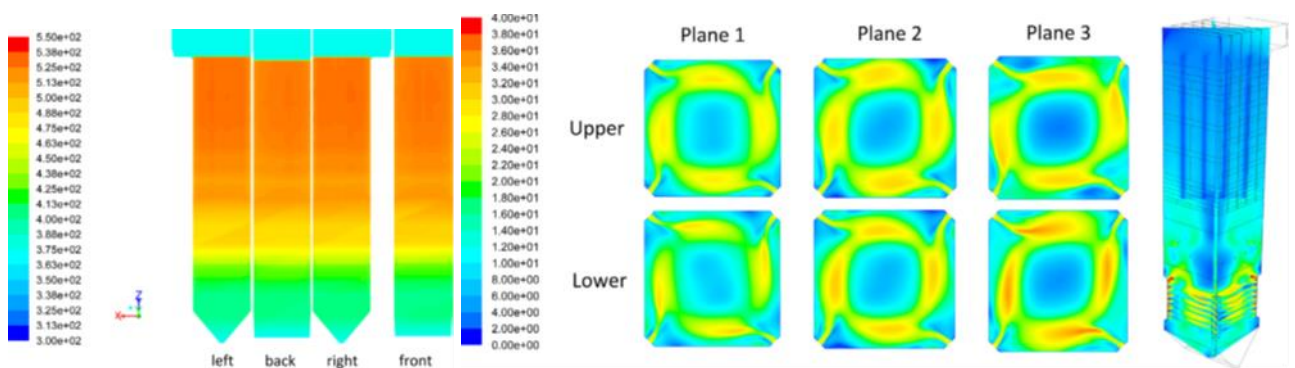


6 pav. Greičių vektoriai, katilą apskaičiavus baigtinių tūrių metodu [12]

Darbe [3] pateikta metodika išsiskiria tuo, kad modeliuojamas pilnas katilas, o tam reikia didelių kompiuterinių resursų. Be to skaičiavimas užima daug laiko, todėl dažnai nėra modeliuojamas visas katilas o tik tam tikras pasirinktas jo segmentas.

CFD modeliavimas leidžia prognozuoti temperatūros pasiskirstymą katilų dūmtraukių pusėje, tačiau cirkuliuojančių garų pusėje prognozuoti sudėtinga, nes vandens - garų temperatūra kinta priklausomai nuo slėgio ir dėl to sienos šilumos srautai nėra pastovūs. Tokiu atveju apskaičiuojama plieno temperatūra iš CFD rezultatų gautų modeliuojant tik dūmų aušimą. Pasirinkus konkrečią metalo paviršiaus temperatūrą užtenka vienmačio proceso modeliavimo, siekiant tiksliai nustatyti vamzdžiuose esančio vandens ir garo temperatūrą bei šilumos perdavimo koeficientus [13].

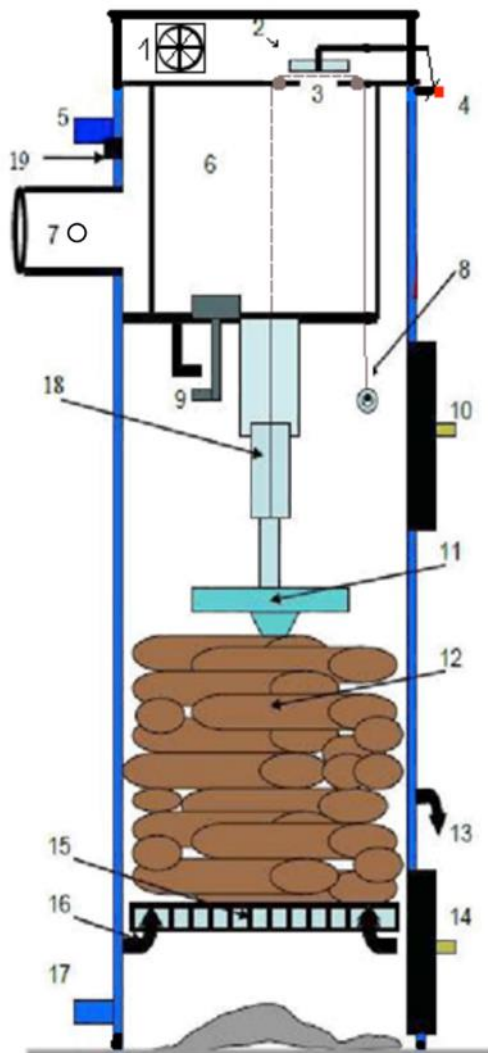
Taigi pirmiausiai apskaičiuojamos dūmų temperatūros ir greičiai, o tik tuomet šilumos atidavimas garo trakte (7 pav.).



7 pav. Temperatūrų ir greičio profiliai supaprastintame modelyje [13]

1.9. Katilo eksperimentinis tyrimas

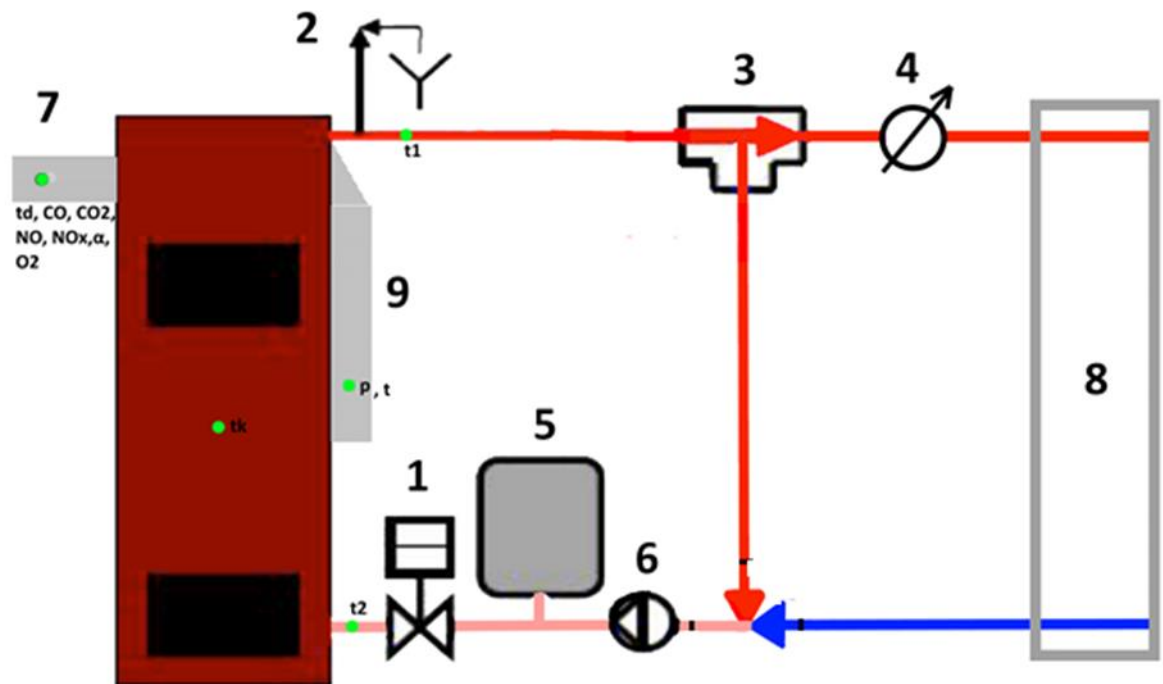
Šiam tyrimo darbui naudojamas UAB „Vakaro rasa“ sukurtas biokuro (malkų) katilas L-20u Tai žvakės principu veikiantis vertikalios formos katilas, kurio gamybinė galios charakteristika 20 kW, principinė tokio katilo schema pateikta 8 paveiksle Katilas gali būti naudojamas ir anglims deginti.



8 pav. Katilo „L20u Liepsnelė“ bendrasis vaizdas

1 Oro įpūtimo ventiliatorius; 2 Ratukų sistema pakėlimo lynui; 3 Oro tiekimo skylė su pridarymo dangteliu; 4 Termostatinis pridarymo dangtelio valdiklis/reguliatorius; 5 Tiekiamas į sistemą pašildytas vandens išvadas; 6 Oro pašildymo kamera, šildoma išeinančiais degimo produktais; 7 Kaminas su dūmų nusiurbimo analizei vieta/portalu; 8 Oro skirstytuvo pakėlimo/nuleidimo lynas, esantis katilo išorėje; 9 Uztvaros perjungimo rankena; naudojama tik kai deginamos anglis; 10 Kuro pakrovimo durelės; 11 Oro skirstytuvas; 12 Malkų kuras (25-40 cm ilgio); 13 Pakėlimo lyno tvirtinimo kablys; 14 Pelenų šalinimo durelės; 15 ir 16 Ardelės ir jų tvirtinimo atramos; 17 Grįžtančio vandens įvadas, įjungtas į cilindrinį katilo korpusą (mėlynas); 18 Teleskopinis oro tiekimo vamzdis; 19 Apsauginis vožtuvas.

Katilo bandymams įrengta šilumos nuvedimo sistema, aprūpinta reikiamais valdymo ir matavimo įtaisais. Jos sandara pateikta 9 paveiksle.



9 pav. „L-20u“ katilo tyrimo sistema ir parametų matavimo portalų vietos.

1 Srauto nustatymo vožtuvas su srauto matuokliu; 2 Apsauginis vožtuvas; 3 Trieigis srauto pamaišymo vožtuvas; 4 Šilumos apskaitos prietaisas; 5 Išsiplėtimo indas; 6 Cirkuliacinis siurblys; 7 Dūmų atvamzdis į kaminą su dūmų parametų matavimo portalu; 8 Šilumos nuvedimo kontūras; 9 Oro tiekimo į katilą atvamzdis su sklende, įrengtas tyrimo metu.

Pirminiame tyrimų etape atlikta katilo pagrindinių parametų-galios ir naudingumo tyrimus, todėl atliekami visų išvardytų parametų matavimai bei kuro savybių laboratoriniai tyrimai. Analitiniais skaičiavimais nustatoma galia, degimui reikalingo oro kiekiai, katilo naudingumas, šilumos nuostoliai per sienes ir su išeinančiais dūmais bei kiti skaičiavimai.

Antrajame tyrimų etape, padarius kai kuriuos patobulinimus bei katilo elementų konstrukcinius pakeitimus, atliekamas katilo darbo parametų tyrimas, vertinant darbo efektyvumo padidėjimą ir charakteristikų pagerinimą.

Šie eksperimentai vykdyti doc. A. Sudinto, lekt. L. Paukštaičio. Jų gautais rezultatais pasinaudosiu šiame darbe.

1.10. Literatūros apibendrinimas

Literatūros analizėje apžvelgtos pagrindinės katilų konstrukcijos ir procesai įtakoiantys šiluminius nuostolius. Nustatyta tokių katilų skaitinių tyrimų metodika: galimi konstrukcijos supaprastinimai, skaitinio tinklelio parinkimas, modelio sudarymas ir kraštinių sąlygų suformulavimas. Trumpai aptartas tiriamojo katilo eksperimentinis tyrimas vykdytas KTU Šilumos ir atomo energetikos katedroje. Šių eksperimentų rezultatai yra naudojami skaitinio modelio ir gautų modeliavimo metu rezultatų patikrai.

2. Tyrimo metodika

Šioje dalyje pateikiama naudojamo programinio paketo aprašas, pagrindinės matematinės lygtys ir pasirinkto tyrimui katilo modelis. Parodytas modeliuojamos supaprastintos katilo dalies modelio sudarymas ir aprašomos kraštinės sąlygos.

2.1. Ansys CFX matematinės lygtys

Vienas šiuolaikinių būdų, leidžiančių supaprastinti eksperimentinius tyrimus arba net jų visai atsisakyti, yra skaitinis modeliavimas. Šiame darbe skaitiniai tyrimai vykdyti panaudojant ANSYS CFX programinį paketą, kurio esmę sudaro baigtinių tūrių metodo taikymas.

Pagrindinės lygtys, sudarančios ANSYS CFX programinį paketą [14, 15]:

- judesio lygtys:

$$\nabla(\rho \bar{w}u - \mu_{ef} \nabla u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + S_C - S_p^u u; \quad (9)$$

$$\nabla(\rho \bar{w}v - \mu_{ef} \nabla v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + S_C - S_p^v v; \quad (10)$$

$$\nabla(\rho \bar{w}w - \mu_{ef} \nabla w) = -\frac{\partial p}{\partial z} + S_C - S_p^w w, \quad (11)$$

- vientisumo lygtis:

$$\nabla(\rho \bar{w}) = 0, \quad (12)$$

- šilumos mainų lygtis:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla(\rho U h) = \nabla(\lambda \nabla T) + \tau : \nabla U + S_E. \quad (13)$$

Viena iš pagrindinių problemų, kylanti eksperimentiškai arba skaitiniais metodais yra turbulencijos proceso modeliavimas ir modeliavimo rezultatų patikimumas. Šiuo metu sukurti keli turbulencijos modeliai, vieni iš jų tinkamesni tuo atveju, kai srauto (arba kūno) greičiai dideli, kiti skirti modeliuoti pasienio sluoksnį ir t. t. Kiekvienu konkrečiu atveju svarbu pasirinkti tokį turbulencijos modelį, kuris leistų gauti rezultatus, kuo tiksliau atspindinčius eksperimentinius duomenis [20, 89-91]. Programiniuose paketuose, skirtuose fluidų modeliavimui, turbulencijos modeliai dažniausiai būna statistiniai. ANSYS CFX programiniame pakete numatyta galimybė panaudoti penkiolika turbulencijos modelių, keli iš jų: $k-\varepsilon$, $k-\omega$, SST, BSL ir SSG. Kiekvienas iš šių modelių skiriasi nuo kito priimtomis prielaidomis, hipotezėmis bei lygtimis, kurios šiuos modelius aprašo. Pavyzdžiui, $k-\varepsilon$ modelyje teigiama, jog turbulencinė klampa siejasi su kinetine turbulencijos energija ir sklaida. Tuo tarpu $k-\omega$ modelyje turbulencinė klampa siejama su kinetine turbulencijos energija ir turbulencijos dažniu. Kai kurie kiti minėti turbulencijos modeliai yra $k-\varepsilon$ ir $k-\omega$ modelių papildymai (pavyzdžiui, BSL modelis sujungia $k-\varepsilon$ ir Wilcox modelių privalumus).

Šiame magistriniame projekte skaitinio modeliavimo metu taikytas $k-\omega$ turbulencijos modelis. Modelis pasirinktas dėl to, kad fluidai apteka įvairias kliūtis

Turbulencija yra nestacionarus, trimatis kompleksinis procesas, fluideo sraute vykstantis visomis kryptimis. Turbulencija pasireiškia tada, kai inercijos jėgos fluide tampa dominuojančiomis, lyginant su klampos jėgomis [14, 15]. Navje - Stokso lygtys bendru atveju aprašo laminarinę ir turbulencinę srautą. Kadangi turbulenciniame sraute vykstančių procesų (turbulencijos ilgio ir laiko skalės) trukmė, esant realiems Reynoldso skaičiams, kinta plačiose ribose, tai skaitmeniniuose hidrodinamikos procesų (CFD) modeliavimo programiniuose paketuose dažniausiai naudojami statistiniai turbulencijos modeliai [14-17]. Kai kurie esminiai plačiausiai taikomų turbulencijos modelių bruožai pateikiami sekančioje dalyje.

RANS lygtys

Šiame turbulencijos modelyje modifikuotų judesio lygčių (RANS lygčių) dedamosios yra suvidurkintos ir kintančios. Pakeičiant originalias judesio lygties vertes vidutinėmis vertėmis gaunamos suvidurkintos pagal Reynoldso skaičių lygtys [14-16]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0; \quad (14)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \cdot U) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau - \rho \overline{uu}) + S_M, \quad (15)$$

kur: ρ – tankis; U – greitis; p – statinis slėgis; τ – molekulinis įtempimų tenzorius; $\rho \overline{uu}$ – Reynoldso įtempimai; S_M – judesio kiekis.

k- ω modelis

Vienas iš šio modelio privalumų yra tai, kad jis įvertina pasienio sluoksnio įtaką tuo atveju, kai Reynoldso skaičiai yra maži [14, 15]. *k- ω* modelyje teigiama, kad turbulencinė kinetinė energija ir turbulencinis dažnis pernešimo lygtyje yra siejami tokio ryšio:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}. \quad (16)$$

Šiame turbulencijos modelyje sprendžiamos dvi judesio lygtys: viena jų - turbulencinei kinetinei energijai k , kita - turbulenciniam dažniui ω .

k lygtis:

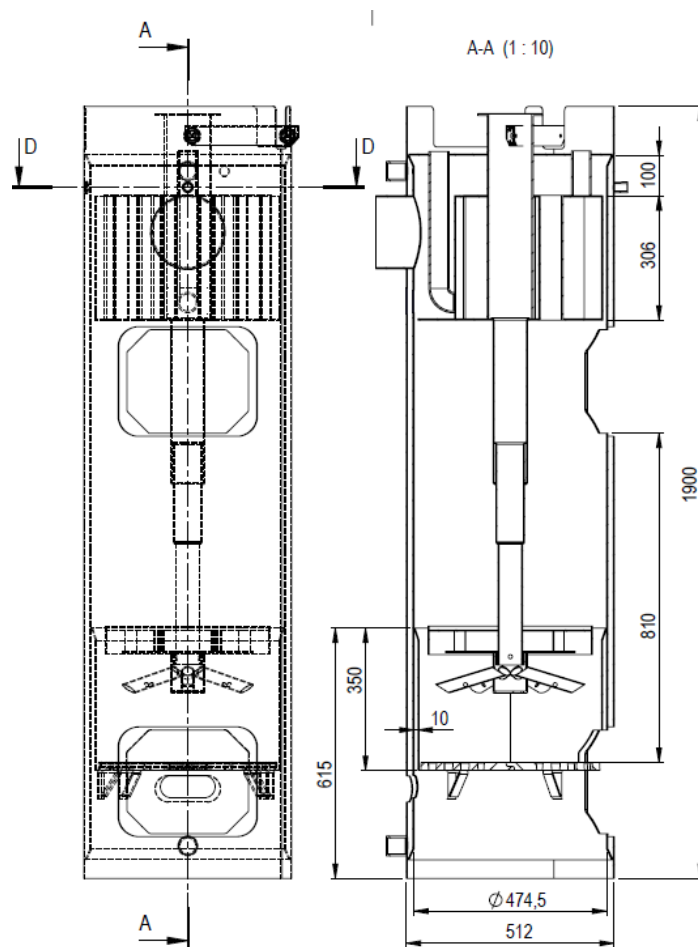
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho U k) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k + P_{kb} - \beta' \rho k \omega; \quad (17)$$

ω lygtis:

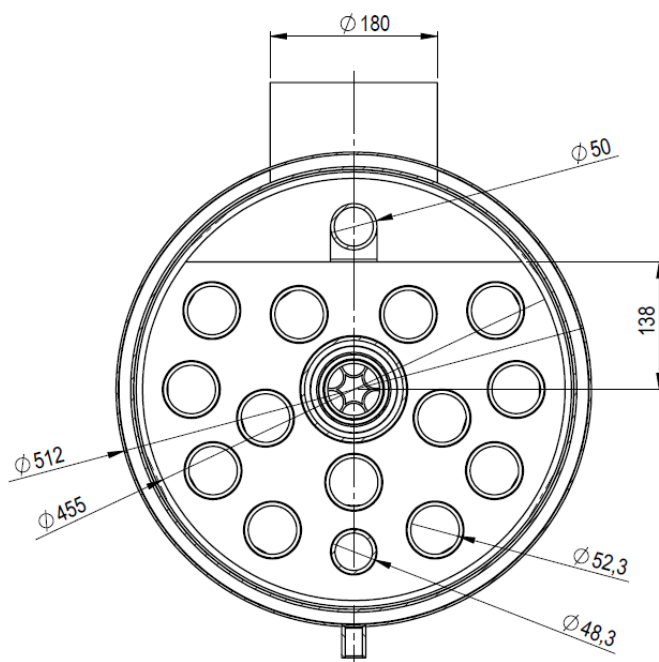
$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla(\rho U \omega) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right) + \alpha \frac{\omega}{k} P_k + P_{\omega b} - \beta \rho \omega^2. \quad (18)$$

Modelio konstantos: $\beta' = 0,09$; $\alpha = 5,9$; $\beta = 0,075$; $\sigma_k = 2$; $\sigma_\omega = 2$.

2.2. Katilo modelis ir kraštinės sąlygos

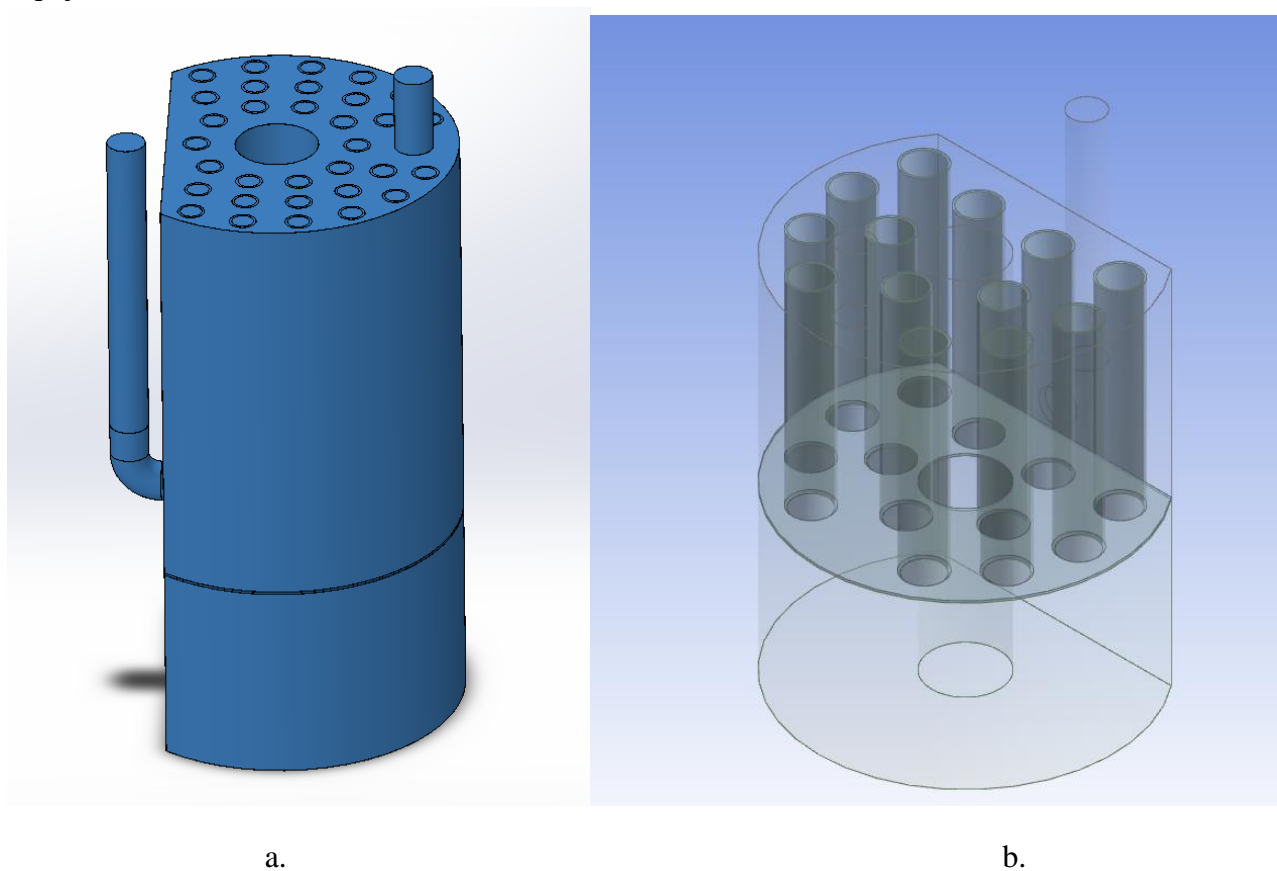


10 pav. Katilo „Liepsnelė“ pagrindiniai matmenys



11 pav. Katilo vaizdas iš viršaus

10 ir 11 paveiksluose parodytas viršutinio degimo katilo „Liepsnelė L20u“ pagrindiniai matmenys. Šiuose paveiksluose aiškiai matomas šiems katilams charakteringas teleskopinis vamzdis einantis per katilo centrinę dalį. Skirtingai nuo kitų tokio tipo katilų, šiame katile sumontuota papildoma vandens talpa viršutinėje katilo dalyje. Per šią dalį išteka karšti degimo produktai, kurie dalį šilumos atiduoda talpoje esančiam vandeniui.



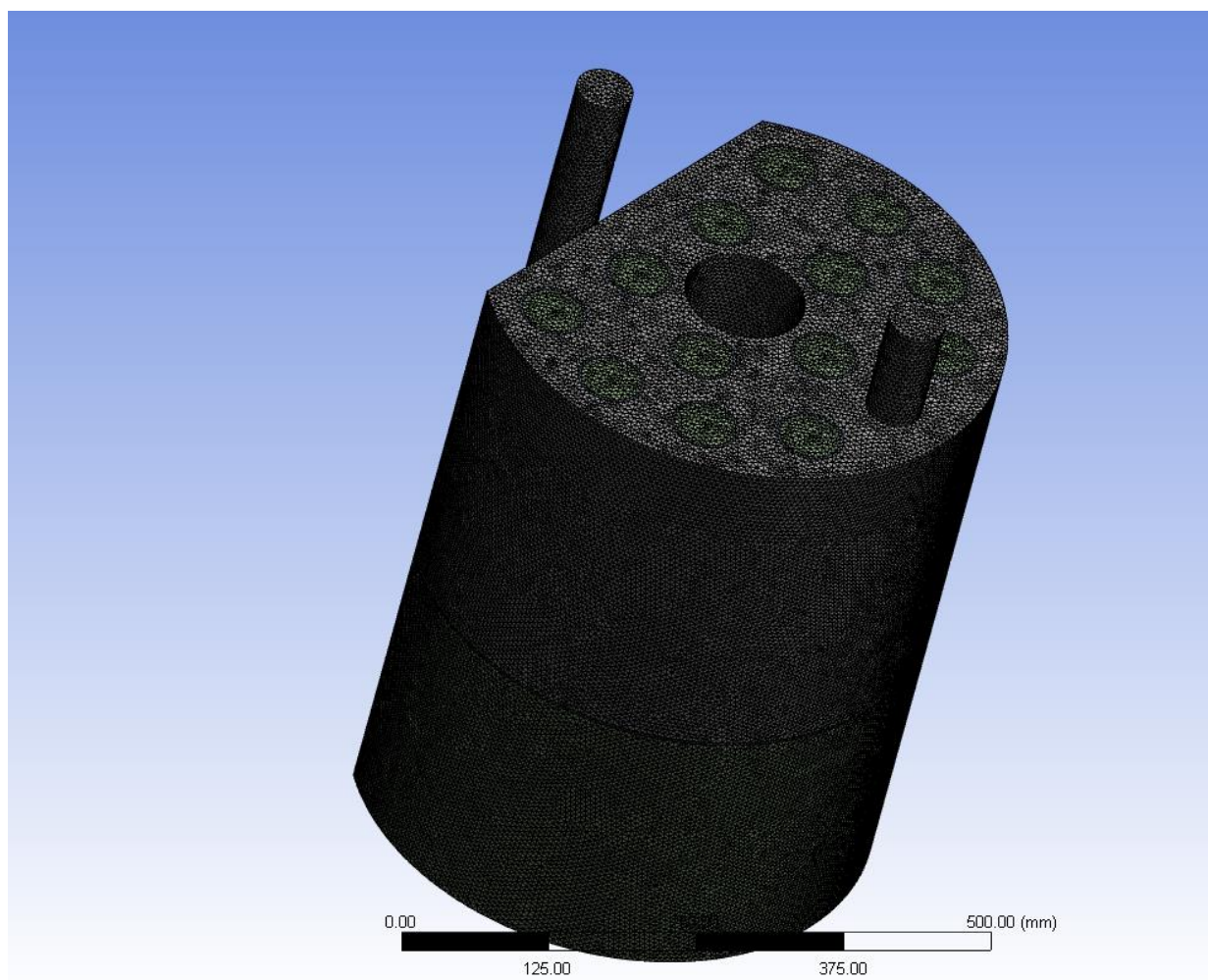
12 pav. Katilo vandens talpos brėžiniai Solidworks (a.) [17] ir Ansys CFX (b) terpėje [14]

12 paveiksle parodyti katilo vandens talpos brėžiniai, kurie vėliau paverčiami į skaitinį modelio tinklėlį. Dalyje a pavaizduotas katilas Solidworks terpėje, o dalyje b jau įkeltas į Ansys CFX terpę. Solidworks pasirinktas dėl to, kad yra tobulesnė trimačių objektų braižymo programa, kurioje yra papildomų funkcijų palengvinančių braižymą. Nubraižytas objektas yra išsaugomas Parasolid formate ir tik tuomet įkeliamas į Ansys CFX. Šiuose brėžiniuose aiškiai išsiskiria vandens įtekėjimo ir ištekėjimo atvamzdžiai (12 paveikslas: a, kairė dalis, vamzdis su alkūne, ir nedidelis atvamzdis viršuje talpos). Apačioje modelio ir sąlyginai mažo skersmens vamzdžiai išeinantys per vandens talpą yra degimo produktų tekėjimo zonos. b dalyje tamsiai žalios spalvos vamzdžiai ir plokštė suformuoja vandens ir degimo produktus atskiriantį barjerą, kuris yra pagamintas iš to pačio plieno kaip ir katilas. Per centrą einanti skylė yra teleskopinio vamzdžio vieta. Šis vamzdis nėra modeliuojamas, kadangi jo įtaka šilumos mainams vandens talpoje yra nežymi. Be to jį apteka ir degimo produktai, kurie iš dalies veikia kaip izoliacija ir tekantis vėsus oras tik pradeda šilti. Kadangi katilo išorinė konstrukcija nebuvo pakeista, todėl vandens talpa įgavo savitą formą (nupjautas cilindras), dėl tiekiamo vandens atvamzdžio patalpinimo į katilo erdvę.

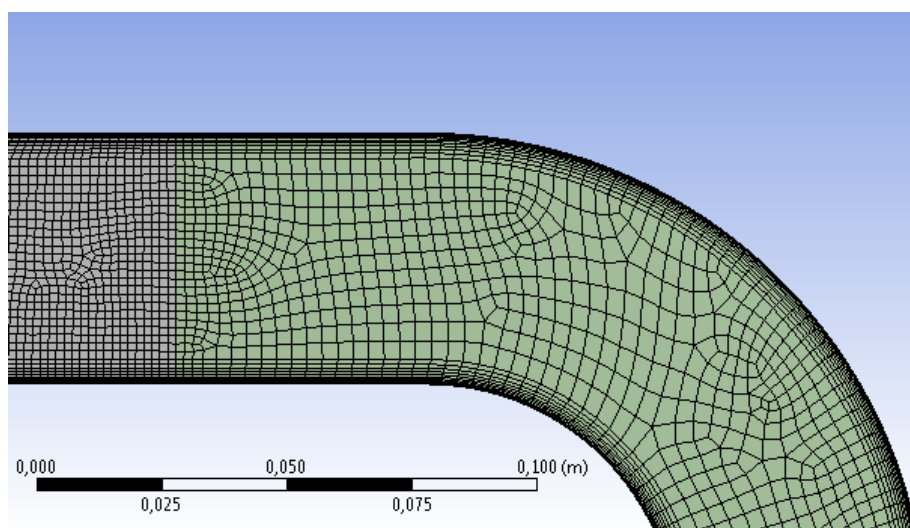
Sekančiu žingsniu yra sugeneruojamas skaitinis tinklėlis Ansys CFX terpėje (13 paveikslas). Generuojant tinklėlį užduodami pagrindiniai baigtinių tūrių matmenys. Pagrindiniai elementai yra piramidės formos elementai, tačiau prie sienelės skaitinis tinklėlis įgauna kubo formą (14 paveikslas).

Toks tinklelis pagreitina skaičiavimą be to ir padidina hidrodinaminio pasienio sluoksnio modeliavimo tikslumą.

Šioje dalyje aprašomos degimo produktų ir metalo bei vandens ir metalo kontaktinis zonos. Aprašytos zonos vėliau perkeliamos į kraštinių sąlygų etapą.



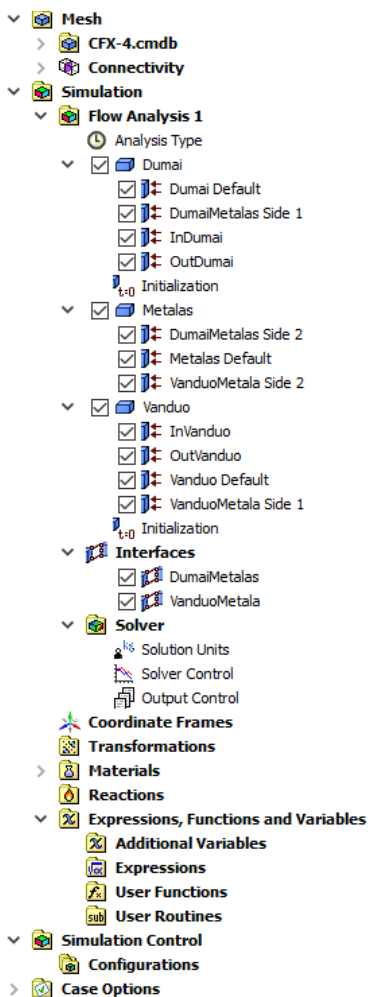
13 pav. Katilo vandens talpos skaitinis tinklelis.



14 pav. Tinklelis hidrodinaminiam pasienio sluoksniui

Sugeneruotas tinklelis patikrinamas nelygumų funkcija, kuri leidžia apibrėžti elementų tinkamumą tolimesniems skaičiavimams ir tai yra vienas pagrindinių žingsnių skaitinio tinklelio susmulkinimui ar sustambinimui. Tinklelis smulkinamas iki tokio etapo kol nelygumų funkcijos statistinis pasiskirstymas pagal elementų dydžius atitinka rekomenduojamus tokiems uždaviniams. Sugeneruotas tinklelis atitinka 75 % keliamiems reikalavimas, todėl su tokiu tinkleliu galima tęsti skaičiavimus.

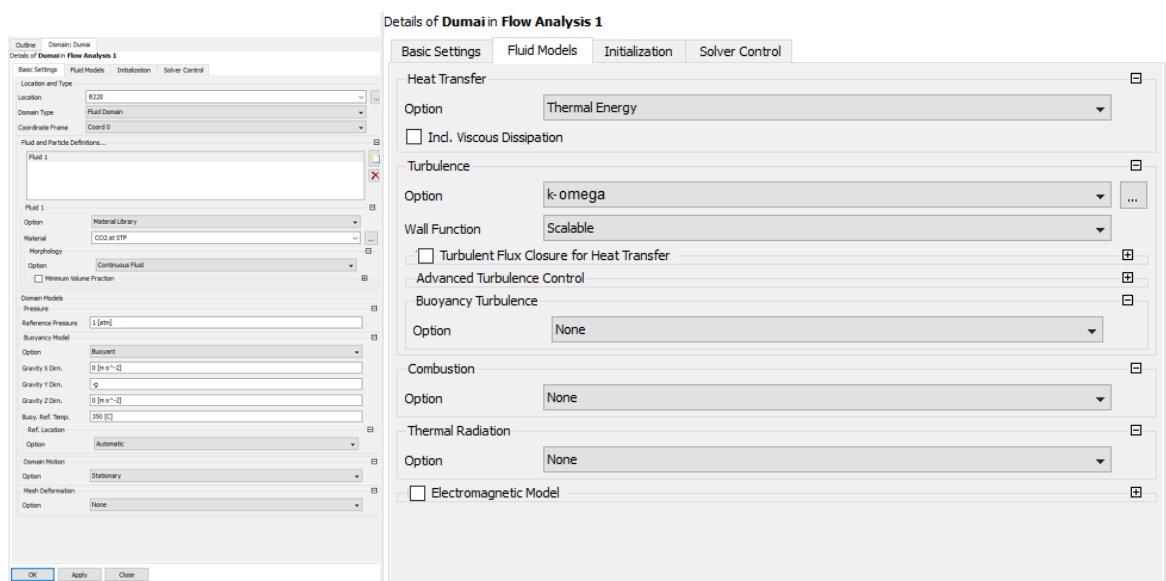
Sekančiame žingsnyje sugeneruotas skaitinis tinklelis perkeliamas į Ansys CFX modulį (15 pav.), kuriame aprašomos visos kraštinės sąlygos. Pasirenkamas analizės tipas: nusistovėjusi būseną. Aprašomi skaičiavimo domenai: dūmai, metalas ir vanduo. Parenkamos medžiagos. Vandeniui ir jo terminėms charakteristikoms aprašyti naudojama IAPWS-97 duomenų bazė apimanti šiuo metu visą ištirtą vandens savybių bazę. Dūmų terminės charakteristikos aprašomos pateiktais polinomais, jie kaip ir IAPWS-97 yra įdiegti CFX modulyje. Vienintelė medžiaga, kuri yra pilnai aprašoma yra medžiaga metalas iš kurios pagaminti vamzdžiai ir plokštė atskirianti vandenį ir dūmus. Šio plieno savybės: šiluminis laidumas 27 W/m/K, o specifinė šiluma 440 J/kg/K.



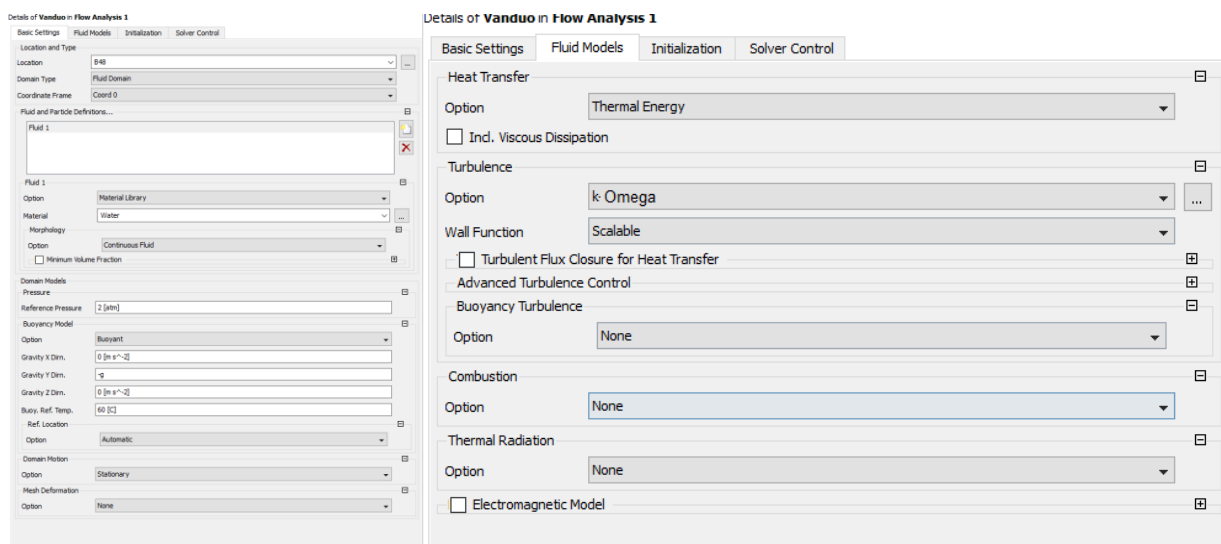
15 pav. Pagrindiniai CFX modulio elementai

Šioje dalyje suformuojamos vandens ir metalo bei degimo ir produktų sąlyčio zonos, parenkami procesai, kurie vyksta šiose zonose, kad būtų galima sumodeliuoti šilumos perdavimą iš karštesnių degimo produktų į šaltesnį vandenį.

16 ir 17 paveiksle parodytas kraštinių sąlygų ir turbulencijos modelių parinkimas degimo produktų ir vandens tekėjimo atvejams.



16 pav. Degimo produktų kraštinių sąlygų ir turbulencijos modelio parinkimas



17 pav. Vandens kraštinių sąlygų ir turbulencijos modelio parinkimas

Kitos kraštinės sąlygos tokios, kaip vandens ir degimo produktų debitai paimami iš 3 skyriuje pateiktų skaičiavimų ir eksperimentinio tyrimo. Įtekančio vandens į talpą debitas ir temperatūra apibrėžiami eksperimento metu gautais parametrais. Dūmų debitas tekantis katile apskaičiuojamas pagal sudegusių malkų kiekį, o dūmų įtekančių į vandens talpoje esančius vamzdžius temperatūra taip pat paimta iš eksperimento. Ši temperatūra nėra tiksli, todėl skaičiavimai atliekami prie įvairių temperatūrų.

2.3. Tyrimo metodikos apibendrinimas

Apibendrinant tyrimų metodiką galima teigti, kad skaitinis tinklelis yra sudarytas tinkamai, aprašytos visos kraštinės sąlygos. Nežinomi parametrai yra paimti iš eksperimentinių tyrimų.

3. Rezultatų analizė

Šioje dalyje pateikiamas katilo galios nustatymo, oro ir dūmų kiekio bei kiti skaičiavimai reikalingi modeliavimui. Aprašyti skaitinio modeliavimo metu gauti temperatūros, greičio ir slėgių nuostolių kitimai.

3.1. Įrenginio galios nustatymas

Deginimo įrenginio šiluminės galios nustatymas atliekamas remiantis šiais trimis būdais:

- pirmasis būdas – pagal atitinkamą kuro rūšį ir kuro suvartojimą pagal formulę:

$$q = \frac{b \cdot q_z}{3600},$$

kur: q – vardinė šiluminė galia (patikslinta), MW; b – valandinis kuro suvartojimas, kg/h arba nm^3/h ; q_z – kuro deginimo žemutinė šiluminė vertė, MW/kg arba MJ/nm^3 ;

- antrasis būdas – iš kurą deginančio įrenginio pagamintos šilumos energijos pagal formulę:

$$q = \frac{q_i}{t},$$

čia: q – vardinė šiluminė galia (patikslinta), MW; q_i – įrenginio faktinis didžiausias per mėnesį pagamintos šilumos energijos kiekis, MWh (per laikotarpį); t – įrenginio per laikotarpį (kai buvo pagamintas didžiausias šilumos energijos kiekis) darbo valandų skaičius valandomis;

- trečiasis būdas – iš kuro deginančio įrenginio gaminamos šiluminės energijos ir naudingumo koeficiento pagal formulę:

$$q = \frac{q_k}{\eta_k},$$

čia: q – vardinė šiluminė galia (patikslinta), MW; q_k – įrenginio šiluminė galia, MW; η_k – įrenginio naudingumo koeficientas.

KTU Šilumos ir atomo energetikos katedros kuro degimo laboratorijoje atlikti pirminiai katilo „Liepsnelė L-20u“ bandymai, kai naudotas malkų kuras. Atlikti du preliminarūs patikrinamieji kuro deginimo ir sistemos patikros bandymai bei du ilgalaikiai katilo veikimo bandymai, esant pilnai katilo pakuros įkrovai.

3.2. Kuro savybių nustatymas

Katilo pirminiam tiriamajam bandymui naudotos užsakovo atvežtinės malkos.

Siekiant tyrimų metu išsiaiškinti katilo darbo efektyvumą/naudingumą, atlikti malkų energetinių savybių tyrimai:

- nustatyta malkų drėgmė $W^n = 12,4 \%$,
- peleningumas $A^n = 1,8 \%$.

Daugeliu atveju yra priimama, kad malkų sausosios masės šilumingumas yra 4510 kkal. Tuo atveju, malkų skaičiuotinas drėgnosios masės apatinis šilumingumas yra apie:

$$Q_a^n = 17000 \text{ kJ/kg}$$

Tačiau numatomų pas vartotojus naudoti malkų drėgnumas gali siekti 25-30 %, todėl apatinis šilumingumas bus žemesnis:

$$Q_a^n = \text{apie } 12500 - 13000 \text{ kJ/kg}$$

Įvertinant, tai kad kuro drėgnumas gali būti labai skirtingas net toje pačioje malkų partijoje, šiame skaičiavime ir tolimesniame eksperimentiniame tyrime priimama, kad malkų šilumingumas gali būti žemesnis nei skaičiuotinas:

$$Q_a^n = 15500 - 16000 \text{ kJ/kg}$$

Nuo priimtos šilumingumo vertės priklausys katilo darbo efektyvumo procentinė vertė.

Siekiant atlikti degimui reikalingo oro ir susidarančių dūmų kiekio analitinius skaičiavimus, laboratoriniu tyrimu nustatoma malkų elementinė sudėtis:

- $C^n = 43,80 \%$;
- $H^n = 5,15 \%$;
- $N^n = 1,49 \%$;
- $O^n = 35,36 \%$;
- $S^n = 0$, ($A^n = 1,8 \%$., $W^n = 12,4 \%$).

3.3. Teorinio oro kiekio skaičiavimas malkoms

Skaičiuojami teorinio oro kiekio, reikalingo deginti malkų kurą, skaičiavimai.

Apskaičiuotas oro kiekis V_t reikalingas 1 kg kuro sudeginti yra:

$$V_t = \frac{4,115 \text{ kg oro}}{1 \text{ kg kuro}} \text{ arba } V_t = \frac{4,115}{1,293} = 3,183 \frac{\text{m}^3}{1 \text{ kg kuro}}$$

Randamas katile L-20u naudojamo ventiliatoriaus sudaromas nominalus valandinis debitas – D :

$$D = 165 \text{ m}^3/\text{h} \text{ arba } 0,0458 \text{ m}^3/\text{h} \text{ arba } 0,0592 \text{ kg/s}$$

Tiriamą katilą deklaruojami parametrai:

- deklaruojamoji galia $P = 20 \text{ kW}$;
- malkų pilna įkrova: 48 kg;
- vienos pilnos įkrovos deginimo trukmė: (6 - 31) val;
- sunaudojama kuro per val., kai deginama 6 valandas:

$$B = 8 \text{ kg/h} = 0,0022 \text{ kg/s} = 2,22 \text{ g/s};$$

- sunaudojama kuro per 31 val: 1,548 kg/h = 0,43 g/sek.

3.4. Katilo galios skaičiavimas

Skaičiuojamoji katilo galia, remiantis deklaruojamais katilo specifikacijoje parametrais, turėtų būti tokia:

$$P_{sk} = \frac{BQ_a^n}{3600} = \frac{(1,548...8) \cdot 15500}{3600} = 6,67...34,44 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \text{ arba kW,}$$

kai $W = 12,4$, o kuro $Q = 15500$ kJ/kg.

Kai kuro $Q = 17000$ kJ/kg:

arba kW.

3.5. Oro reikalingo katilo degimui skaičiavimas

Apskaičiuojamas reikalingo patiekti oro kiekis priklausomai nuo katilo veikimo galios.

Tiriamam katilui įsidegant ir dirbant deginimo režime (ne rusenimo), oro sklendė yra pradaroma ir palaiptams atidaroma iki maksimumo, t.y. iki $165 \text{ m}^3/\text{h}$ tūrio debito, arba iki $0,0592 \text{ kg oro/s}$. arba $59,2 \text{ g/s}$.

Ventiliatoriaus vardinis masės debitas: $59,2 \text{ g/s}$. Aukščiau teoriniais apskaičiavimais nustatyta, kad šio malkų kuro sudeginimui reikia $4,12 \text{ kg oro}$ 1 kg kuro arba $4,12 \text{ g oro/1 g kuro}$ arba $3,183 \text{ litro oro/1 g kuro}$.

Kai naudojamas kuras, kurio $Q_a^n = 15500 \text{ kJ/kg}$, katilo galia 30 kW ir sudeginama per 1 s $2,22 \text{ g}$ kuro, tokiu atveju oro per 1 s turi būti patiekiamas:

$$2,22 \frac{\text{g kuro}}{\text{s}} \cdot 4,12 \frac{\text{g oro}}{\text{g kuro}} = 9,15 \frac{\text{g oro}}{\text{s}}$$

Oro perteklius apskaičiuojamas kaip ventiliatoriaus paduodamo debito ir reikalingo patiekti teorinio debito santykis:

$$59,2 / 9,15 = 6,47 \text{ karto}$$

Esant 20 kW katilo galiai, sunaudojama apie $1,4 \text{ g/s}$, todėl šiuo atveju reikalinga tiekti:

$$1,4 \cdot 4,12 = 5,77 \text{ g oro/s}$$

Oro perteklius:

$$59,2 / 5,77 = 10,26 \text{ karto}$$

Apibendrinanti išvada:

Mažinant katilo galią, kuras bus deginamas ilgiau, pavyzdžiui, ne 6 val , o 12 val . Oro poreikis mažės, pertekliaus koeficientas didės, jei oro padavimas nebus reguliuojamas. Oro pertekliui didėjant, bus žeminama pakuros oro/dūmų dalies temperatūra, mažės vandens sistemos šildymo efektyvumas, kuro skaidymosi lakiosios frakcijos sudegs nepilnai (atsiras daugiau CO , CxHy , H_2), didės šių komponentų koncentracija išmetamuose dūmuose.

3.6. Dūmų kiekio skaičiavimas

Katilo efektyvumui nustatyti, vykdomas išmetamųjų dūmų teorinio komponentų kiekio skaičiavimai. Skaičiavimai atlikti kai oro pertekliaus koeficientas $\alpha = 1,4$ – tai biokurui deginti taikomas teorinis koeficientas.

Skaičiavimais nustatyta, kad esant duotosios elementinės sudėties malkoms yra tokia teorinė išmetamųjų dūmų komponentų sudėtis ir susidaro sekantis dūmų kiekis kai kuro drėgmė $W^n = 12,4\%$:

$$V_d = V(\text{CO}_2) + V(\text{N}_2) + V(\text{H}_2\text{O}) = 0,82 + 4,57 + 0,825 + 1,65 \cdot 0,21 = 6,56 \text{ m}^3/\text{1 kg kuro};$$

kai kuro drėgmė $W^n = 25\%$:

$$V_d = 5,824 \text{ m}^3/\text{1 kg kuro}.$$

Apskaičiuoti dūmų kiekiai yra normaliosiomis sąlygomis. Dūmų kiekiai, m^3 , temperatūrose t , kurios būdingos katilo dūmtakyje jo darbo metu nuo įsidegimo iki normalaus darbo režimo, pateikti 1 lentelėje žemiau.

1 lentelė. Dūmų kiekiai ir temperatūros dūmtakyje įvairiuose katilo režimuose

$T_d, \text{K} (t_d, ^\circ\text{C})$	622 (349)	613 (320)	395 (122)	417 (144)	389 (116)
V_{dt}, m^3	14,95	14,73	9,49	10,02	9,34
V_d, m^3	6,56	6,56	6,56	6,56	6,56

Tūrio perskaičiavimas aukštesnei temperatūrai atliekamas:

$$V_{dt} = \frac{T_d}{T} V_d = \frac{622}{273} \cdot 6,56 = 14,95 \frac{\text{m}^3}{1 \text{ kg sudeginamo kuro}}$$

Atlikti teoriniai kamino traukos ir dūmų srauto/debito skaičiavimai. Tam tikslui skaičiavimais surastas teorinio dūmų mišinio ($\text{CO}_2, \text{NO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{O}_2$) tankis normaliosiomis sąlygomis:

$$\rho_d = \frac{M_m}{22,4 \cdot 22,41} = 0,013 \text{ kg/m}^3$$

Kamino trauka normaliosiomis sąlygomis:

$$\Delta p = gH(\rho_o - \rho_d) = 9,81 \cdot 6 \cdot (1,293 - 0,013) = 75,3 \text{ Pa}$$

čia : $g - 9,81 \text{ m/s}^2$

H – kamino aukštis kuro degimo laboratorijoje, m , $H = 6 \text{ m}$,

ρ_o - oro tankis, kg/m^3

ρ_d - dūmų mišinio tankis, kg/m^3

Kamino trauka įsidegimo temperatūroje $t = 349 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\Delta p = 70,36 \text{ Pa}$$

Karštų dūmų tūrio srautas (m^3/s) priimamas lygus susidarančių dūmų per sekundę kiekiui, kuris randamas iš $14,95 \text{ m}^3$ dujų, susidarančių sudegus 1 kg kuro, atsižvelgiant į tai, kad esant 20 kW galiai, per sekundę yra sudeginama $1,4 \text{ g}$ kuro:

1 g kuro sudegus išsiskiria $14,95/1000 = 0,01495 \text{ m}^3$ dūmų

$1,4 \text{ g}$ sudegus susidaro $0,01495 \cdot 1,4 = 0,021 \text{ m}^3$ dūmų.

Vadinasi kaminas turi praleisti debitą ne mažesnę, nei:

$$D_{dk} = 0,021 \text{ m}^3/\text{s} ,$$

tuomet dūmų srauto greitis v :

$$v = \frac{D_{dk}}{S} = \frac{0,021}{3,14 \cdot 0,075^2} = 1,18 \text{ m/s} ,$$

čia: S - katilo dūmtakio skerspjūvio plotas, m^2 ; $R = 0,075 \text{ m}$.

Susidarantis faktinis dūmų tūrio srautas bus ištirtas eksperimentiškai ir papildomai perskaičiuotas, vykdant tolimesnį tyrimą.

Tikslus traukos ir srauto greičio nustatymas yra svarbūs rodikliai reikiamoms katilo darbo sąlygoms apibrėžti.

Katilo pirminio eksperimentinio tyrimo metu, kai buvo deginamas malkų kuras, buvo matuojami pagrindiniai kuro degimo, katilo ir dūmų parametrai – katilo ir degimo temperatūros. oro pertekliaus koeficientas, deguonis, azoto oksidai, anglies monoksidas dūmuose bei kiti parametrai Šie dydžiai ir išmatuotos vertės pateikti pirminių eksperimentinių bandymų/tyrimų 3 ir 4 lentelėse .

Prieš atliekant deginimo tyrimą buvo susveriamas ir pakraunamas malkų kuras, paleidžiama šilumos nuėmimo nuo katilo sistema, atskaitomi reikiami parametrai.

3.7. Katilo šilumos balansas tiesioginiu ir atvirkštiniu būdais

Katilo efektyvumas tiesioginio balanso būdu nustatomas atsižvelgiant į sunaudoto malkų kuro energinę vertę bei į šildymo sistemai/šilumos nuėmimo sistemai suteiktą šilumos kiekį:

- sudeginta $33,4 \text{ kg}$ malkų kuro
- kuro šiluminė vertė - $Q_a'' = 15500 \text{ kJ/kg}$
- šilumos nuėmimo sistemai suteiktas šilumos kiekis – $Q = 0,086 \text{ MWh}$,

t.y. 309600 kJ

Kuro energija: $33,4 \cdot 15500 = 518,32 \text{ MJ}$

Katilo šilumos gamybos efektyvumas/naudingumas pagal tiesioginį balansą:

$$309,6/518,3 = 59,73 \%$$

Katilo šilumos balansui nustatyti atvirkštiniu būdu atliktas specialus kuro įkrovos deginimas. Balansui ir efektyvumui apskaičiuoti panaudojami katilo konstrukciniai matmenys, kuro kiekis

(įkrova), susidariusių pelenų kiekis, naudoto malkinio kuro elementinės sudėties duomenys, vidutiniai išmatuoti pirminiame deginimo procese dalyvaujantys ir susidarantys oro/dūmų parametrai. Eksperimentinio tyrimo metu atlikti termovizoriniai katilo paviršiaus temperatūros matavimai, gauti duomenys, žr. 6.5 sk., panaudoti skaičiuojant balansą.

Taikomi katilo gabaritų matmenys:

- aukštis 1900 mm,
- išorės skersmuo 560 mm,
- dūmų šalinimo anga, diametras 150 mm,
- katilo durelės viršutinės, plotas 0,097 m²,
- katilo durelės, apatinės, plotas 0,097 m².

Kuro (malkų) įkrova:

- 33,4 kg, deginta laikotarpyje 7.52 – 18.07 val.,
- peleningumas A^n : 1,8 %,
- drėgmė W^n : 12,4 %.

Liko po sudegimo:

- grynieji pelenai: 0,6 kg,
- nesudegusios anglys: 1,00 kg ,
- nesudegintos anglies kaloringumas – apie 50 proc. elementinės anglies kaloringumo.

Taikyta tokia malkų elementinė sudėtis:

- H^n - 5,15 %,
- C^n - 43,8 %,
- N^n - 1,49 %,
- O^n - 35,36 %,
- S^n - 0 %.

Gauti vidutiniai duomenys pateikti žemiau 2 lentelėje.

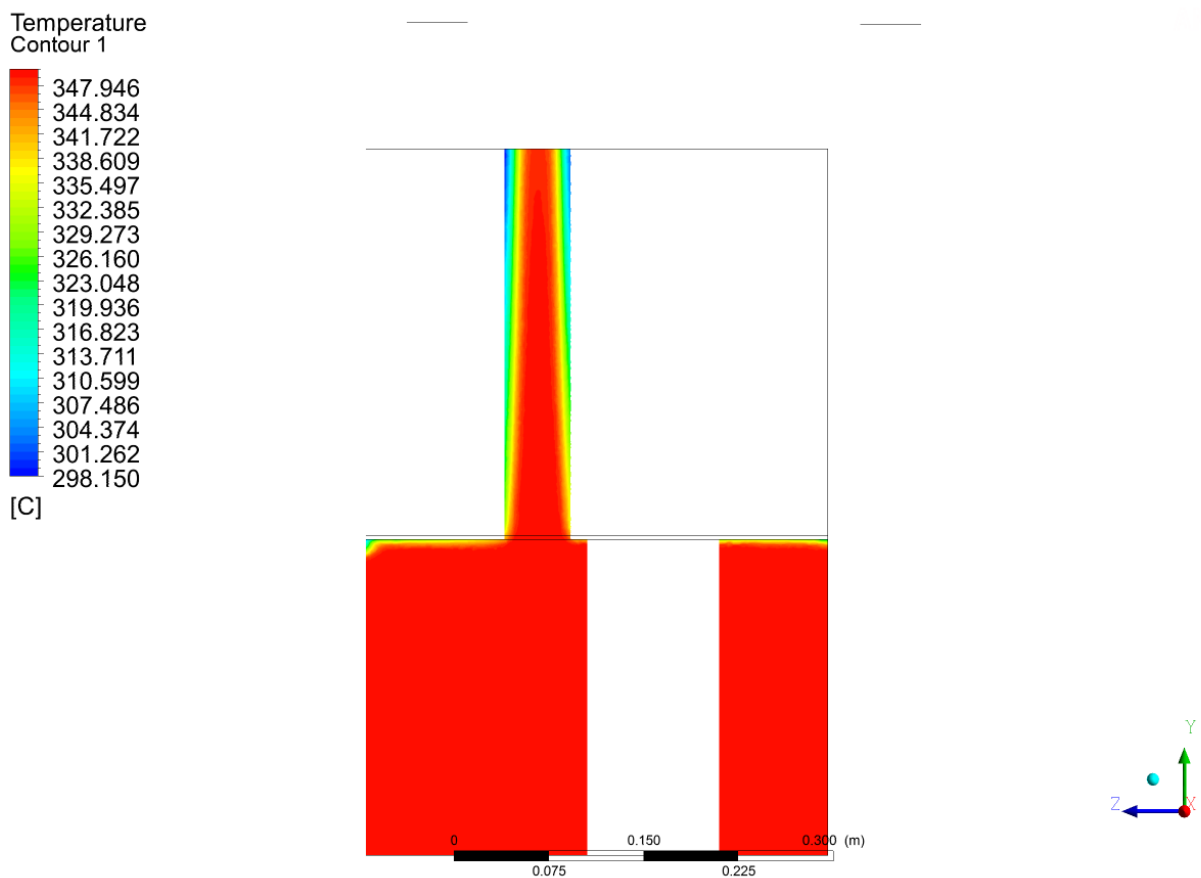
2 lentelė. Katilo naudingumas

Režimas	Šiluminiai nuostoliai					η , %
	q_2 , %	q_3 , %	q_4 , %	q_5 , %	q_6 , %	
Degimo režimas	10,70	14,11	1,63	1,00	0,00	72,57
Rusenimo režimas	5,90	32,93	1,63	1,00	0,00	56,15
Vidutinė reikšmė	19,53	21,71	1,63	1,00	0,00	58,40

3.8. Degimo produktų ir vandens temperatūra

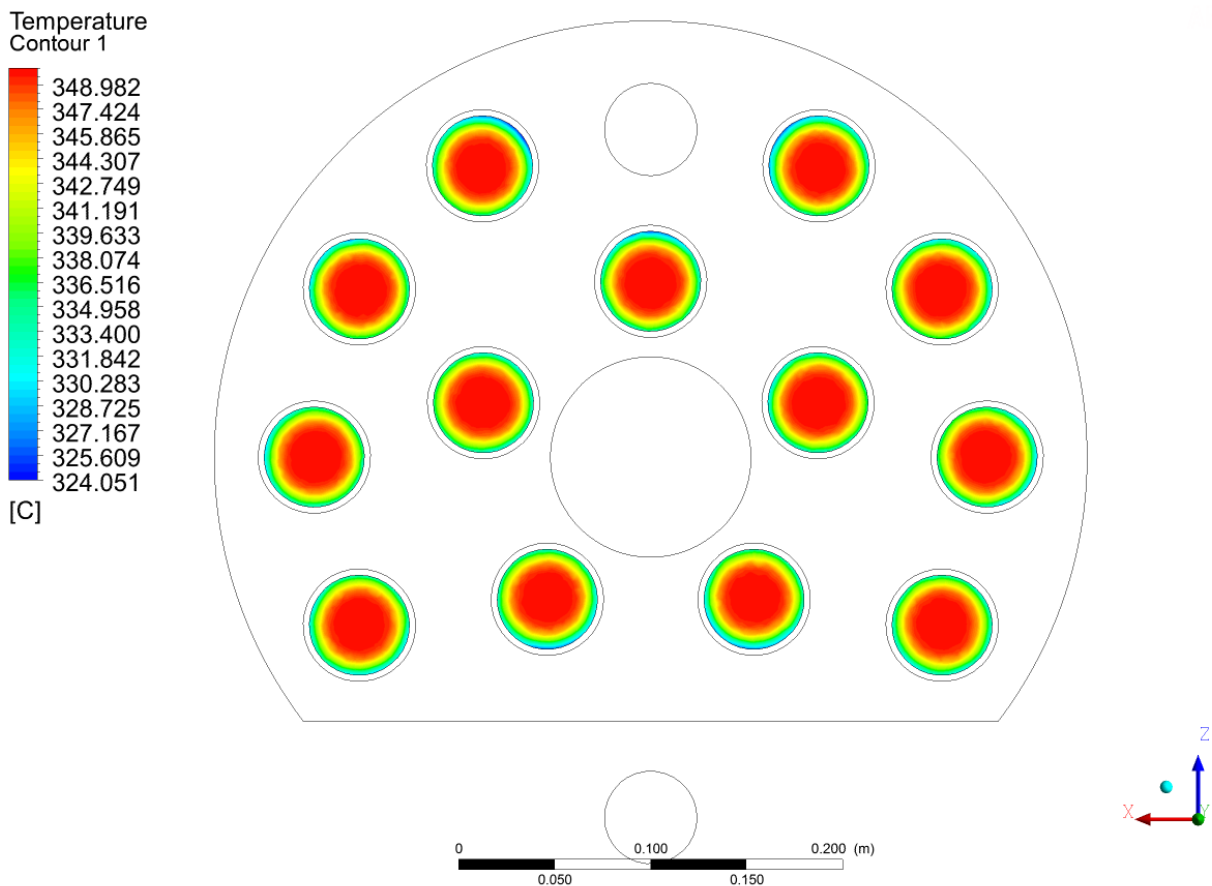
Tolimesniems skaičiavimams Ansys CFX programiniame pakete ir kraštinėms sąlygoms apibrėžti naudojame poskyriuose 3.1-3.8 atliktus skaičiavimus.

Žemiau pateikiami gauti temperatūros kitimo rezultatai. 18 paveiksle pavaizduota degimo produktų temperatūra katile ir įtekėjime į vandens talpą. Pradinė temperatūra šiuo atveju užsiduota 350 °C. Tekant degimo produktams temperatūra iš pradžių nesikeičia, kadangi šilumos nuostoliai priimt lygūs 0, bet degimo produktams susidūrus su pirmąja kliūtimi, kuri yra vandens talpos apatinė plokštė, dūmų temperatūra sumažėja iki 320 °C. Vamzdžiuose prie metalinės sienelės temperatūra nukrenta iki 298 °C. Ištekėjime degimo produktų vidutinė temperatūra yra 320 °C. Vandens talpa dūmų temperatūrą sumažino apie 30 °C.



18 pav. Degimo produktų temperatūra katile ir įtekėjime į vandens talpą

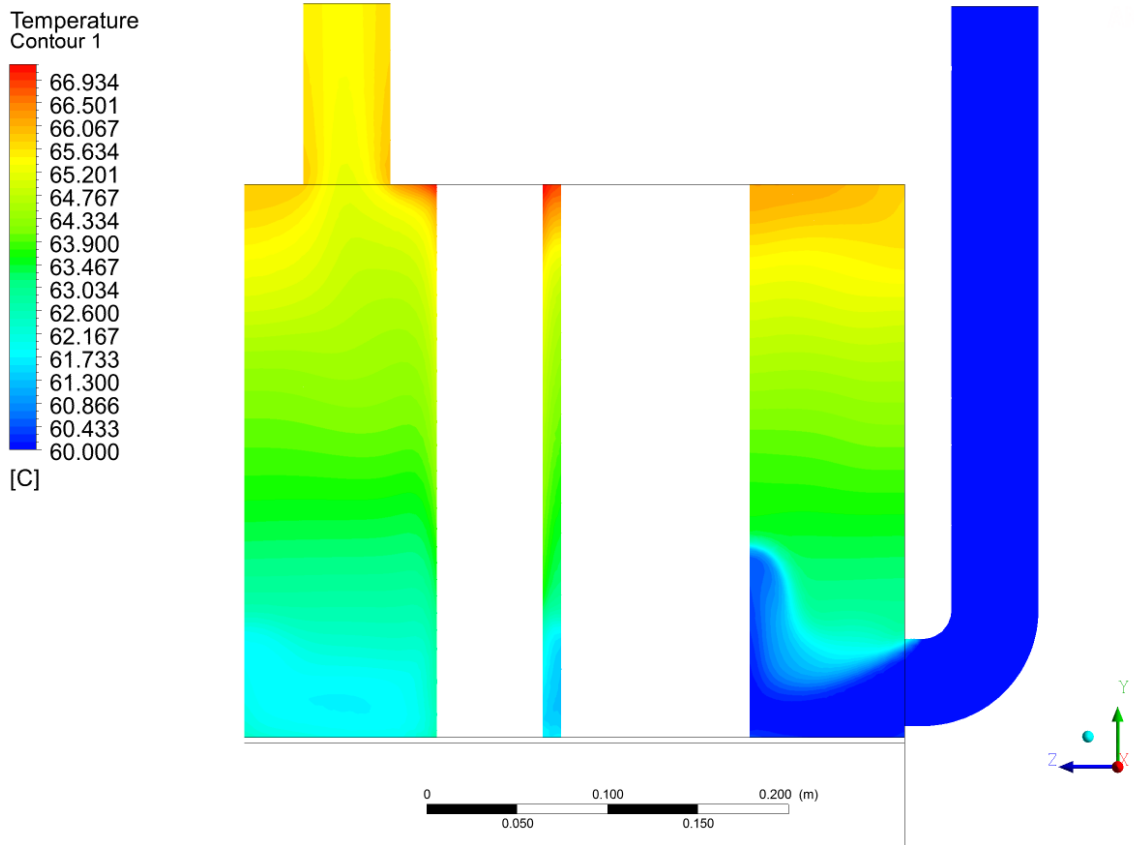
19 paveiksle parodytas degimo produktų temperatūra vandens talpos vamzdžiuose. Vamzdžiai talpoje išdėstyti tolygiai todėl dūmų aušimas visuose vamzdžiuose yra tolygus ir vienodas, todėl sumažėja rizika, kad vamzdžiai dėl netolygaus terminio išsiplėtimo išsihermetins. Be to aiškiai matosi degimo produktų temperatūros pasiskirstymas pagal vamzdžio spindulį, kuris kinta nuo 350 °C centre iki 325 °C vamzdžio periferijoje.



19 pav. Degimo produktų temperatūra vandens talpos vamzdžiuose

Eksperimento metu išmatuota degimo produktų temperatūra ištekėjime į kaminą išmatuota dūmų analizatoriumi rodė 320 °C. Temperatūra gauta modeliavimo metu yra 321,7°C, tai rodo, kad skaitinis modelis sudarytas tinkamai.

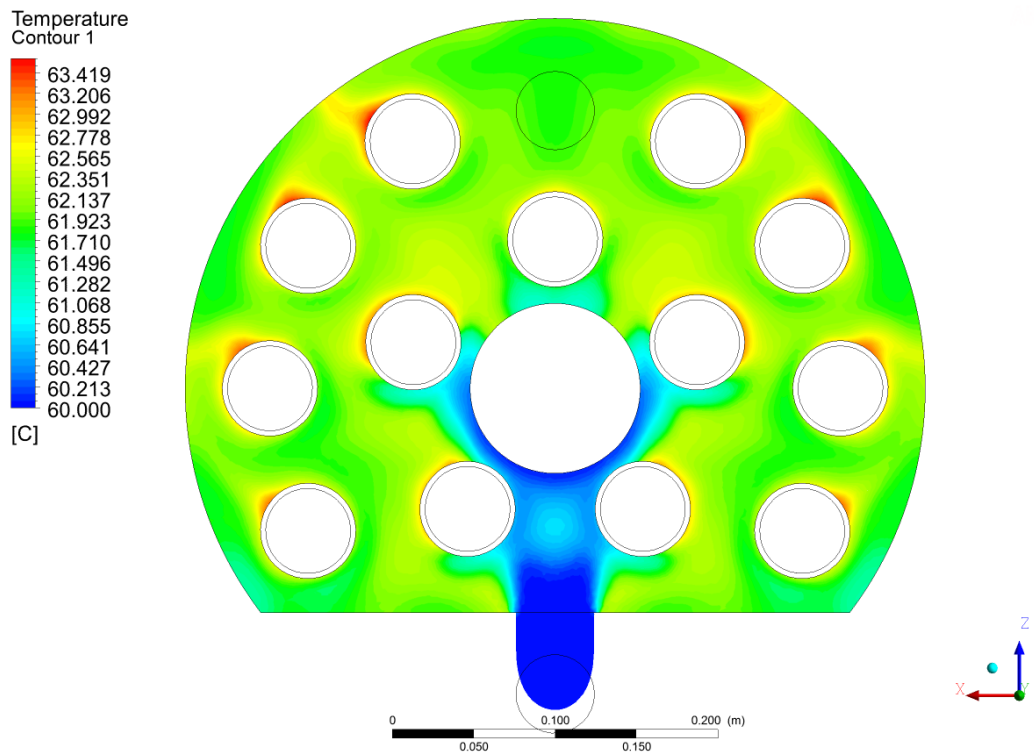
Apžvelgsiu vandens temperatūros pasikeitimą vandens talpoje, gauti rezultatai pavaizduoti 20 paveiksle. Vandens temperatūra įtekant į vandens talpą yra 60 °C, tai yra grįžtančio vandens temperatūra po aušintuvo, paimta iš eksperimento. Vanduo įtekėjimo vamzdyje nešyla, nes laikoma kad vamzdis užizoliuotas. Talpoje vanduo pradeda šilti, kadangi vandens greitis nėra didelis apie 5 cm/s tai vanduo ištekėjęs į talpą dar labiau sulėtėja, o temperatūra vandens talpoje stratifikuojasi ir šyla palaipsniui. Vidutinė temperatūra ištekant iš vandens talpos yra 65.7 °C. Eksperimento metu gauta, kad prie numatytų skaičiavimo sąlygų temperatūra po vandens talpos yra 65 °C.



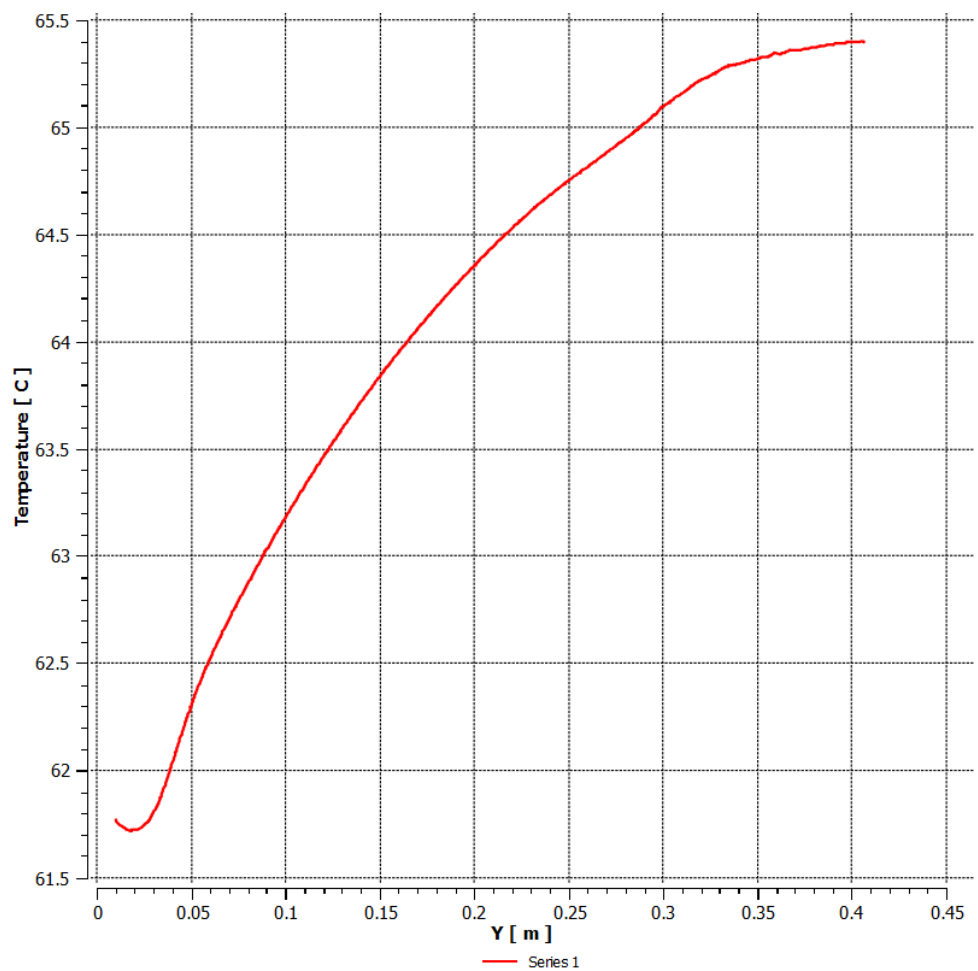
20 pav. Vandens temperatūra talpoje

21 paveiksle parodytas vandens talpos skersinis pjūvis. Vamzdžiai talpoje išdėstyti tolygiai, o šalčiausias vanduo yra įtekėjime ir apima teleskopinį vamzdį, bei pirmuosius 4 vamzdelius vandens tekėjimo kryptimi.

Iš to kaip pasiskirsto vandens temperatūra galima teigti, kad vamzdelių skaičius vandens talpoje gali būti padidintas dar labiau padidinant šilumos mainų paviršiaus plotą. Tokiu atveju dar labiau būtų panaudojama degimo produktų temperatūra, o vanduo talpoje dar labiau sušiltų.

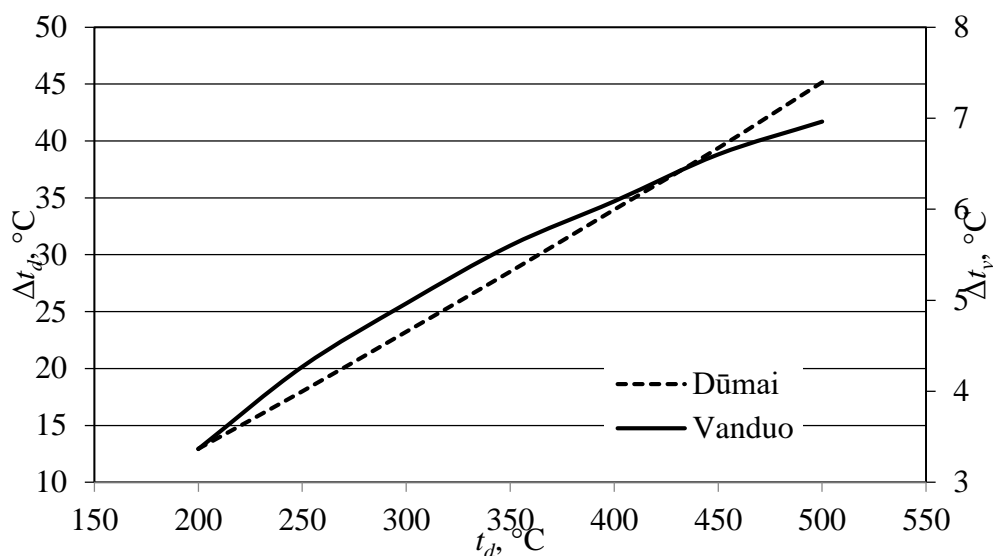


21 pav. Vandens temperatūra talpoje, ūtekājimo zona



22 pav. Vandens temperatūros stratifikācija pagal vandens talpas aukštī

22 paveiksle parodyta vandens temperatūros stratifikacija. Vanduo praktiškai tolygiai šyla vandens talpoje, tačiau kreivė rodo, kad yra nedidelis vandens judėjimas talpoje.

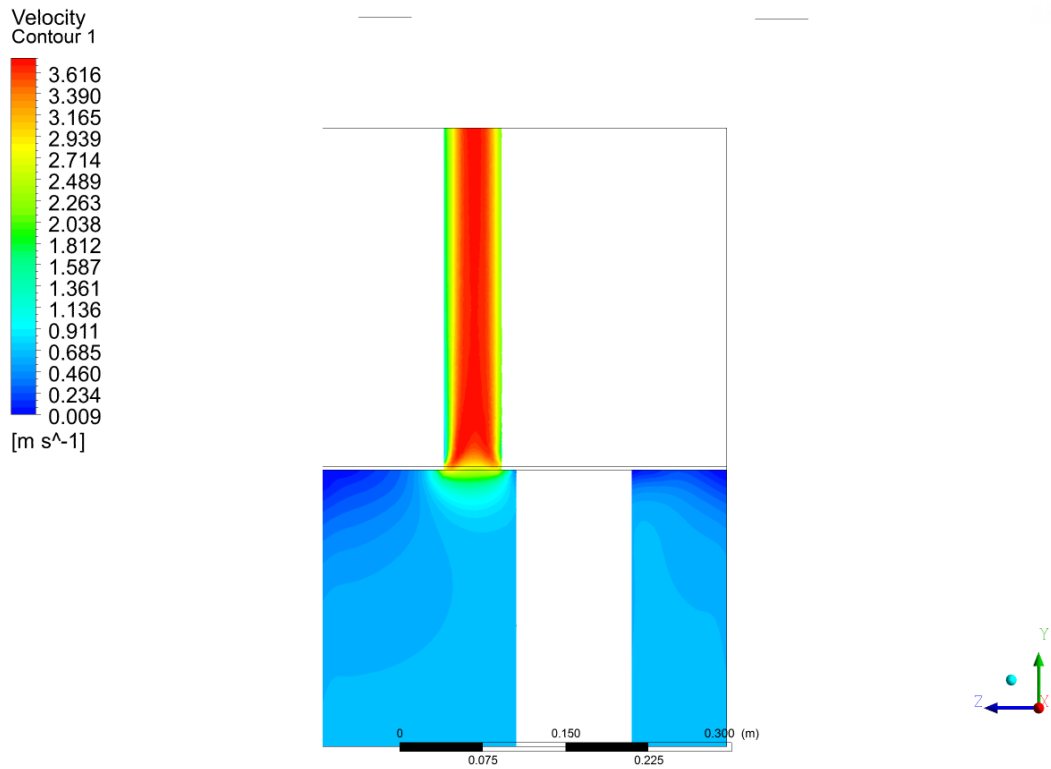


23 pav. Vandens pašilimo ir dūmų ataušimas priklausomai nuo dūmų pradinės temperatūros

23 paveiksle parodytas tyrimų apibendrinimas. Kaip buvo minėta, degimo produktų įtekėjimo temperatūra į vandens talpą nėra žinoma, todėl skaitiniai tyrimai vykdomi prie įvairių degimo produktų temperatūrų. Skaitinio tyrimo metu gauta degimo produktų temperatūra sulyginama su eksperimento matavimo vieta, kuri yra už katilo degimo produktų atvamzdžio prijungto prie kamino. Ši išmatuota temperatūra yra sulyginama su skaitinio modelio temperatūra. Prie esamos vandens talpos konfigūracijos degimo produktų temperatūra katile yra apie 350 °C, o tuo tarpu vanduo talpoje sušyla iki 5,5 °C. Grafikas rodo, kad labiausiai degimo produktai atvėstę kai jie yra karščiausi, tačiau vandens temperatūra talpoje taip sparčiai jau nedidėja. Kadangi bendru atveju reikia mažinti katilo degimo produktų temperatūrą, o ypač rusenimo laikotarpyje kuomet degimo produktų temperatūra yra apie 150 °C, vanduo vandens talpoje šyla nežymiai tačiau vis tiek dūmai yra aušinami. Iš šio grafiko galima taip pat teigti, kad degimo metu esanti per didelė degimo produktų temperatūra gali užtikrinti ir didesnio gabaritiškai bei su padidintu šilumos mainų paviršiumi talpa.

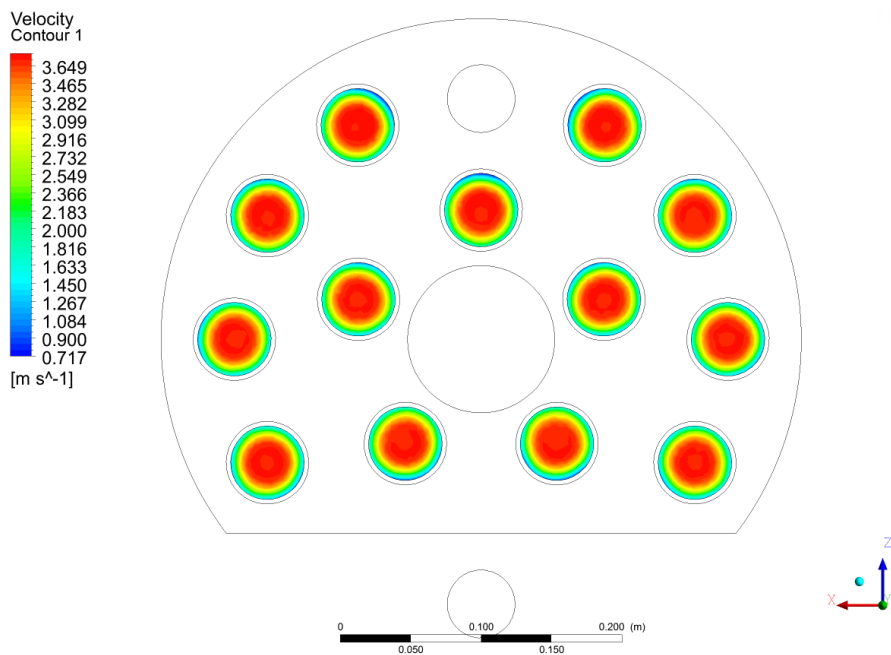
3.9. Degimo produktų ir vandens greičiai

Degimo produktų greitis katile yra nedidelis, pagal apskaičiuotą debitą gaunama, kad dūmų greitis yra apie 1 m/s (24 pav.). Įtekėjimo į vamzdžius zonoje greitis išauga iki 4 m/s. Aiškiai matomos stagnacijos zonos prie apatinės plokštės, šioje vietoje šilumos mainai silpnai vyksta, be to, išauga slėgio nuostoliai. Jeigu paliekant tokią vandens talpos konstrukciją, būtina suglotninti dūmų įtekėjimą į vamzdžius, kadangi galimi dūmų sūkuriai bei atbulinis dūmų tekėjimas.



24 pav. Degimo produktų greitis katile ir įtekėjime į vandens talpą

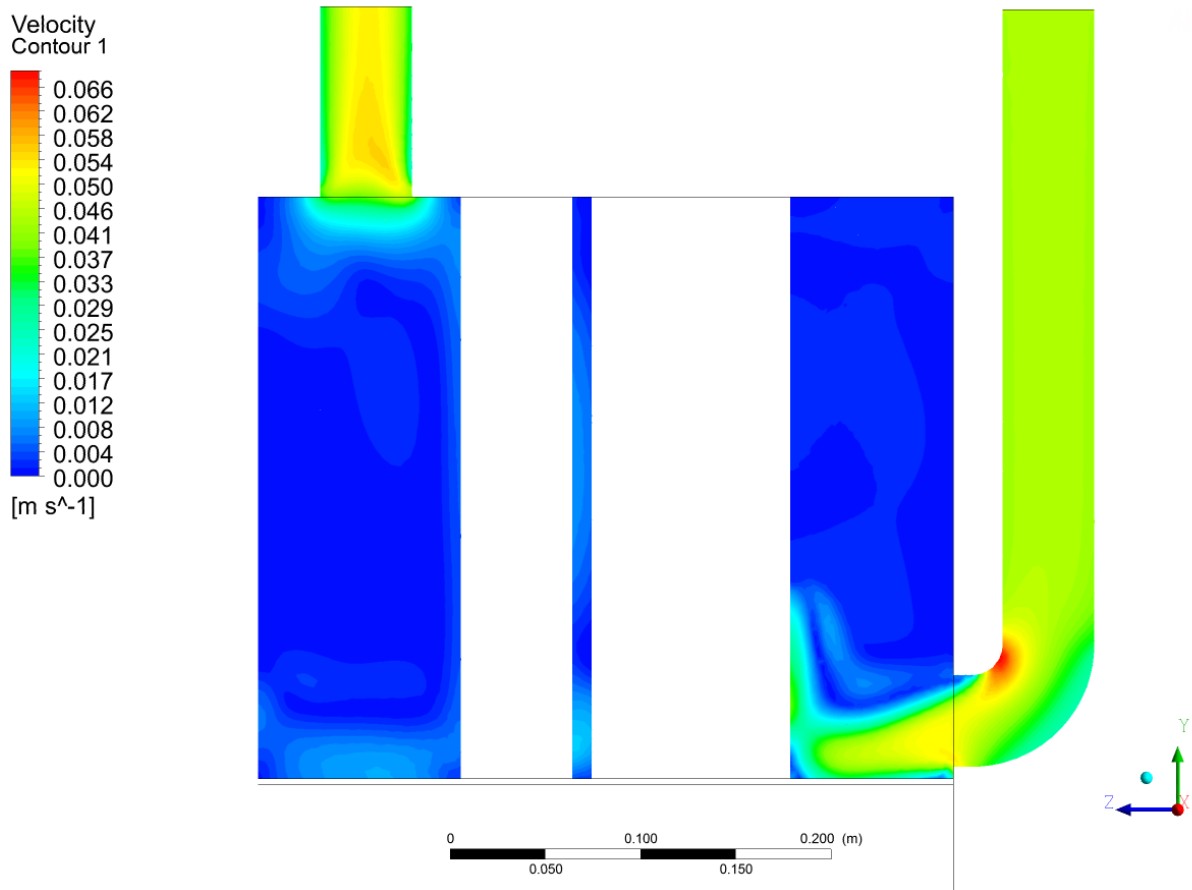
25 paveiksle parodytas dūmų greitis vandens talpos vamzdžiuose. Mažiausias greitis yra apie 0,7 m/s, o didžiausias apie 4 m/s. Degimo produktų tekėjimo profilis gana greitai susiformuoja ir pereina į turbulentinį tekėjimą



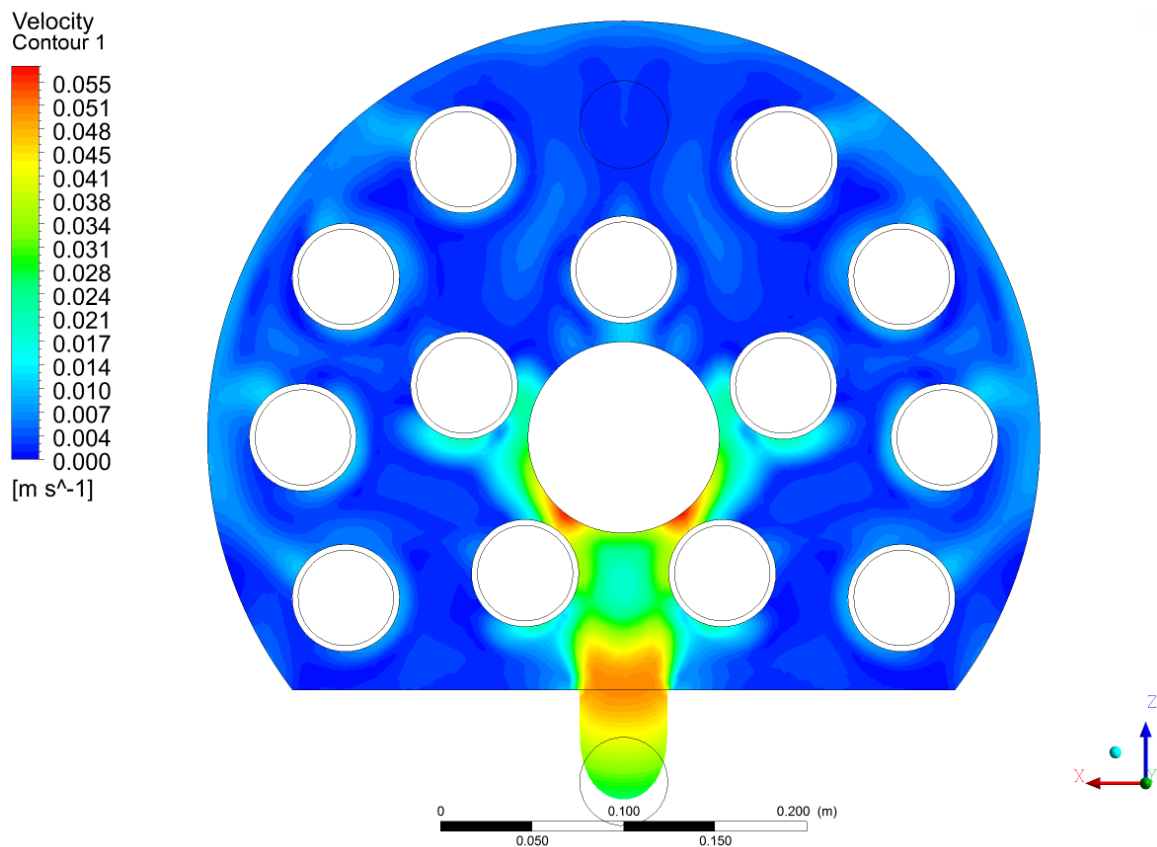
25 pav. Degimo produktų greitis vandens talpos vamzdžiuose

Vandens greičio kitimas vandens talpoje parodytas 25 paveiksle. Šiuo atveju pradinis vandens greitis įtekėjime yra apie 5,5 m/s. Toks pat greitis susidaro ir ištekėjimo atvamzdyje, kadangi tiek įtekėjimas tiek ir ištekėjimas yra pagaminti iš tokio pat skersmens vamzdžio. Įtekėjus vandeniui į talpą jo greitis staiga krenta ir teleskopinį vamzdį pasiekia visiškai sulėtėjęs. Pačioje talpoje vanduo juda nežymiai, greitis apie 0,1 m/s ir pagrinde juda dėl šylančio vandens tankio pasikeitimo.

27 paveiksle parodytas vandens greitis pjūvyje. Kaip matyti iš šio paveikslo vanduo pasiekia teleskopinį vamzdį ir jį apiplauna intensyviau negu vamzdžius kuriais teka degimo produktai. Iš to galima spręsti, kad vamzdžių išdėstymas talpoje nėra teisingas ir būtina keisti jų pozicija uždengiant teleskopinį vamzdį. Vandens sluoksniai esantys toliau nuo teleskopinio vamzdžio juda lėtai kaip ir prieš tai aprašytame 26 paveiksle.



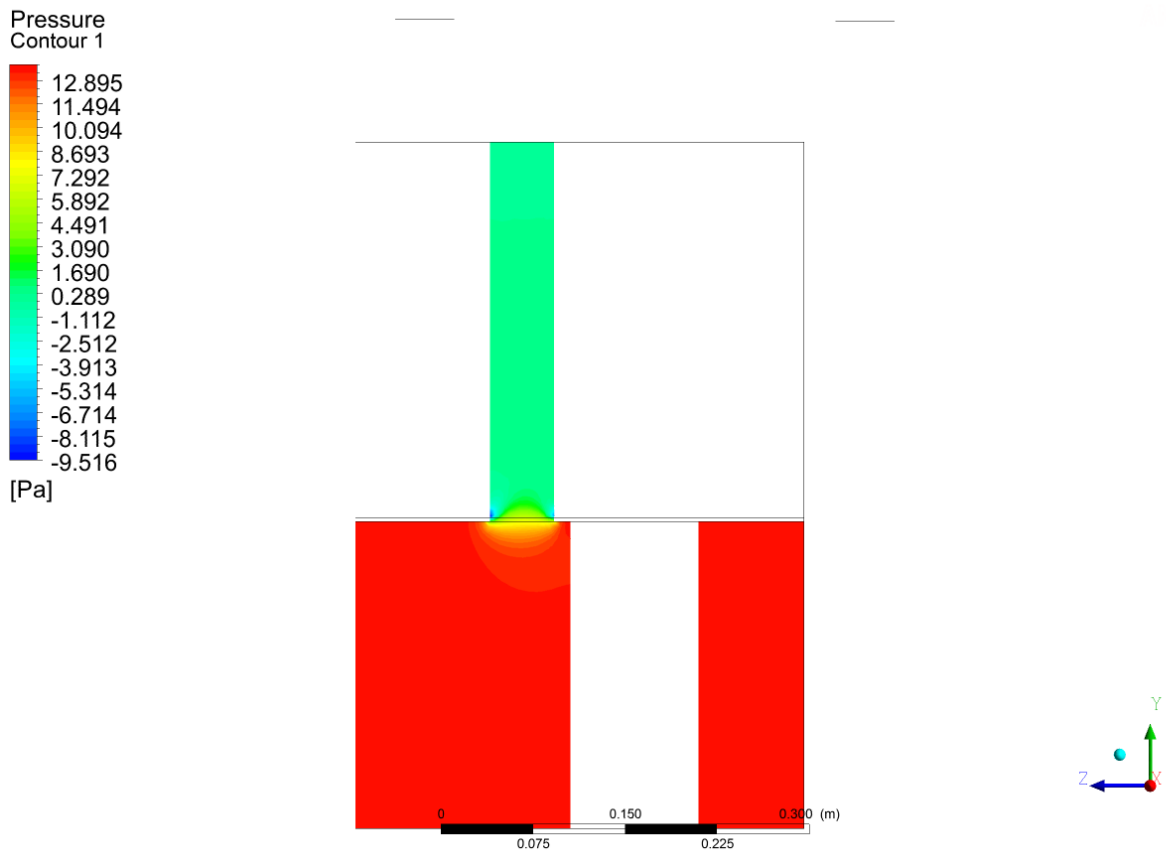
26 pav. Vandens greitis katilo vandens talpoje



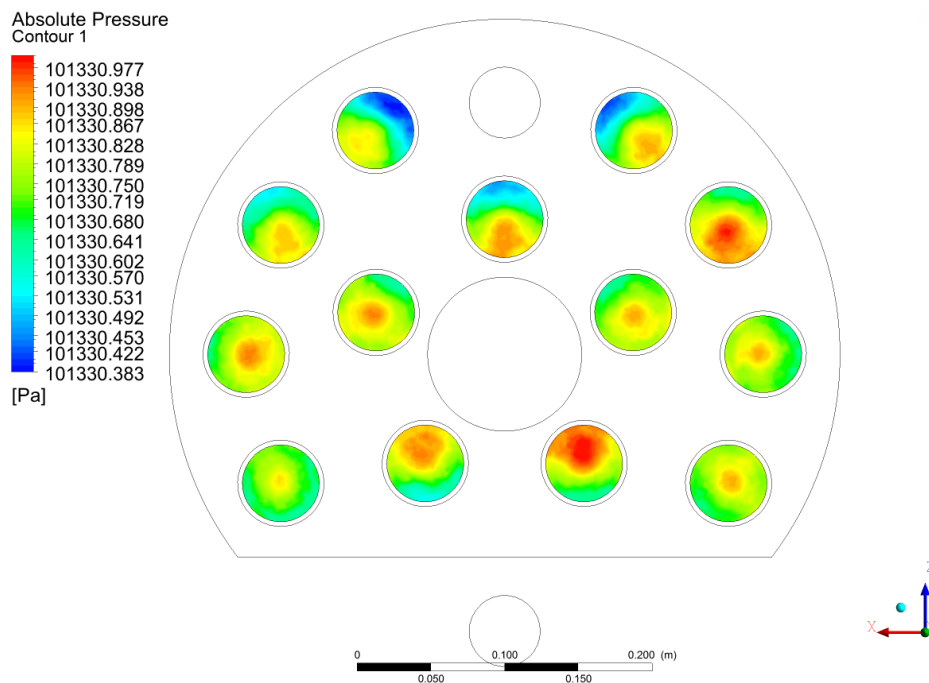
27 pav. Vandens greitis katile ir įtekėjime į vandens talpą

3.10. Slėgio nuostoliai degimo produktų ir vandens traktuose

Slėgio nuostoliai įvairiuose pjūviuose parodyti 27 ir 28 paveiksluose. Dėl vandens talpos patalpinimo į dūmų traktą išaugo slėgio nuostoliai. Šie nuostoliai sudaro apie 15 Pa vienam vamzdžiui, kadangi yra 13 vamzdžių tai suminiai slėgio nuostoliai yra 195 Pa. Esama sumontuota prie katilo standartinė dūmsiurbė yra galingesnė nei reikia, todėl pajėgia dūmus nusiurbti į kaminą.



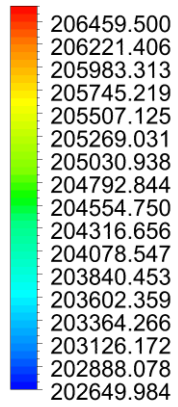
28 pav. Degimo produktų slėgio nuostoliai katile ir įtekėjime į vandens talpą



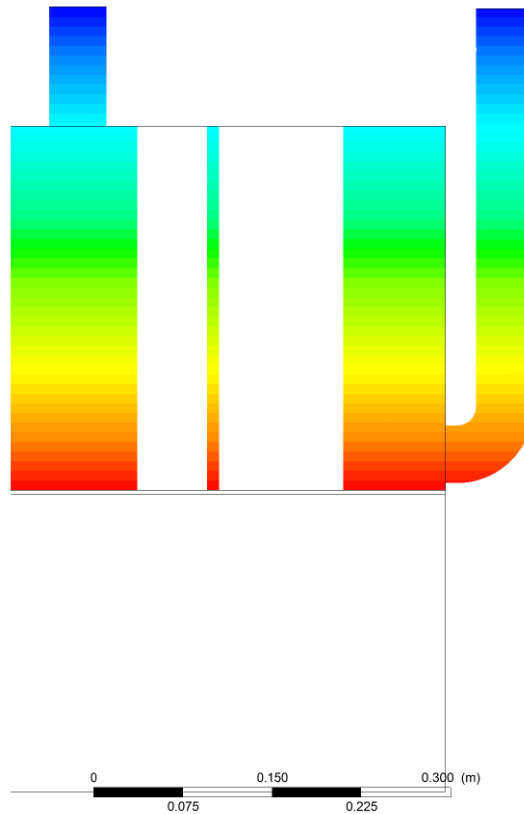
29 pav. Degimo produktų slėgio nuostoliai katilo vandens talpos vamzdžiuose

Vandens slėgio nuostoliai esantys vandens talpoje parodyti 29 ir 30 paveiksluose keliuose skirtinguose pjūviuose. Vandens slėgio nuostoliai talpoje yra apie 3 kPa. Todėl standartinių siurblių, kurie yra jungiami į šildymo sistemą su šiuo katilu turėtų užtekti.

Absolute Pressure
Contour 1

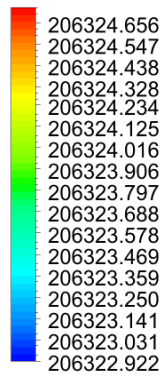


[Pa]

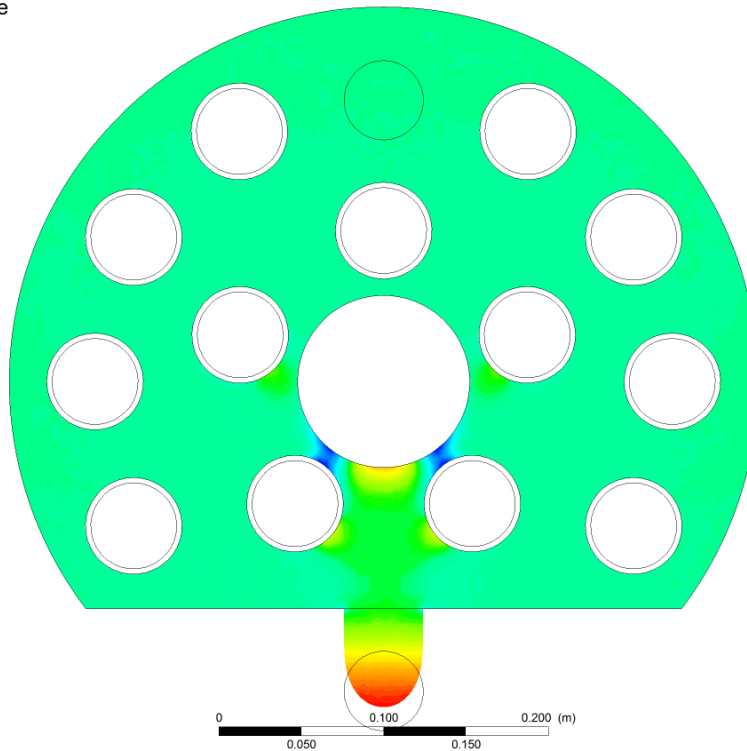


30 pav. Vandens slėgio nuostoliai katile

Absolute Pressure
Contour 1



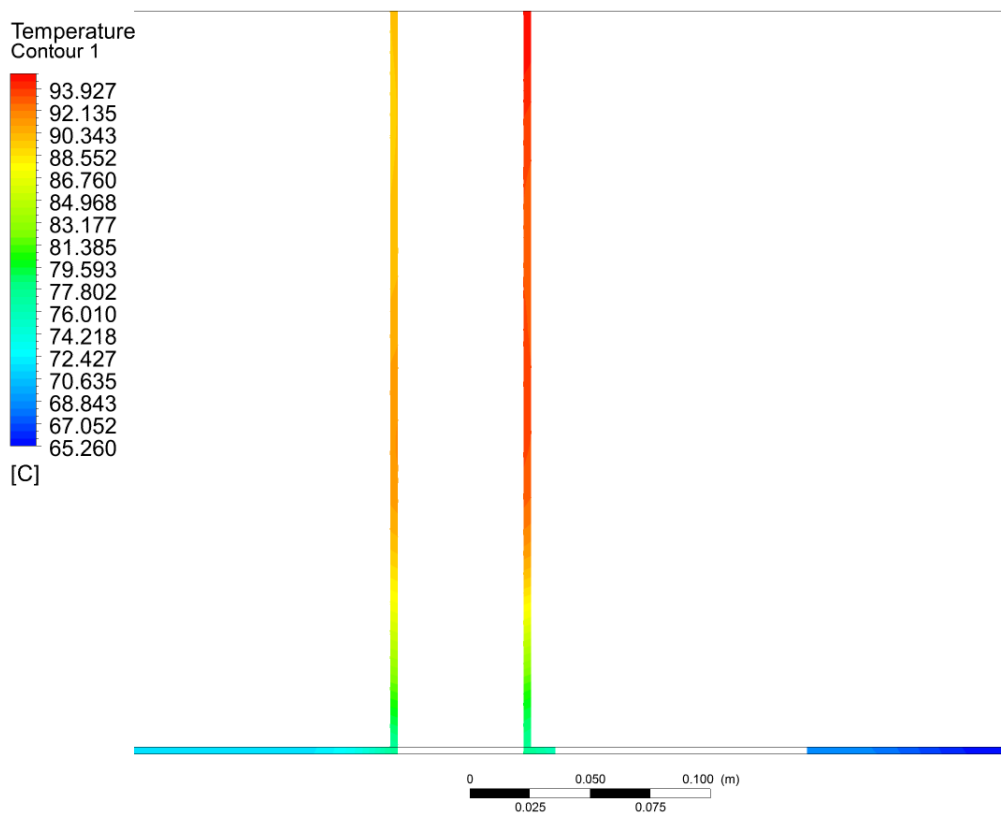
[Pa]



31 pav. Vandens slėgio nuostoliai įtekėjime į vandens talpą.

3.11. Metalo temperatūra ir šilumos atidavimo koeficientas

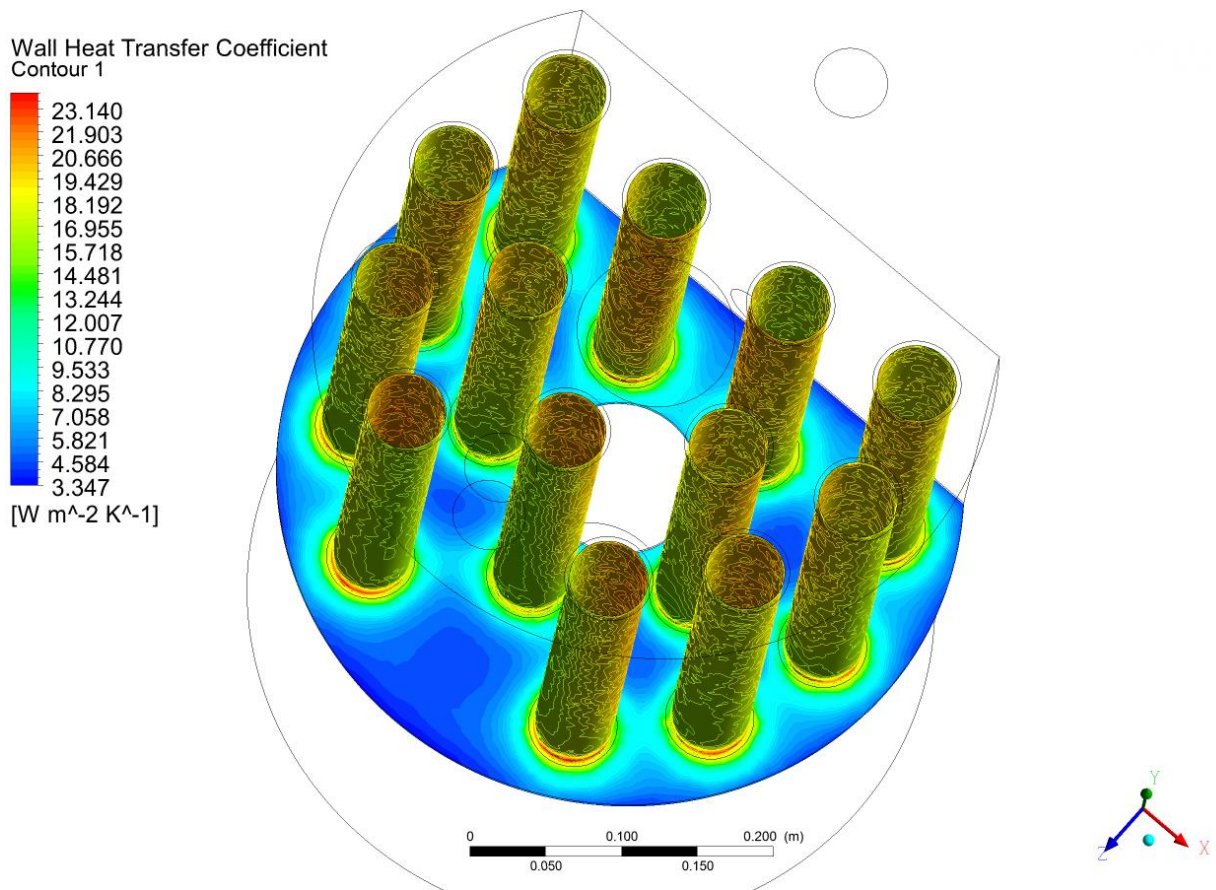
32 paveiksle parodyta metalo temperatūra vandens bakelyje. Žemiausia metalo temperatūra yra 65 °C vandens įtekėjimo zonoje. Didžiausia temperatūra yra apie 95 °C vamzdyje, kuris yra arčiausiai teleskopinio vamzdžio. Šioje vietoje yra sąlyginai mažiausias vandens kiekis, todėl metalas yra silpniau aušinamas ir greičiau įkaista.



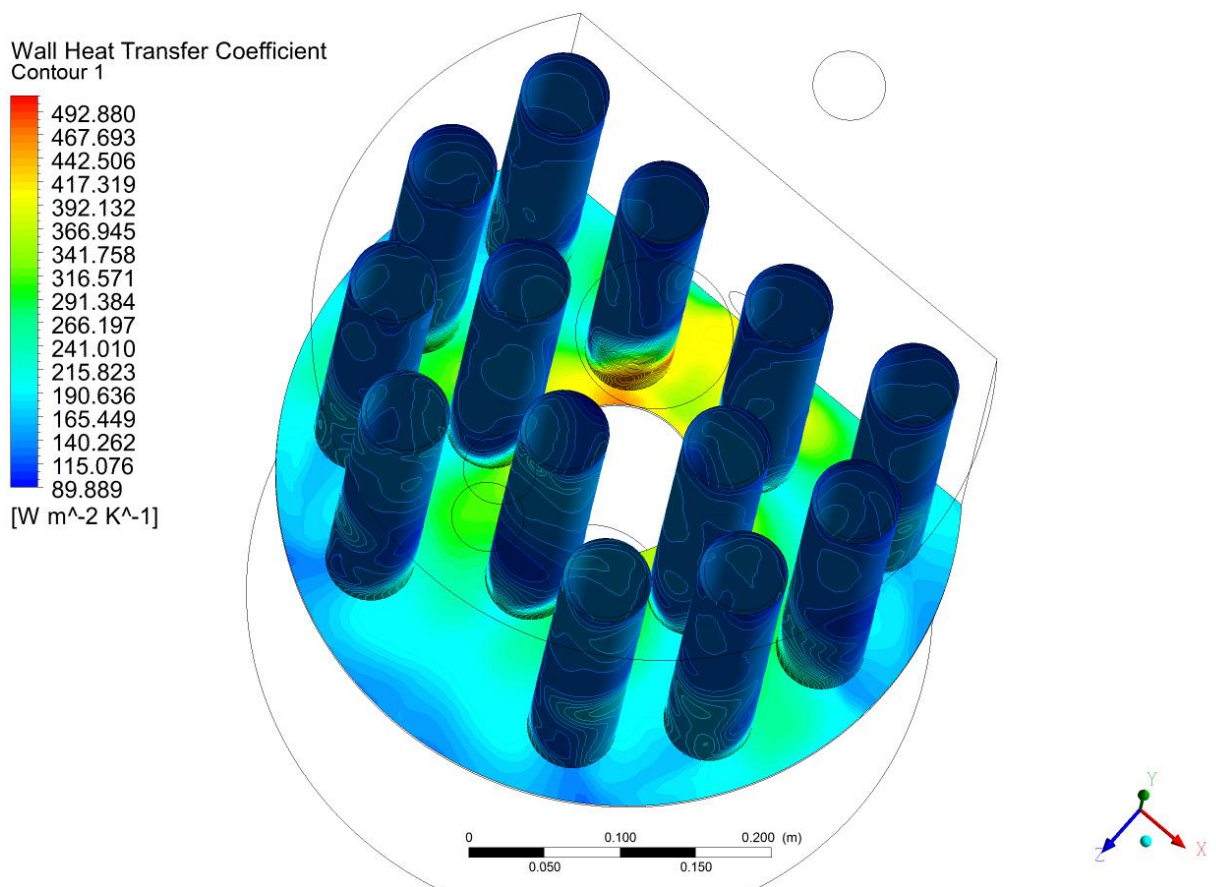
32 pav. Metalo skiriančio degimo produktus ir vandenį temperatūros kitimas

33 paveiksle pateiktas šilumos atidavimo koeficientas nuo dūmų metalui. Mažiausias šilumos atidavimo koeficientas yra apatinės plokštės periferijoje ir siekia vos 3 W/m/K. Tuo tarpu didžiausias šilumos atidavimo koeficientas yra dūmų įtekėjimo į vamzdelius zonoje kur pats didžiausias lokalus greitis ir siekia 25 W/m/K. Tekant dūmams vamzdžiais šilumos atidavimo koeficientas sumažėja iki 15 W/m/K. Vidutinis šilumos atidavimo koeficientas nuo dūmų metalui yra apie 13 W/m/K

34 paveiksle pateiktas šilumos atidavimo koeficientas nuo metalo vandeniui. Mažiausias šilumos atidavimo koeficientas yra apatinės plokštės periferijoje ir pačiuose vamzdžiuose bei siekia 90 W/m/K. Tuo tarpu didžiausias šilumos atidavimo koeficientas yra vandens įtekėjimo į vandens talpą zonoje kur pats didžiausias lokalus vandens greitis ir siekia 500 W/m/K. Tekant vandeniui talpoje šilumos atidavimo koeficientas sumažėja iki 190 W/m/K. Vidutinis šilumos atidavimo koeficientas nuo metalo vandeniui yra apie 150 W/m/K. Dėl vandens stratifikacijos, mažo vandens ir degimo produktų greičio tokioje talpoje yra labai mažas šilumos atidavimo koeficientas.



33 pav. Šilumos atidavimo koeficientas nuo dūmų metalui



34 pav. Šilumos atidavimo koeficientas nuo metalo vandeniui

3.12. Rezultatų apibendrinimas

Apibendrinant gautus rezultatus galima teigti, kad tokio katilo ir jame papildomai įdiegtos vandens talpos skaitinis modelis sudarytas tinkamai. Patikrinimas vykdytas su eksperimentiniais duomenimis gautais eksperimentinio tyrimo metu (3 lentelė). Gautas viduje vandens talpos esančio vandens temperatūros pasiskirstymas. Nustatytos zonos, kuriose silpniausiai vyksta šilumos mainai. Būtinai vandens greičio padidinimas arba vamzdžių skaičiaus vandens talpoje padidinimas iki technologiškai įmanomo maksimumo. Dėl patalpintos papildomos vandens talpos slėgio nuostoliai katile ir sistemoje išaugo nežymiai.

3 lentelė. Rezultatų patikra

Dūmų temperatūra eksperimento metu ištekėjime	340,0 °C
Dūmų temperatūra skaitinio tyrimo metu ištekėjime	341,5 °C
Santykinė paklaida	0.4%
Vandens temperatūra ištekėjime eksperimento metu	65,0 °C
Vandens temperatūra ištekėjime eksperimento metu	65,7 °C
Santykinė paklaida	1%

4. Išvados

Magistro baigiamajame darbe tiriamuoju objektu pasirinktas aptobulintas viršutinio degimo katilo „Liepsnelė 20u“ modelis. Katilo pagrindinis patobulinimas yra įdiegtas papildomas dūmavamzdis šilumokaitis. Ansys CFX programos pagalba katilas skaitmenizuotas ir ištirti termohidrodinaminiai procesai jame. Sukurtas modelis, skaitinis tinklelis ir parinktos kraštinės sąlygos patikrintos eksperimentiniais tyrimais. Tyrimo metu nustatyta, kad:

1. papildomas šilumokaitis sumažino ištekančių dūmų temperatūrą $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, o vanduo šilumokaityje vidutinškai pašilo $5,7^{\circ}\text{C}$;
2. šilumos atidavimo koeficientas nuo metalo vandeniui yra 150 W/m/K , o nuo dūmų metalui yra 13 W/m/K ;
3. Nustatytos maksimalios ir minimalios šilumos atidavimo koeficiento vietos.
4. papildomame šilumokaityje vandens srautas juda tik dėl tankių pasikeitimo, todėl toks mažas yra šilumos atidavimo koeficientas;
5. siekiant padidinti tokio šilumokaičio efektyvumą būtina padidinti jame esančių vamzdžių skaičių nuo dabar esančių 13;
6. papildomai sumontavus šilumokaitį katilo terminis naudingo veiksmo koeficientas padidėjo iki 76%;
7. kadangi papildomas šilumokaitis nėra didelis, bei jo konstrukcija nesudėtinga, susidarę slėgio nuostoliai tiek dūmų trakte tiek vanden yra nežymūs;
8. Tyrimo rezultatų santykinė paklaida yra apie 1 %.

5. Literatūra

1. Tai ko reikia. Katilai. [žiūrėta 2019-04-20] prieiga per: <http://taikoreikia.lt/kieto-kuro-katilas-liepsnel-120-20-kw>
2. M. C. Barma, R. Saidur, S. M. A. Rahman, A. Allouhi, B.A. Akash, Sadiq M. Sait. A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 970-983 [žiūrėta 2019-03-02] prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.187>
3. [žiūrėta 2019-03-02] prieiga per: <http://www.enerstena.lt/lt/vandens-%C5%A1ildymo-katilai>
4. Robert Junga, Przemyslaw Chudy, Janusz Pospolita. Uncertainty estimation of the efficiency of small-scale boilers. *Measurement*. 2017, 186-194 [žiūrėta 2019-03-11] prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.11.011>
5. Robert Junga, Przemyslaw Chudy, Janusz Pospolita. Uncertainty estimation of the efficiency of small-scale boilers. *Measurement*. 2017, 186-194 [žiūrėta 2019-04-15] prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.11.011>
6. ŠVENČIANAS, Petras. Kuro degimo teorijos pagrindai. Vadovėlis. Kaunas: Technologija, 2003 [žiūrėta 2019-05-05]. ISBN 9955095474. Prieiga per: <https://www.ebooks.ktu.lt/einfo/138/kuro-degimo-teorijos-pagrindai/>
7. Brundaban Patro. Efficiency studies of combination tube boiler. *Alexandria Engineering Journal*. 2016, 193-202 [žiūrėta 2019-04-15] prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.12.007>
8. Techninė specifikacija. (2008). Kietasis biokuras. Kieto biokuro pelenų kiekio nustatymo tyrimas (LST EN ISO 18122:2016). [žiūrėta 2019-04-15]. (naudota psl. 13)
9. M. C. Barma, R. Saidur, S. M. A. Rahman, A. Allouhi, B.A. Akash, Sadiq M. Sait. A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 970-983 [žiūrėta 2019-04-15] prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.187>
10. X. Zhang, J. Yuan, Z. Chen, Z. Tian, J. Wang, A dynamic heat transfer model to estimate the flue gas temperature in the horizontal flue of the coal-fired utility boiler, *Applied Thermal Engineering*. 135 (2018) 368-378.
11. S.N. Skinner, H. Zare-Behtash, State-of-the-art in aerodynamic shape optimisation methods, *Applied Soft Computing*. 62 (2018) 933-962.
12. V. Maakala, M. Järvinen, V. Vuorinen, Computational fluid dynamics modeling and experimental validation of heat transfer and fluid flow in the recovery boiler superheater region, *Applied Thermal Engineering*. 139 (2018) 222-238.
13. C. Schuhbauer, M. Angerer, H. Spliethoff, F. Kluger, H. Tschaffon, Coupled simulation of a tangentially hard coal fired 700°C boiler, *Fuel*. 122 (2014) 149-163.
14. CFX. Innovative turbulence modeling: Sst model in ansys cfx. Technical report, ANSYS Ltd, 2006.
15. ANSYS CFX Solver Theory Guide. Release 12.0. 2009. ANSYS Inc. Southpointe. McCormick, Barnes 1979.

16. Lee, J. J., Kang, S. K., Yoon, S. J., Park, G. C., 2005. Assessment of turbulence models in CFD code and its application to pebble bed reactor. HEFAT 4th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. Paper number: LJ3.
17. SolidWorks®3D mechanical CAD software. 1995-2011, Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, a Dassault Systèmes S.A. company, 300 Baker Avenue, Concord, Mass. 01742 USA. All Rights Reserved.