



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

PASTATŲ ENERGETIKOS KATEDRA

Artur Rubcov

ŠILUMOKAIČIO VANDUO-ORAS TYRIMAS
INVESTIGATION OF FINNED TUBE HEAT EXCHANGER

Baigiamasis magistro darbas

Pastatų energijos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621E30003

Energijos inžinerijos specializacija

Energetikos ir termoinžinerijos mokslo kryptis

Vilnius, 2017

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

PASTATŲ ENERGETIKOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Artur Rubcov

ŠILUMOKAIČIO VANDUO-ORAS TYRIMAS

INVESTIGATION OF FINNED TUBE HEAT EXCHANGER

Baigiamasis magistro darbas

Pastatų energijos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621E30003

Energijos inžinerijos specializacija

Energetikos ir termoinžinerijos mokslo kryptis

Vadovas

Doc. Sabina Paulauskaitė

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

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

Lekt. Regina Žukienė

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

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2017

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Aplinkos inžinerijos fakultetas
Pastatų energetikos katedra

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

Antrosios pakopos studijų **Pastatų energijos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas 4 (energijos inžinerija)

Pavadinimas

Šilumokaičio vanduo-oras tyrimas

Autorius

Artur Rubcov

Vadovas

Sabina Paulauskaitė

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe atliekamas šilumokaičio oras-vanduo tyrimas. Baigiamojo darbo tikslas - nustatyti šilumokaičio oras-vanduo šilumos perdavimo koeficientą, tai itin aktualu, kadangi šis koeficientas turi didžiausią įtaką siekiant parinkti optimalų šilumokaičio dydį. Darbe nagrinėjamos skirtingos šilumokaičių oras-vanduo skaičiavimo metodikos vėsinimo režimu, atliekamas metodikų vertinimas pagal skaičiavimo tikslumo ir paprastumo kriterijus. Darbe pateikiami eksperimentinio tyrimo šilumokaičio oras-vanduo su nestandartinės formos plokštelėmis rezultatai, nustatoma šių šilumokaičių šilumos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo įvairių parametrų (šilumokaičio vamzdelių eilių skaičiaus, atstumo tarp plokštelių, plokštelės storio, vamzdelio diametro, oro srauto). Gauti tyrimo rezultatai palyginami su rezultatais, gautais kituose moksliniuose darbuose. Darbe pateikti šilumokaičio modeliavimo baigtinių elementų metodu rezultatai, kurie palyginami su rezultatais gautais eksperimentiniu būdu. Atlikus šilumokaičio oras-vanduo tyrimą, pateikiamos baigiamojo darbo išvados ir rekomendacijos.

Prasminiai žodžiai: šilumokaitis oras-vanduo, šilumos mainų modeliavimas, baigtinių elementų metodas, oro vėsinimas, oro pasienio sluoksnis, šilumos perdavimo koeficientas.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Environmental Engineering
Department of Building Energetics

ISBN	ISSN
Copies No.	
Date-.....-.....	

Master Degree Studies **Building Energy Engineering** study programme Master Graduation Thesis 4 (Energy Engineering)

Title

Investigation of Finned Tube Heat Exchanger

Author

Artur Rubcov

Academic supervisor

Sabina Paulauskaitė

Thesis language: Lithuanian

Annotation

In this master thesis fin and tube heat exchanger is investigated. The aim of this thesis is determination of air side heat transfer performance of fin and tube heat exchanger, this parameter very important, because it has big influence during selection heat exchanger size. At this paper different calculating methods of heat exchanger are analyzed during cooling mode. This work provides results of experiments of a wavy-herringbone fin and tube heat exchanger, also correlation of heat transfer performance are determined dependence on different parameters (number of tube rows, fin pitch, fin thickness, tube diameter and air flow). Results of this research are compared with results of other researches and results of modelling using finite element method. Furthermore at the end conclusions and recommendations has been given.

Keywords: fin and tube heat exchanger, wavy-herringbone fin, finite element method, air cooling, air side performance, heat transfer coefficient

Turinys

Ivadas	7
1. Įrenginių apžvalga	9
2. Skaičiavimo metodikos ir prielaidos	11
2.1. Pagrindinės skaičiavimo lygtys	12
2.2. Lewis'o skaičiaus prielaida	14
2.3. Entalpijų skirtumo prielaida	14
2.4. Fiktyvios oro entalpijos prielaida	15
2.5. Logaritminio entalpijų skirtumo metodas.....	17
2.6. Logaritminio temperatūrų skirtumo metodas	18
2.7. Šilumos perdavimo vienetų skaičiaus efektyvumo metodas	19
2.8. Kondensato atsiradimo vieta	19
2.9. Apžvalgos apibendrinimas	20
3. Darbo tyrimo Skaičiavimo metodika.....	21
4. Eksperimentinis bandymas	27
4.1. Naudojama įranga.....	27
4.2. Bandomieji šilumokaičiai	31
4.3. Eksperimentinių bandymų eiga ir rezultatai	33
4.4. Rezultatų palyginimas su kitais moksliniais darbais	38
5. Šilumokaičio modeliavimas baigtinių elementų metodu.....	42
5.1. Modeliavimo eigos aprašymas	42
5.2. Modeliavimo rezultatai.....	44
6. Išvados ir rekomendacijos	48
Literatūra	50
Priedai.....	52

IVADAS

Pastaruoju metu dėl griežtėjančių pastatams keliamų energinio naudingumo reikalavimų, vis dažniau yra įrengiamos mechaninės vėdinimo sistemos, kurios užtikrina reikiamą patalpų oro apykaitą bei oro kokybę. Mechaninę vėdinimo sistemą sudaro ortakių sistema bei vėdinimo įrenginys, kuriame lauko oras yra paruošiamas tiekti į patalpas. Standartinį vėdinimo įrenginį sudaro tokie elementai: ventiliatoriai – oro srautui sukurti, filtrai – kietosioms dalelėms ir dulkėms sulaikyti, šilumogrąžos įrenginys – šviežią oro sušildyti ir atgauti šilumą iš šalinamo oro, bei šilumokaičiai, kurie priklausomai nuo lauko oro temperatūros sušildo arba atvėsina orą iki reikiamos temperatūros.

Yra atlikta daugybė mokslinių tyrimų, įrodančių, kad patalpų mikroklimatas daro didelę įtaką žmogaus sveikatai ir darbingumui. Visų metų laikotarpyje labai svarbu paruošti tokį orą, kuris sudarytų komforto sąlygas žmogui. Vasara šviežią orą dažniausiai tenka vėsinti, o žiemos metu sušildyti iki reikiamos temperatūros. Dėl to projektavimo metu itin svarbu parinkti tokio galingumo šilumokaitį, kuris galėtų užtikrinti projektines sąlygas, bei nebūtų per didelis, nes tai padidintų energijos sąnaudas visos eksploatacijos metu.

Kiekvienas šilumokaičių gamintojas siekia, kad jo gaminiai būtų efektyviausi šilumos perdavimo ir aerodinaminiu požiūriu, todėl besivystant įrangai atsirado didelė šilumokaičių įvairovė. Šilumos mainams šilumokaityje daro įtaką tokie parametrai: vertikalus ir horizontalus atstumas tarp vamzdelių, vamzdelio skersmuo, vamzdelių išdėstymas (šachmatinis ir koridorinis), atstumas tarp plokštelių, plokštelės storis ir jos geometrija (plokščia, banguota, gofruota, dygliuota ir jų kombinacijos). Yra daugybė mokslinių darbų, kuriuose yra analizuojami įvairiausių tipų šilumokaičiai. Moksliniais tyrimais yra siekiama nustatyti oro pasienio sluoksnio šilumos perdavimo priklausomybę, tačiau nei vieno darbo modelis neatitinka *Komfovent* gaminamų šilumokaičių, todėl šiame darbe yra nagrinėjami šio gamintojo šilumokaičiai šilumos mainų požiūriu ir atliekama skaičiavimų metodikų analizė.

Tyrimo objektas

Šio magistro darbo objektas – šilumokaičio oras-vanduo tyrimas, esant vėsinimo režimui.

Problema, darbo tikslas, uždaviniai

Pastato projektavimo metu tiek projektuotojams, tiek ir įrangos gamintojų tiekėjams labai svarbu turėti tokią įrenginio parinkimo programą, kuri per trumpą laiko tarpą sugebėtų parinkti optimalaus dydžio ir konfigūracijos įrenginį. Parinkus mažą šilumokaitį – nėra užtikrinamos projektinės sąlygos, parinkus per didelį - išauga investicijos ir eksploatacijos išlaidos. Šilumokaičio oras-vanduo parinkimo metu skaičiavimuose atsiranda sunkumų, kai susiduriama ne tik su šilumos, bet ir su masės mainais.

Baigiamojo darbo tikslas – išnagrinėti plokštelių šilumokaičių oras-vanduo skaičiavimo metodikas, esant vėsinimo režimui, ir, remiantis teorinių bei eksperimentinių tyrimų rezultatais, pasiūlyti tokį skaičiavimo metodą, kuris nereikalautų didelių kompiuterinių resursų, o skaičiavimo rezultatas būtų pakankamai tikslus.

Keliami uždaviniai:

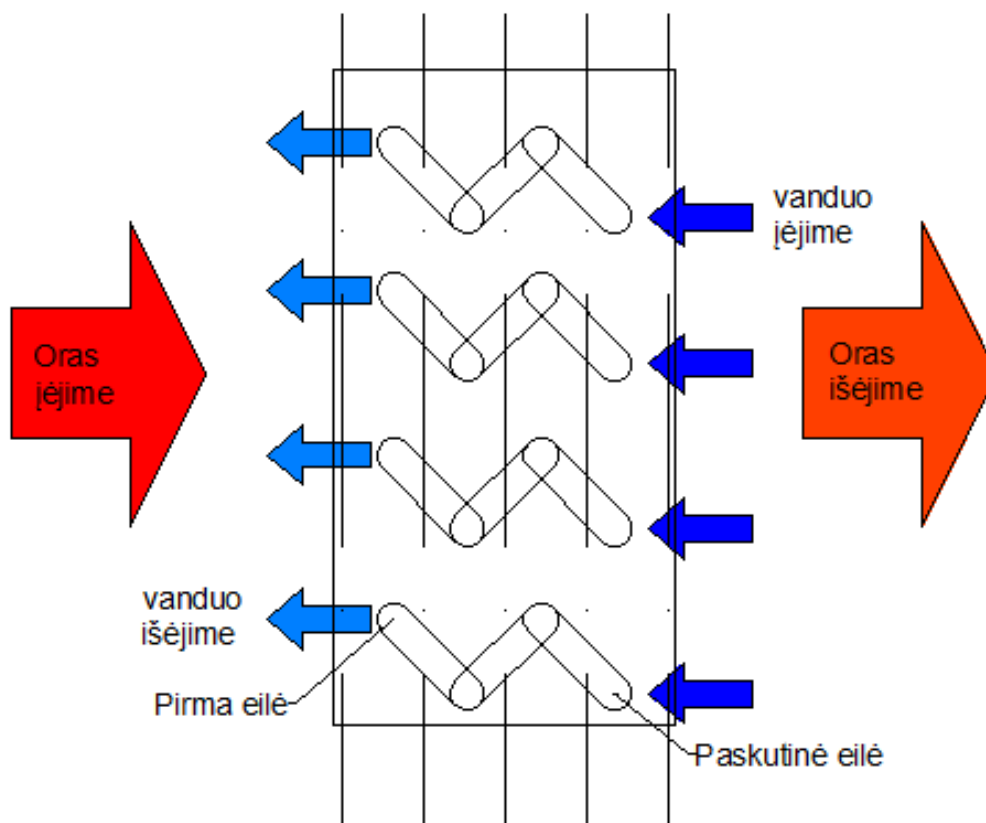
- Išnagrinėti esamas skaičiavimo metodikas, pasirinkti optimalią ir pagal ją atlikti skaičiavimus;
- Atlikti eksperimentinį bandymą;
- Atlikti modeliavimą naudojant baigtinių elementų metodą;
- Palyginti gautus rezultatus su modeliavimo rezultatais ir kitais moksliniais darbais;
- Padaryti išvadas ir pateikti rekomendacijas.

1. ĮRENGINIŲ APŽVALGA

Oro paruošimo įrenginiuose, be šilumogrąžos įrenginių, orui vėsinti naudojami papildomi šilumokaičiai, kurie būna dviejų tipų: vienuose šaltnešiu naudojamas vanduo, kituose - freonas.

Vandeniniai šilumokaičiai

Orui vėsinti dažniau naudojami vandeniniai šilumokaičiai, kurie taip pat būna dviejų rūšių: kai šaltnešiu naudojamas tik vanduo, ir, kai naudojamas vandens ir propilenglikolio mišinys, kuris neleidžia šaltnešiui užšalti. Antruoju atveju skaičiavimo principas lieka toks pat, kaip ir naudojant vien vandenį, tik pasikeičia šaltnešio fizinės savybės. Šilumokaičio schema pavaizduota 1 paveiksle.



1 pav. Šilumokaičio oras-vanduo schema

Šių šilumokaičių privalumai:

- Didesni atstumai iki šalčio mašinos;
- Mažesnis freono kiekis sistemoje;
- Kelių šilumokaičių prijungimas prie vienos sistemos.

Freoniniai šilumokaičiai

Šie šilumokaičiai naudojami tada, kai šalčio mašina yra arti vėdinimo įrenginio, arba kai šilumos siurblys yra įrengtas oro paruošimo įrenginyje. Taip pat šie šilumokaičiai naudojami patalpų šaldymui, pavyzdžiui, sandėliuose, skirtuose laikyti šaldytą produkciją. Šio tipo šilumokaitis skiriasi nuo vandeninio tuo, kad freonas, patekęs į šilumokaitį, pasiimdamas šilumą iš oro garuoja ir iš šilumokaičio išeina garų pavidalu.

Šių šilumokaičių privalumai:

- Gali atšaldyti orą iki žemesnės temperatūros;
- Nereikia papildomo šilumokaičio;
- Šilumos siurblio panaudojimas vėdinimo įrenginyje.

2. SKAIČIAVIMO METODIKOS IR PRIELAIIDOS

Šilumos mainų perdavimas šilumokaityje yra detaliai išnagrinėtas esant oro vėsinimui be vandens garų kondensavimosi. Yra keletas metodų, kuriais naudojantis galima tiksliai apskaičiuoti šilumokaičio galią be kondensacijos. Šie metodai remiasi logaritminiu temperatūrų skirtumu (angl. *Log Mean Temperature Difference – LMTD*) (Xie 2009) arba šilumos perdavimo vienetų skaičiaus efektyvumu (angl. *Effectiveness Number of Transfer Units – Eff-NTU*) (Taylor 2004). Sunkumai atsiranda tuomet, kai nagrinėjamas šilumokaitis ne tik atvėsina orą, bet ir sausina jį. Sausinimo procesas apsunkina skaičiavimus, kai reikia įvertinti šilumos ir masės mainus.

Sprendžiant šią problemą skirtingi autoriai siūlo skirtingas prielaidas, kurios palengvina skaičiavimą. Siūlomos prielaidos yra labai skirtingos, kadangi jos buvo priimtos esant skirtingiems laikotarpiams, kompiuteriniams resursams ir nevienodai išsivysčiusioms technologijoms. Anksčiau skaičiavimuose buvo priimamos tokios prielaidos, kad būtų įmanoma išspręsti uždavinį analitiniais skaičiavimais, tačiau besivystant technologijoms, buvo kuriami tokie modeliai, kurių neįmanoma išspręsti be kompiuterinių programų. Skaičiavimams prireikė didelių kompiuterinių resursų, tačiau gaunami rezultatai turėjo didesnę tikslumą.

Šiame darbe yra nagrinėjami skirtingų autorių skaičiavimų modeliai, kurie remiasi skirtingais metodais ir prielaidomis. Skirtingi autoriai naudojo įvairius metodus: vidutinio logaritminio entalpijų skirtumo (*logarithmic mean enthalpy difference – LMED*), vidutinio logaritminio temperatūrų skirtumo (*LMTD*) ir šilumos perdavimo vienetų skaičiaus efektyvumo (*Effectiveness-NTU*). Autorių metodai ir jų naudojamos prielaidos pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Autorių naudojami metodai ir prielaidos

Autorius	Metai	Metodai			Prielaidos		
		LMED	LMTD	Eff-NTU	Entalpijų skirtumo	Lewis'o skaičius lygus 1	Fiktyvios entalpijos
W. Goodman	1938	+			+	+	+
C.D. Ware	1960		+		+	+	+
F. C. McQuiston	1975		+				
J.E. Braun	1989			+	+	+	+
P. A. Domanski	1991		+			+	
F. C. McQuiston	2000	+			+	+	
AHRI	2001	+			+	+	
J. Wang	2003			+	+	+	
W. Pirompugd	2008	+			+	+	+
L. Xia	2009		+		+		+
M. Khamis Monsour	2012			+	+	+	

Be skirtingų metodų ir prielaidų, autoriai savo skaičiavimuose nevertina kai kurių šiluminių varžų, pavyzdžiui, kondensato arba nuosėdų vamzdžio viduje. Autorių naudojamos šiluminės varžos pateiktos 2 lentelėje.

2 lentelė. Autorių skaičiavimuose naudojamos varžos

Autorius	Metai	Varžos tipas					
		Konvekcija oro pusėje	Kondensato plėvelė	Vamzdelio sienelės ir plokštelės	Konvekcija šaltnešio pusėje	Vamzdelio ir plokštelės kontaktas	Nuosėdos vamzdžio viduje
W. Goodman	1938	+			+		
C.D. Ware	1960	+			+		
F. C. McQuiston	1975	+		+	+		
J.E. Braun	1989	+		+	+		
P. A. Domanski	1991	+	+	+	+	+	
F. C. McQuiston	2000	+			+		
AHRI	2001	+		+	+		+
J. Wang	2003	+		+	+		
W. Pirompugd	2008	+	+	+	+		
L. Xia	2009	+			+		
M. Khamis Monsour	2012	+			+		

Tolimesniame baigiamojo darbo etape, atliekant skaičiavimus bus naudojamos šios varžos: oro ir vandens pasienio sluoksnių varžos, vamzdelio sienelės bei plokštelės varža. Likusios varžos sudaro labai mažą dalį nuo bendros varžos, todėl didelės įtakos rezultatui neturės.

2.1. Pagrindinės skaičiavimo lygtys

Šiame skyriuje aprašomos pagrindinės lygtys ir prielaidos, kuriomis naudojami autoriai savo modeliuose. Visų modelių bazinė skaičiavimo lygtis yra (C. Wang 2007):

$$\frac{Q}{A} = h_a(t_a - t_s) + h_{mass}(w_a - w_s)i_w \quad (1)$$

Čia:

Q – šilumos srautas (W),

A – šilumokaičio išorinis plotas (m^2),

h_a – oro pasienio sluoksnio šilumos perdavimo koeficientas ($W/(^{\circ}C \ m^2)$),

t_a ir t_s – oro ir paviršiaus temperatūros ($^{\circ}C$),

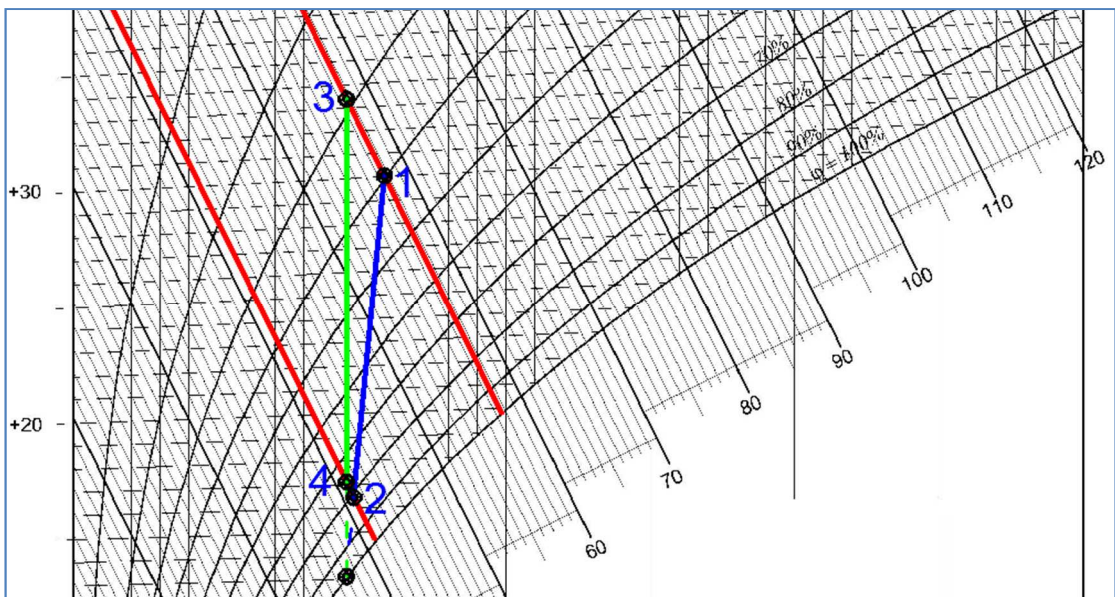
h_{mass} – oro pasienio sluoksnio masės perdavimo koeficientas ($\text{kg}/(\text{s m}^2)$),

w_a ir w_s – vandens garų kiekis ore ir prie paviršiaus (g/kg),

h_w – vandens entalpija (kJ/kg).

Kai kurie autoriai (P. A. Domanski , J. Wang) sukūrė tokius modelius, kuriuose naudoja šią lygtį kaip pagrindinę (Jiang 2006). Tokiu būdu jie apsunkina skaičiavimą, tačiau gauna tikslesnį rezultatą. Likusieji autoriai naudoja supaprastintą anksčiau minėtos formulės variantą, pasitelkdami entalpijos potencialo prielaidą, kuri bus aptarta vėliau.

Išimtį sudaro J. Wango sukurtas metodas, kuris vadinasi ekvivalentinės sauso termometro temperatūros metodu. Jame randamas ekvivalentinis sauso vėsinimo procesas ir tokiu būdu randama šilumokaičio galia (Wang 2003). J. Wang`as apibrėžia tris šilumokaičio būsenas: visiškai šlapias, iš dalies šlapias ir sausas. Kiekvienai iš jų yra sudarytos skirtingos skaičiavimo lygtys. Šis metodas patogus tuo, kad apibrėžiant šilumokaičio būseną nereikalaujama iteracijų. Kuriant šį metodą buvo siekiama palengvinti šilumokaičio skaičiavimą, tačiau sunku teigti, kad šis metodas yra paprastesnis už kitus. Šio metodo principas pateiktas 2 paveiksle.



2 pav. Ekvivalentinių sauso termometro temperatūrų metodas

1–2 procesas vaizduoja realų procesą, tuo tarpu 3–4 vaizduoja ekvivalentinį procesą procesui 1–2. Tokiu būdu naudojant ekvivalentines temperatūras 3 ir 4 randama šilumokaičio galia.

2.2. Lewis`o skaičiaus prielaida

Atliekant skaičiavimus pagal 1 formulę sunku nustatyti masės perdavimo koeficientą $[h_m]$, todėl Lewis`as pasiūlė naudoti išraišką (Xia 2009), kuri padėtų lengvai apibūdinti masės mainus:

$$Le^{2/3} = \frac{h_a}{c_{p,a} h_{mass}} \quad (2)$$

Čia:

Le – Lewis`o skaičius,

$c_{p,a}$ – oro savitoji šiluma (kJ/(kg°C)).

Daugelis autorių (išskyrus F. C. McQuiston ir L. Xia) priima prielaidą, jog Lewis`o skaičius lygus vienetui. Nors ši prielaida palengvina skaičiavimą, tačiau ji daro įtaką rezultato tikslumui. L. Xia nagrinėjo kokią įtaką Lewis`o skaičius daro rezultato tikslumui 0,6 ... 1,4 ribose ir padarė išvadas, kad šiose ribose šilumokaičio galios nuokrypis svyruoja nuo -18 % iki 15 %.

2.3. Entalpijų skirtumo prielaida

Dažniausiai kartu su entalpijos skirtumų prielaida yra naudojama Lewis`o skaičiaus prielaida. Tokiu būdu naudojant Lewis`o skaičių (2) lygtis supaprastinama iki tokio pavidalo:

$$\frac{Q}{A} = h_{mass} [(i_a - i_s) - (w_a - w_s) i_w - w_a c_{p,vapour} (t_a - t_s)] \quad (3)$$

Čia:

A – išorinis paviršiaus plotas (m²),

i_a – oro entalpija (kJ/kg),

i_s – prisotinto oro entalpija esant paviršiaus temperatūrai (kJ/kg),

i_w – vandens entalpija (kJ/kg),

w_a – drėgmės kiekis ore (kg/kg),

w_s – drėgmės kiekis ties paviršiumi (kg/kg),

$c_{p,vapour}$ – vandens garų savitoji šiluma (kJ/(kg°C)),

t_a ir t_s – oro ir paviršiaus temperatūros (°C).

Šioje lygtyje dešinėje pusėje pirmas narys vertina oro entalpijos potencialą, antras narys vertina santykinės drėgmės potencialą, paskutinis narys vertina vandens garų temperatūros potencialą.

Susikondensavusio vandens ir vandens garų entalpijos pasikeitimas yra nežymus palyginus su oro entalpijų skirtumu, (AHRI 2001) todėl dažnai antras ir trečias nariai yra nevertinami ir tuomet lygtis supaprastinama iki (4) formulės. Ši formulė dažnai vadinama entalpijų skirtumų lygtimi.

$$\frac{Q}{A} = h_{mass}(i_a - i_s) \quad (4)$$

Ši lygtis įvertina šilumos ir masės mainus, todėl dauguma autorių (W. Godman, J. L. Threkeld, J. E. Braun, F. C. McQuiston, J. Wang ir E. Hihara, L. Xia) savo darbuose naudoja šią formulę.

2.4. Fiktyvios oro entalpijos prielaida

Ši prielaida yra naudojama tada, kai visus šilumos ir masės mainus visuose šilumokaičio taškuose norima išreikšti naudojant entalpijų skirtumą. Tam yra naudojama fiktyvios oro entalpijos prielaida. Visos temperatūros naudojamos skaičiavimuose, išskyrus oro temperatūrą, yra išreiškiamos fiktyvia entalpija, kuri lygi prisotinto oro entalpijai prie nagrinėjamos temperatūros. Sprendžiant diferencialines lygtis dėl prisotinto oro entalpijos aukštos eilės polinomės atsiranda sunkumų, todėl fiktyvi entalpija išreiškiama tiesine lygtimi. Fiktyvios entalpijos tiesė yra prisotinto oro entalpijos liestinė prie nagrinėjamos temperatūros ir išreiškiama lygtimi:

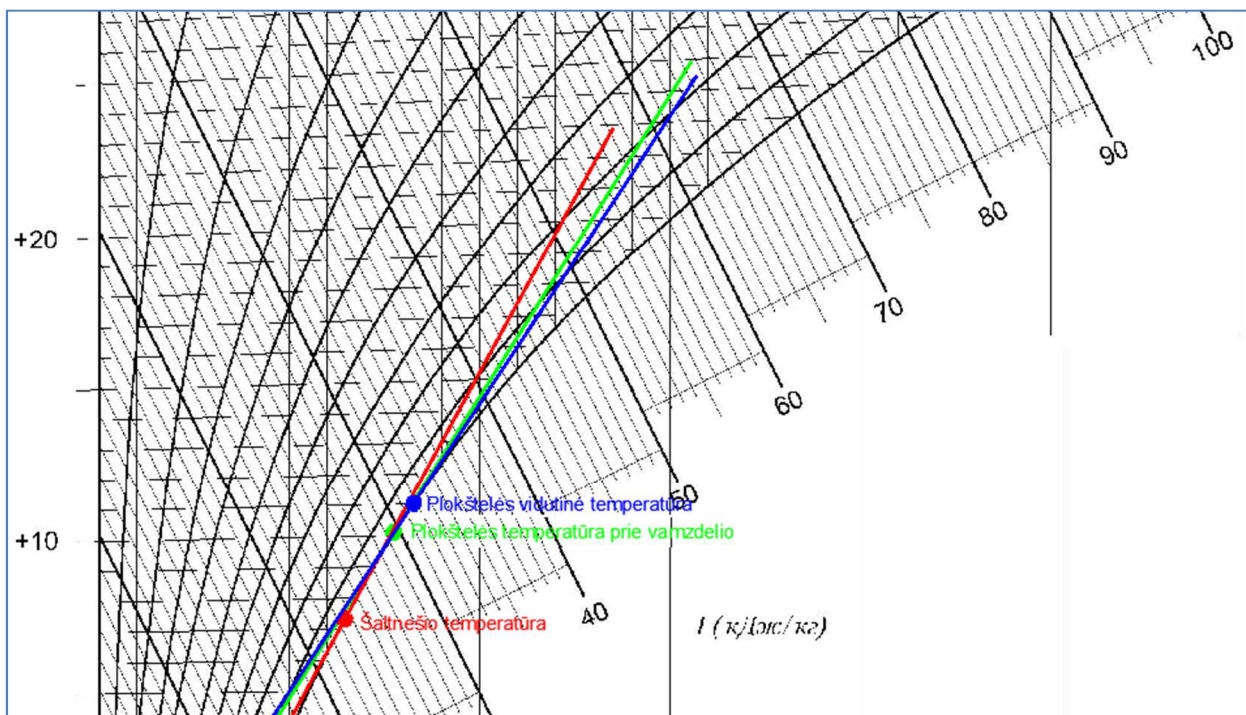
$$i' = a + bt \quad (5)$$

Čia:

i' – fiktyvi entalpija (kJ/kg),

a ir b – koeficientai aprašantys entalpijos kitimą.

3 paveiksle pateiktos trys tiesinės aproksimacijos skirtingoms temperatūroms: šaltnešiui, plokštelės temperatūrai prie vamzdelio, skaičiuotinai plokštelės paviršiaus temperatūrai. Tai pagrindinės temperatūros, kurias naudojami šilumokaičio skaičiavimuose.



3 pav. Fiktyvios oro entalpijos metodo pavyzdys

6–8 formulėse pateiktas fiktyvios entalpijos naudojimas šilumos perdavime tarp šaltnešio ir vamzdelio vidinės paviršiaus temperatūros.

$$Q = Ah_i(t_{s,i} - t_w), \quad W \quad (6)$$

Čia:

$t_{s,i}$ – vidinio paviršiaus temperatūra (°C),

t_w – vandens temperatūra (°C),

A – vidinis paviršiaus plotas (m²),

h_i – vandens pasienio sluoksnio šilumos perdavimo koeficientas (W/(°C m²)).

Ištačius fiktyvios entalpijos lygtį 5 į 4 gauname tokią išraišką:

$$Q = Ah_i \left(\frac{i_{s,i} - a_{s,i}}{b_{s,i}} - \frac{i_w - a_w}{b_w} \right) \quad (7)$$

Nagrinėjimų autorių darbuose koeficientas „a“ dažniausiai yra nevertinamas. Autoriai, kurie naudoja fiktyvios entalpijos prielaidą supaprastina formulėje naudojamus skirtingus „b“ koeficientus ir vietoje jų naudoja jų vidurkį. Anot C. D. Ware'o tarp vandens ir skaičiuotinos plokštelės fiktyvių entalpijų tiesių skirtumas neviršija 10 %, o tai savo ruožtu sudaro 2 % paklaidą nuo bendros šiluminės varžos tarp oro ir šaltnešio (Kastl 2012). Supaprastinus minėtus koeficientus gauname tokią lygtį:

$$Q = Ah_i \left(\frac{\hat{i}_{s,i} - \hat{i}_w}{b} \right) \quad (8)$$

Šio metodo trūkumas yra tas, jog šis metodas tampa iteratyvus, kai reikia nustatyti paviršiaus temperatūras. Paviršiaus temperatūros yra priimamos, tuomet nustatoma šilumokaičio galia ir galiausiai daromas patikrinimas ar apskaičiuotos paviršiaus temperatūros sutampa su priimtosiomis.

2.5. Logaritminio entalpijų skirtumo metodas

Šį metodą pirmasis pasiūlė W. Goodman'as 1938 metais, kai šilumokaičių skaičiavimas buvo atliekamas analitiniais skaičiavimais. Naudojant šį metodą yra priimama entalpijų potencialų prielaida (Pirompugd 2007). Tokiu būdu šio metodo pagrindinė lygtis priešsroviniam šilumokaičiui yra tokia:

$$Q = Ah_a \Delta i_{mean} = Ah_a \frac{(i_{a,1} - i_{s,2}) - (i_{a,2} - i_{s,1})}{\ln \frac{i_{a,1} - i_{s,2}}{i_{a,2} - i_{s,1}}} \quad (9)$$

Čia:

Δi_{mean} – logaritminis entalpijų skirtumas (kJ/kg),

$i_{a,1}$ ir $i_{a,2}$ – oro entalpija įėjime ir išėjime (kJ/kg),

$i_{s,1}$ ir $i_{s,2}$ – menama paviršiaus entalpija šilumokaičio įėjime ir išėjime (kJ/kg).

Šį lygtis aprašo šilumos ir masės mainus tarp oro ir plokštelės. F. C. McQuiston'as pasiūlė naudoti logaritminio entalpijų skirtumo ir logaritminio temperatūrų skirtumo išraiškas viename modelyje (Pirompugd 2009). Tokiu būdu šilumos ir masės mainai tarp oro ir

The diagram illustrates a cross-section of a condenser. The top region is labeled T_{∞} and "Oras" (Air). Below this is a blue layer labeled "Kondensatas Vamzdelio sienelė" (Condensate Pipe Wall). The middle region is labeled T_c and "Vanduo" (Water). The bottom region is a hatched layer. Brackets on the left indicate the "LMED" (Logarithmic Mean Effective Temperature Difference) region for the air side and the "LMTD" (Logarithmic Mean Temperature Difference) region for the water side.

Šių dviejų metodų kombinacija pagrįsta AHRI 410 standarto skaičiavimo metodika.

Šiame metode yra naudojama fiktyvios entalpijos prielaida. Tačiau, jeigu ji paprastai yra naudojama norint išreikšti temperatūrą, naudojant entalpijos išraišką, tai šiame metode ši prielaida naudojama tam, kad išreikštų oro entalpiją per temperatūrą (Liang, 2010). Taip pat fiktyvios entalpijos išraiškoje vietoje sauso termometro temperatūros naudojama šlapio termometro temperatūra. Įstačius (5) formulę į (4) formulę, gaunama tokia išraiška:

Naudojant šį metodą C.D. Ware ir T. Hacha nevertina koeficiento „a“ ir naudoja koeficiento „b“ vidutinę reikšmę (Kim 2000), kuri turi tokia išraišką:

Čia:

$t_{a,wb}$ – oro šlapio termometro temperatūra ($^{\circ}\text{C}$).

Supaprastinus (10) lygtį turime tokią išraišką:

$$Q = hAb_{aver}(t_{a,wb} - t_s), \quad W \quad (12)$$

Tačiau toks skaičiavimo būdas yra nepraktiškas, nes vietoje sauso termometro temperatūros naudojama šlapio termometro temperatūra. Dėl šios priežasties negalima iš karto nustatyti latentinės ir pilnosios šilumos srautų, tai reiškia, kad norint nustatyti išeinančio oro parametrus, būtina atlikti papildomus skaičiavimus.

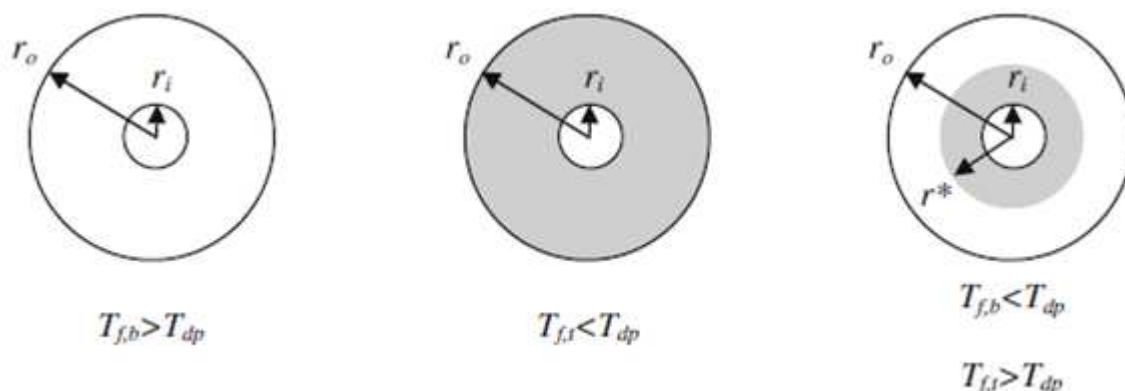
2.7. Šilumos perdavimo vienetų skaičiaus efektyvumo metodas

Abiejuose aukščiau minėtuose metoduose norint surasti šilumokaičio galią reikia turėti tiek įeinančius, tiek ir išeinančius oro ir šaltnešio parametrus. Priešingu atveju toks skaičiavimas yra iteratyvus ir priklausomai nuo skaičiavimo metodo ir prielaidų gali reikalauti didelių kompiuterinių resursų bei ilgo skaičiavimo laiko. Naudojant Eff-NTU metodą, kai šilumokaitis yra sausas, skaičiavimas yra labai trumpas ir paprastas, tačiau, kai šilumokaityje atsiranda kondensacijos reiškinys, kaip ir kituose metoduose skaičiavimas tampa iteratyvus. Naudojant Eff-NTU metodą šlapiam šilumokaičiui J. E. Braun naudoja fiktyvią entalpiją, kuri turi būti nustatoma skirtingoms tarpinėms temperatūroms, pavyzdžiui, plokštelės, vamzdelio paviršiaus ar šaltnešio (Khamis Monsour 2012).

2.8. Kondensato atsiradimo vieta

Nagrinėjant šilumokaitį, esant vėsinimo režimui, yra trys būsenos. Pirmas variantas yra, kai šilumokaitis visiškai sausas, tai yra, kai įeinančio oro rasos taško temperatūra yra mažesnė už mažiausią paviršiaus temperatūrą ($t_{a,1dp} < t_{s,2}$). Kitas variantas, kai šilumokaitis yra visiškai šlapas. Tokia būseną gali būti, kai įeinančio oro rasos taško temperatūra yra didesnė už bet kurio paviršiaus taško temperatūrą ($t_{a,1dp} > t_{s,1}$). Paskutinė galima šilumokaičio būseną vėsinimo režimu yra, kai plokštelių paviršius dalinai šlapas. Toks variantas yra tada, kai įeinančio oro rasos taško temperatūra yra mažesnė už įėjime esančią paviršiaus temperatūrą, tačiau didesnė už išėjime esančią paviršiaus temperatūrą ($t_{s,2} > t_{a,1dp} > t_{s,1}$) (Pirompugd, Wang ir Wongwises, Finite circular fin method for wavy fin-and-tube heat exchangers under fully and partially wet surface conditions 2008). Vykstant oro vėsinimui, kai plokštelės paviršiuje atsiranda kondensatas, labai svarbu nustatyti kondensato atsiradimo vietą, nes atsirandant kondensatui, šilumos mainų perdavimas pasikeičia, o tai reiškia, kad tai darys įtaką šilumokaičio galiai. Visos plokštelės galimos būsenos pavaizduotos 5 paveiksle (iš kairės – plokštelė sausa,

viduryje – plokštelė šlapia visame paviršiuje, iš dešinės – plokštelė šlapia tam tikroje ploto dalyje).



Pav. 5 Sausos, šlapios ir dalinai šlapios plokštelės schema

Kondensacijos atsiradimo vietą autoriai taip pat nustato skirtingais būdais. Vieni naudoja vidutinę paviršiaus temperatūrą, kiti atsiradimo vietą nustato pagal išorinę vamzdelio paviršiaus temperatūrą, nes toje vietoje temperatūra yra mažiausia.

Nagrinėjant atvejį, kai šilumokaitis yra dalinai šlapias, dažniausiai šilumokaičio skaičiavimas dalinasi į dvi dalis: į šlapią šilumokaičio dalį ir sausą, tačiau, W. Pirompugd`as išskiria ir trečią dalį - kai plokštelių paviršius yra dalinai šlapias.

2.9. Apžvalgos apibendrinimas

Apibendrinus literatūros apžvalgą galima teigti, kad kiekvieno autoriaus modelis yra visiškai skirtingas, nes kiekviename darbe yra priimamos skirtingos prielaidos ir naudojami skirtingi skaičiavimo būdai.

Palyginus skaičiavimo metodikas, optimali atitinkanti šio darbo tikslus yra AHRI standarto metodika. Atliekant skaičiavimą šiuo metodu, bendra šilumokaičio galia nustatoma pakankamai tiksliai, tačiau nustatant latentinės galios dalį yra didelis neatitikimas realiai situacijai. Todėl tolimesniame baigiamojo darbo etape skaičiavimai bus atliekami pagal AHRI standartą, tačiau latentinės šilumos dalį reikės skaičiuoti kitu metodu, nei nustato standartas. Kiti modeliai reikalauja keleto dydžių, kurie yra iteruojami, todėl šis metodas reikalauja didelių kompiuterinių resursų ir laiko, taip pat keli modeliai yra netikslūs, todėl jie taip pat neatitinka darbo tikslų.

3. DARBO TYRIMO SKAIČIAVIMO METODIKA

Atliekant literatūros apžvalgą, buvo aptarta 11 modelių, pagal kuriuos galima nustatyti plokštelinio šilumokaičio šilumos perdavimo koeficientą. Išanalizavus skaičiavimo modelius ir įvertinus jų tikslumą bei paprastumą, buvo pasirinktas AHRI standarto modelis. Šio modelio pasirinkimą lėmė tai, kad šis skaičiavimo modelis įvertina visas varžas, modelyje iteruojamas tik vienas dydis, modelis tinka tiek šildymo, tiek ir vėsinimo skaičiavimui ir pakankamas rezultatų tikslumas.

Pagrindinė pasirinkto algoritmo, taip pat ir daugelių kitų algoritmų skaičiavimo lygtis yra:

$$Q_t = Q_{tD} + Q_{tW}, \quad W \quad (13)$$

Čia:

Q_t – šilumokaičio galia (W),

Q_{tD} – šilumokaičio galios dalis, kur plokštelė sausa (W),

Q_{tW} – šilumokaičio galios dalis, kur plokštelė šlapia (W).

Bendras šilumos srautas perduotas per šilumokaitį lygus šilumos srautų sumai per sausą ir šlapią paviršius:

$$Q_t = \frac{A_D \Delta t_m}{R} + \frac{A_W \Delta i_m}{c_{p,a} R_{a,W}}, \quad W \quad (14)$$

Čia:

A_D – sauso išorinio šilumokaičio paviršiaus plotas (m^2),

A_W – šlapio išorinio šilumokaičio paviršiaus plotas (m^2),

Δi_m – vidutinis logaritminis entalpijų skirtumas (kJ/kg),

Δt_m – vidutinis logaritminis temperatūrų skirtumas ($^{\circ}C$),

R – suminė šilumokaičio šiluminė varža, esant sausam šilumokaičiui ($(^{\circ}C \cdot m^2)/W$),

$R_{a,W}$ – oro pasienio sluoksnio šiluminė varža, kai šilumokaitis šlapias ($(^{\circ}C \cdot m^2)/W$).

Šio modelio išskirtinumas yra tas, kad šilumos srauto skaičiavimui, perduotam per sausą paviršių, naudojamas logaritminis temperatūrų skirtumas tarp oro ir vandens temperatūrų.

$$\Delta t_m = \frac{(t_{1db} - t_{w2}) - (t_{Bdb} - t_{wB})}{\ln \frac{(t_{1db} - t_{w2})}{(t_{Bdb} - t_{wB})}} \quad (15)$$

Čia:

t_{Bdb} – oro temperatūra, kai prasideda kondensacija šilumokaičio paviršiuje ($^{\circ}\text{C}$),

t_{wB} – vandens temperatūra, kai prasideda kondensacija šilumokaičio paviršiuje ($^{\circ}\text{C}$),

Tuo tarpu šilumos srauto skaičiavimui per šlapią paviršių naudojamas logaritminis entalpijų skirtumas tarp oro entalpijos ir plokštelės paviršiaus menamos entalpijos. Plokštelės paviršiaus menamoji entalpija lygi sotos oro entalpijai prie paviršiaus temperatūros.

$$\Delta i_m = \frac{(i_B - i_{sB}) - (i_2 - i_{s2})}{\ln \frac{(i_B - i_{sB})}{(i_2 - i_{s2})}} \quad (16)$$

Čia:

i_{sB} – oro entalpija, kai prasideda kondensacija šilumokaičio paviršiuje (kJ/kg).

Nagrinėjamame algoritme bendrą šilumokaičio suminę varžą sudaro pasienio sluoksnio šiluminė varža oro pusėje, metalo šiluminė varža ir pasienio sluoksnio šiluminė varža vandens pusėje.

$$R = R_{aD} + R_m + R_w \quad (17)$$

Čia:

$R_{a,w}$ – oro pasienio sluoksnio šiluminė varža, kai šilumokaitis sausas ($(^{\circ}\text{C m}^2)/\text{W}$),

R_m – vamzdelio ir plokštelės šiluminė varža ($(^{\circ}\text{C m}^2)/\text{W}$),

R_w – vandens pasienio sluoksnio šiluminė varža, perskaičiuota išoriniam šilumokaičio plotui ($(^{\circ}\text{C m}^2)/\text{W}$).

Šilumos mainų skaičiavimuose naudojamas išorinis plotas, dėl to vidinio pasienio sluoksnio šiluminė varža padauginama iš koeficiento B. Pasienio sluoksnio šilumos laidumo koeficientas h_v apskaičiuojamas pagal *Petuhkovo-Kirilovo* metodą (Taler 2016).

$$R_w = \frac{B}{h_w} \quad (18)$$

Čia:

B – išorinio ir vidinio ploto santykis,

h_w – vandens pasienio sluoksnio šiluminė varža ($^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$).

Koeficientas B , tai išorinio ir vidinio paviršiaus plotų santykis, kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$B = \frac{A_0}{A_i} \quad (19)$$

Čia:

A_0 – šilumokaičio išorinis plotas (m^2),

A_i – šilumokaičio vidinis plotas (m^2).

Metalo šiluminė varža susideda iš vamzdelio ir plokštelės šiluminės varžos:

$$R_m = R_t + R_f \quad (20)$$

Čia:

R_t – vamzdelio šiluminė varža ($^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$),

R_f – plokštelės šiluminė varža ($^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$).

Vamzdelio šiluminė varža apskaičiuojama pagal tokią formulę:

$$R_t = \frac{BD_i}{2k_t} \ln \frac{D_o}{D_i} \quad (21)$$

Čia:

D_0 – vamzdelio vidinis diametras (m),

D_i – vamzdelio išorinis diametras (m),

Plokštelės šiluminė varža priklauso nuo išorinio paviršiaus pasienio sluoksnio bei plokštelės išorinio paviršiaus naudingumo koeficiento ir apskaičiuojama pagal tokią formulę:

$$R_f = \left(\frac{1 - \eta}{\eta} \right) R_{ad} \quad (22)$$

Išorinio paviršiaus naudingumo koeficientas įvertina, kad plokštelės temperatūra yra mažesnė nei vamzdelio paviršiaus temperatūra, dėl to šilumos perdavimas sumažėja. Šilumos

perdavimo nuo plokštelės sumažėjimą įvertina plokštelės naudingumo koeficientas η_{fin} . Išorinio paviršiaus naudingumo koeficientas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\eta = \frac{\eta_{fin}A_s + A_p}{A_0} \quad (23)$$

Čia:

η – išorinio paviršiaus šilumos perdavimo efektyvumas,

η_{fin} – plokštelės šilumos perdavimo efektyvumas,

A_s – plokštelės plotas be kaklelio (m^2),

A_p – kaklelio plotas (m^2).

Plokštelės šilumos perdavimo naudingumo koeficientas nustatomas pagal tokias formules:

$$\eta_{fin} = \frac{\tanh(mr_t\phi)}{mr_t\phi} \quad (24)$$

Čia:

η_{fin} – plokštelės šilumos perdavimo efektyvumas,

m ir ϕ – plokštelės charakteringas bedimensinis dydis,

r_t – vamzdelio spindulys.

$$m = \sqrt{\frac{2h_a}{k_{surf}s}} \quad (25)$$

Čia:

k_{surf} – plokštelės šiluminis laidumas.

$$\phi = \left(\frac{R_e}{r_b} - 1\right) \left(1 + 0,35 \ln\left(\frac{R_e}{r_b}\right)\right) \quad (26)$$

Čia:

R_e – plokštelės ekvivalentinis spindulys (m),

r_b – plokštelės kaklelio spindulys (m).

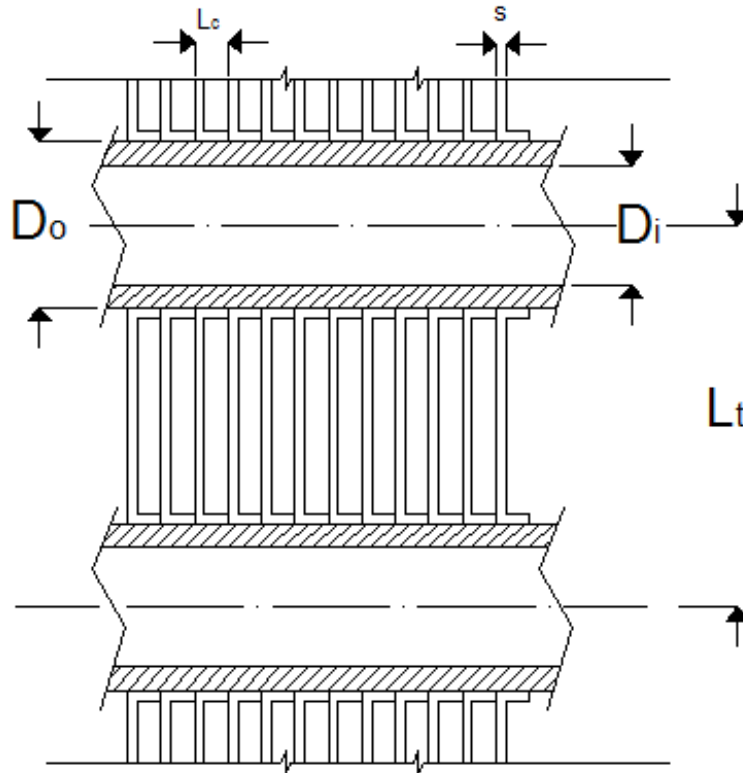
$$R_e = 1,27 \frac{L_t}{2} 0,7^{0,5} \quad (27)$$

Čia:

L_t – vertikalus atstumas tarp vamzdelių (m).

$$r_b = \frac{D_0 + 2s}{2} \quad (28)$$

Šilumokaičio skerspjūvio schema pateikta 6 paveiksle.



Pav. 6 Šilumokaičio skerspjūvio schema

Kaip jau buvo minėta, esant šlapiam paviršiui (vėsinimo režimas) šilumos skaičiavimas atliekamas naudojant oro entalpijos ir išorinio paviršiaus menamosios entalpijos skirtumą, dėl šios priežasties įvedamas šilumokaičio šilumos perdavimo charakteristikos faktorius C , kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$C = \frac{R_m + R_w}{c_{p,a} R_{aw}} \quad (29)$$

Taip pat šis faktorius gali būti išreikštas santykiu tarp išorinio paviršiaus ir vandens temperatūrų skirtumo bei oro entalpijos ir išorinio paviršiaus menamosios entalpijos skirtumo.

$$C = \frac{t_s - t_w}{i - i_s} \quad (30)$$

Šis faktorius yra pastovus visame šilumokaityje, nustatius jį iš pirmosios išraiškos, naudojant jį galima surasti išorinio paviršiaus temperatūrą, bet kuriame plokštelės taške.

Atliekant vėsinimo režimo skaičiavimus, dažniausiai oro įėjimo taške išorinio paviršiaus temperatūra yra aukštesnė už oro rasos tašką, dėl to šilumokaitis būna dalinai sausas, dalinai šlapias. Todėl labai svarbu nustatyti vietą, kurioje oras pradeda kondensuotis. Oro entalpija prie kurios jis pradės kondensuotis apskaičiuojama pagal formulę:

$$i_B = \frac{t_{1dp} - t_{w2} + y i_1 + C i_{1dp}}{C + y} \quad (31)$$

Čia:

t_{1dp} – įtekančio oro rasos taško temperatūra ($^{\circ}\text{C}$),

t_{w2} – ištekančio iš šilumokaičio vandens temperatūra ($^{\circ}\text{C}$).

Aukščiau minėtoje formulėje naudojamas y faktorius kuris lygus santykiui tarp vandens temperatūros padidėjimo ir oro entalpijos sumažėjimo. Jis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$y = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{i_1 - i_2} \quad (32)$$

Sauso ir šlapio šilumokaičio išorinių pasienio sluoksnių koeficientai (R_{aD} ir R_{aW}) nustatomi pagal empirines formules, kurios gautos eksperimento metu.

Esant drėgnam paviršiui oro sauso termometro temperatūra apskaičiuojama pagal tokias formules:

$$NTU = \frac{A_0}{c_p m_a R_{aD}} \quad (33)$$

$$i_s = i_1 - \left(\frac{i_1 - i_2}{1 - e^{-NTU}} \right) \quad (34)$$

$$t_{2db} = t_s + (t_{1db} - t_s) e^{-NTU} \quad (35)$$

Esant sausam šilumokaičio paviršiui išeinančio oro temperatūra apskaičiuojama iš logaritminio temperatūrų skirtumo.

4. EKSPERIMENTINIS BANDYMAS

Šiame skyriuje aprašoma eksperimentiniams bandymams naudojama įranga, jos techninės charakteristikos (matavimo ribos, tikslumas), testuotų šilumokaičių charakteristikos (vamzdelių eilių skaičius, atstumas tarp plokštelių, vamzdelių diametrai). Šilumokaičių testavimas atliekamas remiantis EN 307:1998 ir EN 1216 standartais. Šiame skyriuje taip pat pateikiami gauti eksperimentinių bandymų rezultatai, kurie palyginami su kitų autorių gautais rezultatais.

4.1. Naudojama įranga

Atliekant šilumokaičių eksperimentinius bandymus buvo atliekami šie matavimai: oro kiekio, oro temperatūros ir drėgmės prieš ir po šilumokaičio, oro ir vandens slėgio perkrytis šilumokaityje, vandens temperatūros įėjime ir išėjime, vandens srauto matavimai.

Visi matavimai buvo atliekami UAB “Amalva” laboratorijoje, kurioje įrengtas stendas, skirtas šilumokaičių vanduo-oras testavimui. Stendas pavaizduotas 7 paveiksle.



Pav. 7 Šilumokaičių bandymų stendas

Stendą sudaro 7 sekcijos:

1. Srauto matavimo sekcija naudojant tūtas
2. Srauto sumaišymo ir išlyginimo sekcija
3. Oro parametrų matavimo sekcija
4. Sekcija su šilumokaičiu

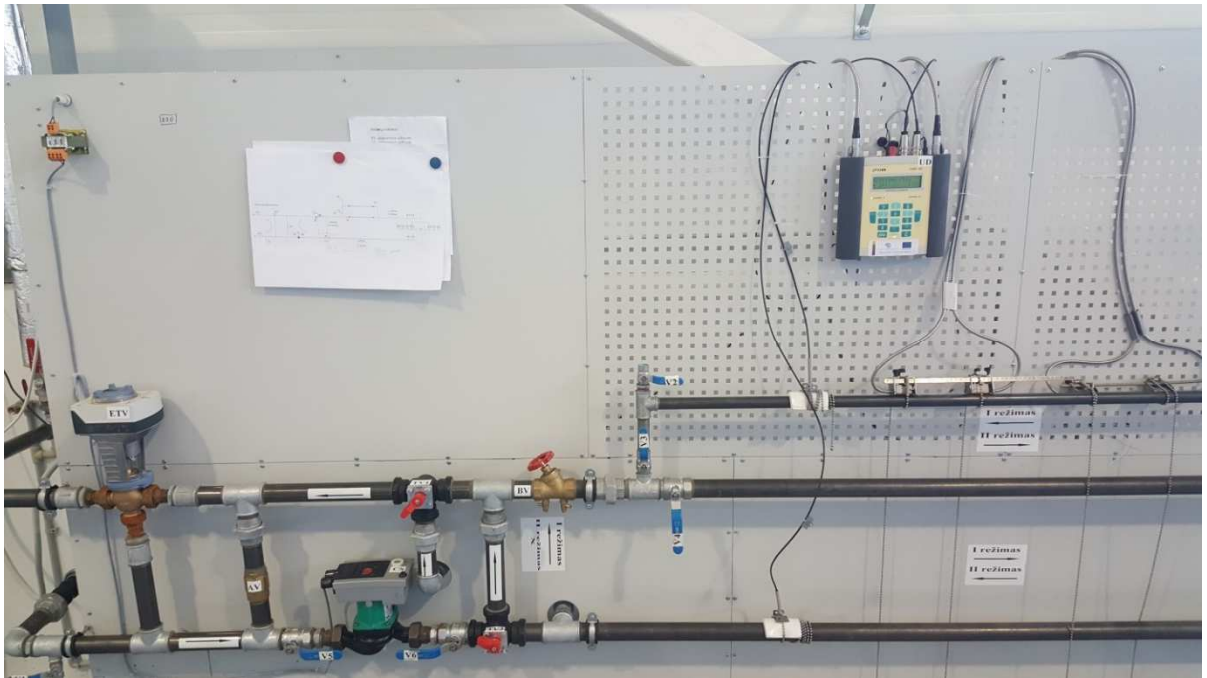
5. Srauto sumaišymo ir išlyginimo sekcija po šilumokaičio
6. Oro parametrų po šilumokaičio matavimo sekcija
7. Sekcija su ventiliatoriumi

Oro parametrų matavimų sekcijoje matavimų jutikliai išdėstyti tolygiai, norint kuo tiksliau nustatyti srauto parametrus. Oro parametrų matavimo sekcija pateikta 8 paveiksle.



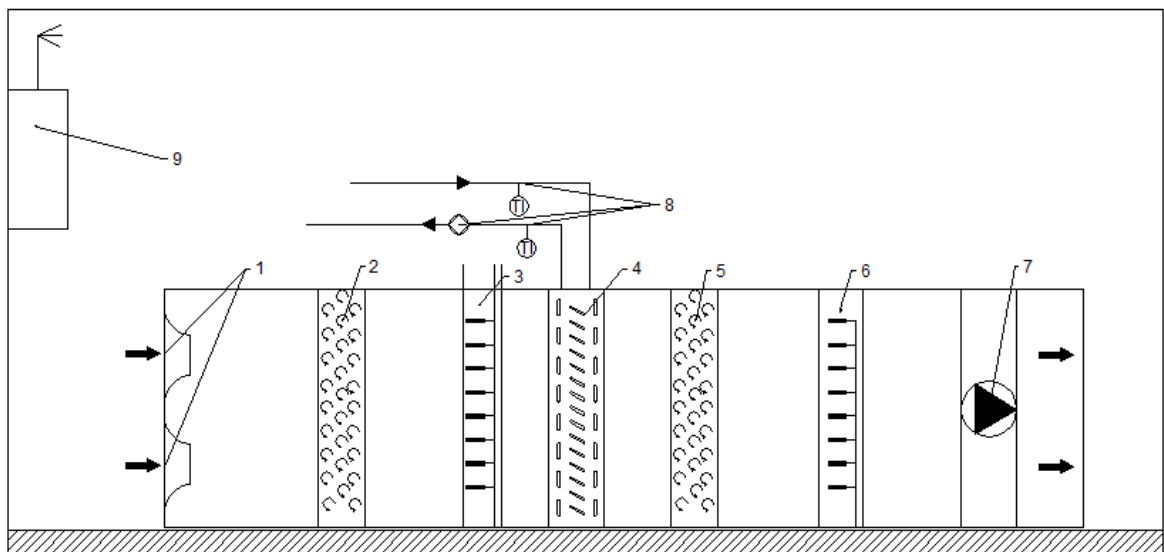
Pav. 8 Oro parametrų matavimo sekcija

Matavimams atlikti taip pat buvo naudojamas vandens srauto matavimo stendas, kuris pavaizduotas 9 paveiksle. Šio stendo pagrindinė funkcija yra vandens ir šilumos srauto matavimas. Antrinės šio stendo funkcijos: reguliuoti vandens temperatūrą, naudojant trieigį vožtuvą, reguliuoti vandens srautą, keičiant siurblio apsukas ir valdant dveigį vožtuvą, taip pat perjungti srautą į priešingą pusę, tokiu būdu pakeičiant šilumokaičio priešpriešinį pajungimą į lygiagretų. Tačiau darbe nagrinėjamas tik priešpriešinis pajungimas, kadangi tai labiausiai paplitęs pajungimas, be to jis yra efektyvesnis nei lygiagretus.



Pav. 9 Vandens srauto reguliavimo stendas

Bandymų stendas schematiškai pavaizduotas 10 paveiksle.



Pav. 10 Šilumokaičių bandymų stendo schema

Schemos žymėjimai:

1. Srauto matavimas per tūtas
2. Srauto sumaišymo sekcija
3. Temperatūros ir drėgmės jutikliai prieš šilumokaitį
4. Šilumokaitis
5. Srauto sumaišymo sekcija
6. Temperatūros ir drėgmės jutikliai po šilumokaičio
7. Ventiliatorius
8. Vandens srauto matuoklis ir temperatūrų jutikliai
9. Drėkintuvas

Bandymams buvo naudojama tokia įranga:

1. Skirtuminis slėgio matuoklis „SETRA C239” – 1 vnt., skirtas oro kiekio pratekančio pro tūtas nustatymui. 200 mm ir 250 mm diametro tūtos – 2 vnt., skirtos oro kiekio nustatymui.
2. Temperatūros jutikliai “TJ1 PT100” – 16 vnt., skirti oro ir vandens temperatūrai fiksuoti prieš ir po šilumokaičio.
3. Drėgmės jutikliai “Vaisala HMP 110” – 12 vnt., skirti oro drėgmei prieš ir po šilumokaičio nustatyti.
4. Skirtuminis slėgio matuoklis “SETRA 267” – 1 vnt., skirtas slėgio perkryčio šilumokaityje matavimui.
5. Barometras “Comet system T2114” – 1 vnt., skirtas atmosferiniam slėgiui nustatyti.
6. Išcentrinis ventiliatorius “Ebmpapst R3G 355-AY40” – 1 vnt.
7. Ultragarsinis matuoklis “FLUXUS F601” – 1 vnt., skirtas vandens debitui nustatyti.
8. Cirkuliacinis siurblys “Wilo Yonos MAXO 25/0,5-7” – 1 vnt.
9. Duomenų surinkimo sistema “National instruments Compact DAQ 9178” – 1 vnt.
10. Šilumos siurblys oras–vanduo, gaminantis karštą ir šaltą vandenį “Galletti MPI DC 029” – 1 vnt., skirtas šalto/karšto vandens temperatūrai palaikyti.
11. Garinis drėkintuvas „Devatec ELMC30“.

Bandymams atlikti naudojamų prietaisų veikimo ribos, matavimo ribos ir matavimo paklaidos pateiktos lentelėje 3.

3 lentelė. Naudojamų prietaisų charakteristikos.

Matavimo prietaisas/Įrenginys	Matavimo/Veikimo ribos	Matavimų paklaida
SETRA C239	0 – 2000 Pa	± 1 %
TJ1 PT100	-30 ... 180 °C	± 0,2 °C
Vaisala HMP 110	0–100 %	± 3 % esant -40 ... 0 °C ± 1,5 % esant 0 ... +40 °C ± 3 % esant +40 ... +80 °C
SETRA 267	0 – 2500 Pa	± 1 %
Comet system T2114	800 – 1100 hPa	± 0,06 %
Ebmpapst R3G 355-AY40	2000 – 5000 m ³ /h	–
FLUXUS F601	–	± 1,6 % arba 0,01 m/s
Wilo Yonos MAXO 25/0,5-7	iki 7000 l/h	–
Galletti MPI DC 029	28,5 kW vėsinimo režimas 33,7 kW šildymo režimas	–
Devatec ELMC30	6–30 kg/h	–

Visos matavimo priemonės prieš bandymą yra sukalibruotos tam skirtais prietaisais.

4.2. Bandomieji šilumokaičiai

Griežtėjant naujų pastatų energijos naudojimo efektyvumo reikalavimams juose tampa privalomas priverstinių vėdinimo sistemų projektavimas, užtikrinantis reikiamą patalpų oro apykaitą bei oro kokybę. Projektuojant jas numatomi vėdinimo įrenginiai, kuriuose vyksta oro apdorojimo procesai. Nepaisant to, kad vėdinimo įrenginiuose yra įrengti šilumogrąžiai, šalinamo oro šilumai (vėsai) atgauti, dalį šilumos arba vėsos papildomai reikia suteikti tiekiamam orui. Šiam tikslui dažniausiai yra naudojami oras-vanduo šilumokaičiai, kuriais oras paruošiamas iki reikiamų parametrų.

Besivystant vėdinimo sistemų technologijoms atsirado tendencijos mažinti įrenginių gabaritus. Šiuo metu rinkoje atsirado didelė šilumokaičių įvairovė, jie skiriasi vieni nuo kitų eilių skaičiumi, atstumu tarp plokštelių, vamzdelio diametru ir plokštelės forma. Parenkant šilumokaitį labai svarbu parinkti tokį jo dydį, kad jis užtikrintų ne tik tiekiamo oro parametrus, esant projektinėms sąlygoms, bet tuo pačiu nebūtų per didelis, nes dėl išaugusių slėgio nuostolių išauga investicijos ir veikimo išlaidos.

Norint tinkamai nustatyti šių šilumokaičių galią, reikia atlikti eilę bandymų su skirtingais šilumokaičiais ir nustatyti šilumos perdavimo koeficiento priklausomybę nuo anksčiau išvardintų parametrų. Eksperimentiniams bandymams buvo pasirinkti 9 šilumokaičiai, kurie skiriasi eilių skaičiumi, atstumu tarp plokštelių bei vamzdelio diametru. Šilumokaičių geometrija nuo bazinio šilumokaičio (Nr. 2). skiriasi tik vienu iš išvardytų parametrų

4 lentelėje pateikti visų šilumokaičių duomenys:

4 lentelė. Šilumokaičių geometrijos duomenys

Nr.	L_l , mm	L_t , mm	L_c , mm	s, mm	N	D_o , mm
1	25.98	30.0	2.4	0.1	2	9.93
2	25.98	30.0	2.4	0.1	4	9.93
3	25.98	30.0	2.4	0.1	6	9.93
4	25.98	30.0	1.6	0.1	4	9.93
5	25.98	30.0	2.0	0.1	4	9.93
6	25.98	30.0	3.0	0.15	4	9.93
7	25.98	30.0	3.6	0.15	4	9.93
8	25.98	30.0	4.0	0.15	4	9.93
9	25.98	30.0	2.4	0.1	4	12.53

Atskaitos šilumokaičiu buvo pasirinktas šilumokaitis Nr. 2. Šilumokaičiai Nr. 6, 7 ir 8 skiriasi keliais parametrais, nes padidinus atstumą tarp plokštelių (L_c), plokštelės storis padidėja (s) (11 pav.).

Bandomasis šilumokaitis (Nr. 2) ir pavyzdinė plokštelė pavaizduoti 11 paveiksle.



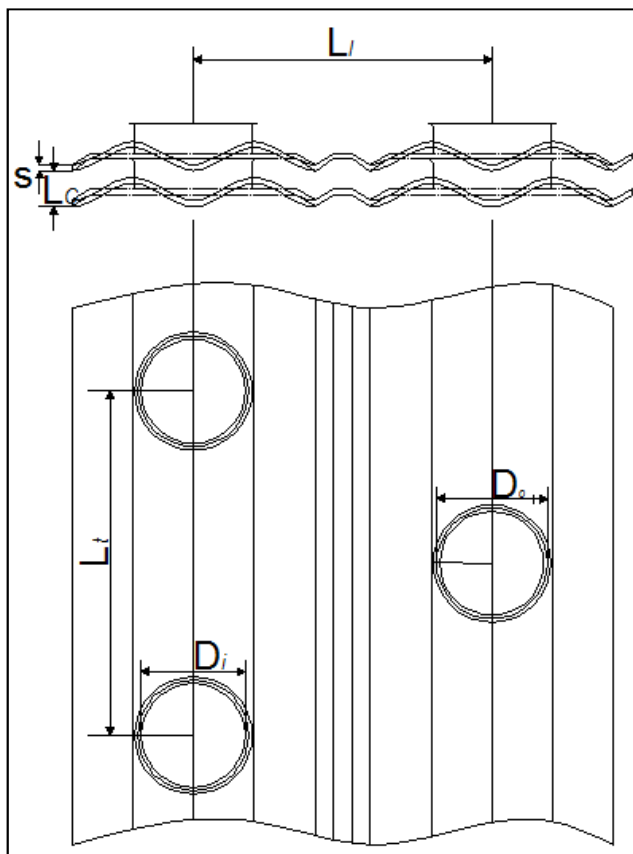
Pav. 11 Bandomasis šilumokaitis ir naudojama šilumokaičiuose plokštelė

Kiti šilumokaičiai vizualiai atrodo taip pat, skiriasi tik jų konfiguracijos: išoriniai matmenys, vamzdelių diametrai, atstumas tarp plokštelių ir plokštelės storis.

4.3. Eksperimentinių bandymų eiga ir rezultatai

Eksperimentinių bandymų tikslas - nustatyti oro pusėje šilumos perdavimo koeficiento priklausomybę nuo pratekančio per šilumokaitį oro greičio, esant vėsinimo režimui. Remiantis skaičiavimo metodika, visu pirma, reikia nustatyti šilumos perdavimo koeficientą, esant sausam šilumokaičiui. Šiam tikslui buvo atliekami šilumokaičio bandymai, esant šildymo režimui.

Atliekant sauso paviršiaus bandymus buvo palaikoma 45 °C vandens temperatūra, o pradinė oro temperatūra buvo 18-20 °C ribose. Darbe analizuojami tik tie duomenys, kurie gauti nusistovėjus šilumos mainų režimui ir nesikeitę 2 minučių laikotarpyje, o šilumos balansas tarp vandens ir oro srauto nesiskyrė $\pm 2\%$. Duomenys fiksuojami kompiuterio pagalba kas sekundę. Pažymėtina tai, kad darbe nagrinėjami šilumos mainai, kai oro pusėje srauto režimas yra turbulentinis ($Re > 1000$). Nagrinėjamo šilumokaičio plokštelės skerspjūvis pateiktas 12 paveiksle.



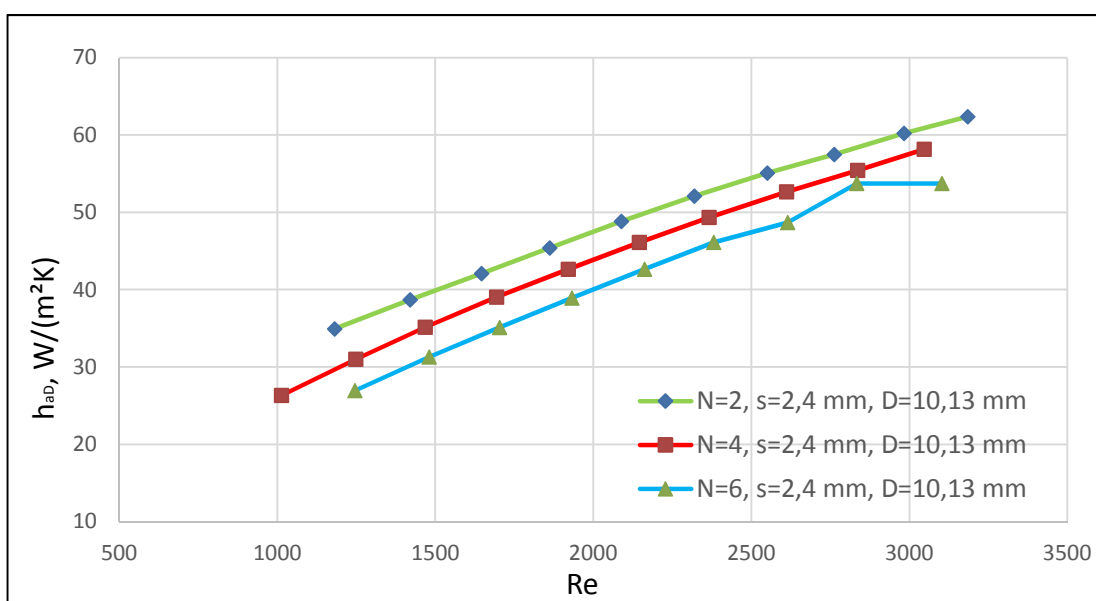
Pav. 12 Šilumokaičiuose naudojamos plokštelės skerspjūvis

Remiantis AHRI standartu buvo nustatytos trys priklausomybės šilumos perdavimo koeficiento išorės pasienio sluoksnyje. 13 paveiksle pateikta šilumos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus, esant skirtingam vamzdelių eilių skaičiui. Lentelėje 5 pateikti šilumokaičio Nr. 2 (4 eilės, atstumas tarp plokštelių 2,4 mm) nagrinėjami duomenys ir apskaičiuotas šilumos perdavimo koeficientas.

5 lentelė. Šilumokaičio Nr. 2 eksperimentinio bandymo rezultatai

p, Pa	t_{1a} , °C	f_1 , %	t_{2a} , °C	f_2 , %	$\dot{m}_a$, kg/s	q_a , kW	t_{w1} , °C	t_{w2} , °C	$\dot{m}_w$, kg/s	q_w , kW	Re	h_a , W/(Km ²)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
100913	20,12	33,24	32,66	15,91	1,787	22,98	43,80	37,88	0,934	23,12	3047	58,15
100924	20,30	32,93	33,60	15,18	1,678	22,88	44,65	38,80	0,934	22,85	2837	55,40
100931	20,49	32,55	34,62	14,40	1,533	22,19	45,44	39,72	0,935	22,37	2611	52,65
100935	20,57	32,46	35,47	13,75	1,412	21,56	45,87	40,39	0,934	21,40	2366	49,35
100944	20,68	32,20	36,10	13,32	1,284	20,29	45,93	40,80	0,935	20,08	2145	46,09
100944	20,76	32,09	36,77	12,86	1,121	18,40	46,01	41,23	0,936	18,67	1920	42,62
100939	20,66	32,18	37,46	12,38	1,006	17,33	46,10	41,68	0,937	17,29	1694	39,01
100941	20,58	32,46	38,25	11,92	0,864	15,66	46,25	42,23	0,937	15,77	1468	35,14
100950	20,71	32,21	39,15	11,41	0,734	13,88	46,45	42,88	0,937	14,01	1249	30,98
100956	20,72	32,16	40,11	10,90	0,601	11,96	46,59	43,53	0,936	11,97	1013	26,34

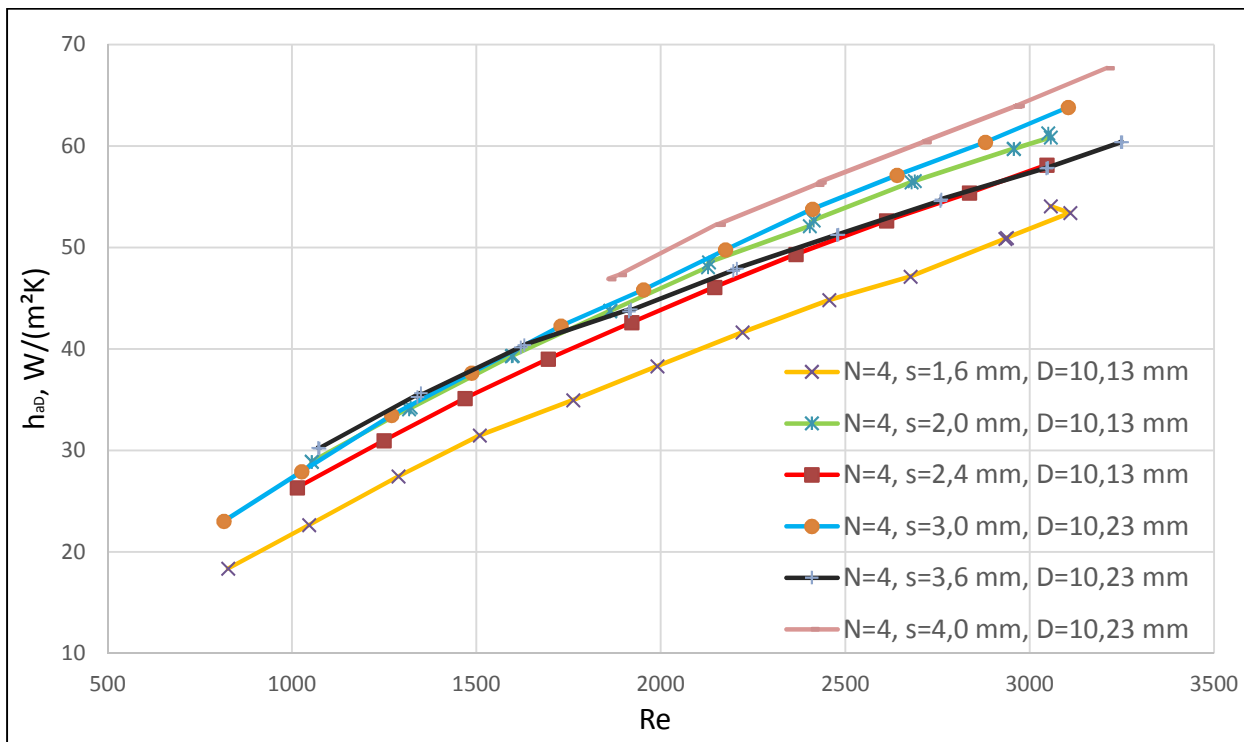
Analogiškai kaip ir 5 lentelėje, pateiktame šilumokaityje buvo apskaičiuoti kitų šilumokaičių šilumos perdavimo koeficientai ir jų rezultatai pateikti grafiškai 13–15 paveiksluose.



Pav. 13 Oro pasienio sluoksniu šilumos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus esant skirtingam eilių skaičiui

13 paveiksle matome, kad šilumos mainų intensyvumas mažėja, didėjant šilumokaičio vamzdelio eilių skaičiui.

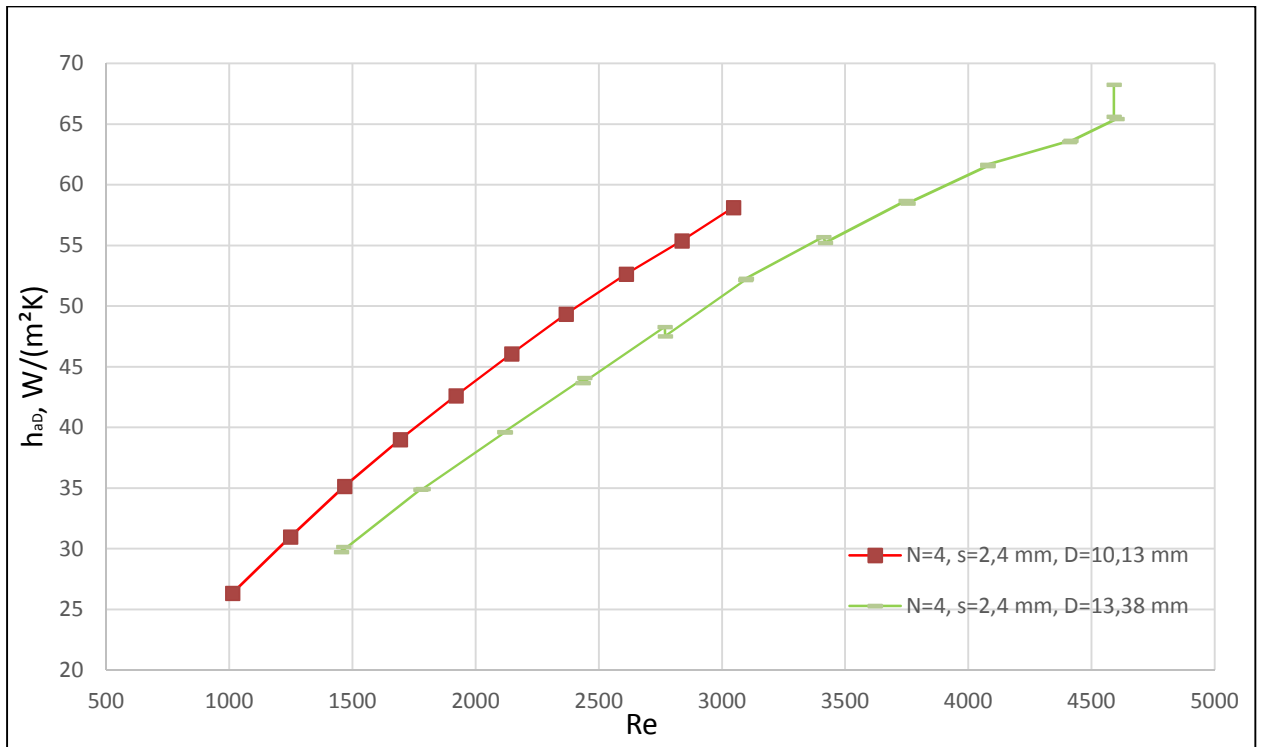
Antra priklausomybė pateikta 14 paveiksle, šilumos perdavimo priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus, esant skirtingiems tarpams tarp šilumokaičio plokštelių.



Pav. 14 Oro pasienio sluoksnio šilumos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus esant skirtingam atstumui tarp plokštelių

Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta, kad oro pasienio sluoksnio šilumos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo atstumo tarp plokštelių bendru atveju didėjo, didėjant atstumui tarp plokštelių, tačiau pasitaikė išimčių, kai šilumos perdavimo koeficientas ir mažėjo.

Nagrinėjant vamzdelio diametro įtaką šilumos mainams pastebėta, kad padidinus vamzdelio diametrą, šilumos perdavimo koeficientas žymiai padidėdavo, esant tam pačiam srautui, bet nagrinėjant priklausomybę nuo Reinoldso skaičiaus, šilumos perdavimo koeficientas sumažėdavo.

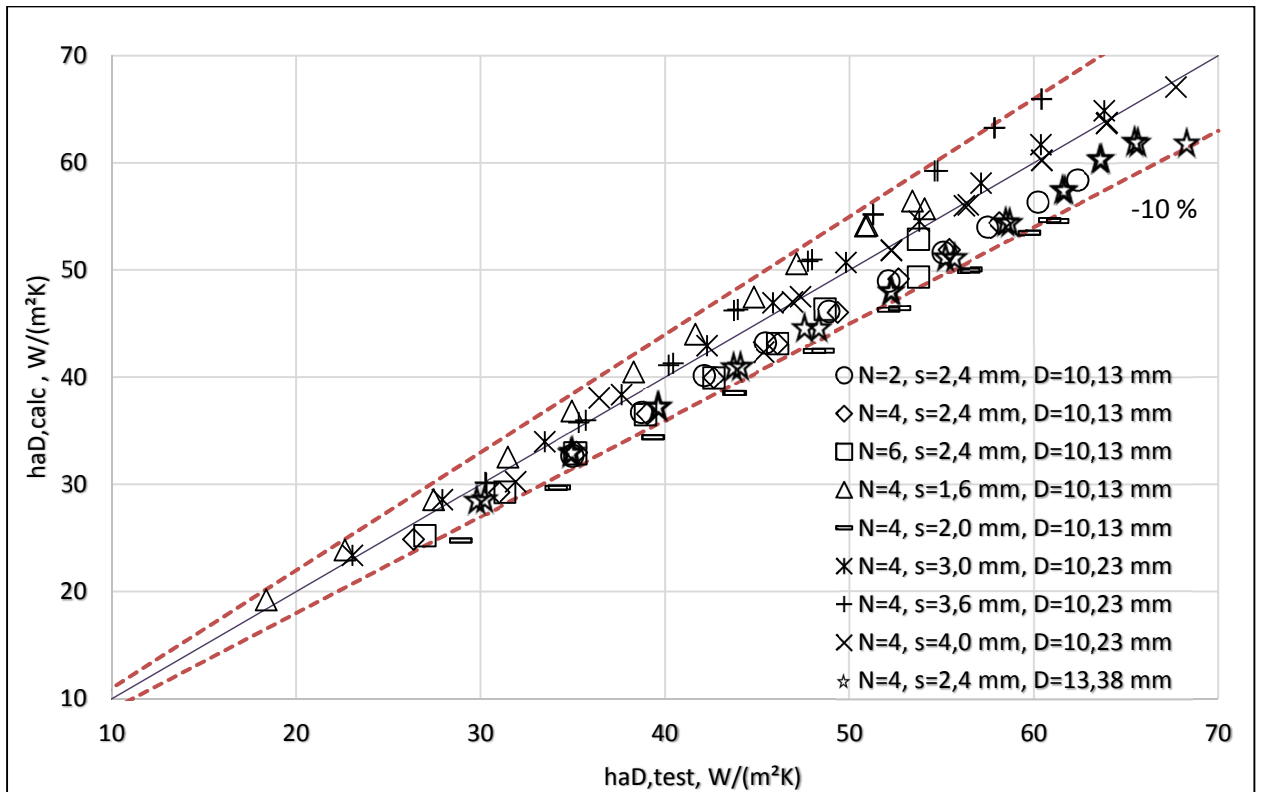


Pav. 15 Oro pasienio sluoksnio šilumos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus esant skirtingam vamzdelių diametrui

Visiems išnagrinėtiems šilumokaičiams buvo nustatyta empirinė formulė (36), pagal kurią galima nustatyti kiekvieno šilumokaičio šilumos perdavimo koeficientą pasienio sluoksnyje, priklausomai nuo Reinoldso skaičiaus:

$$h_{aD} = 2,577e^{-0,417N} \frac{L_c^{1,288}}{s^{0,795}} D^{-0,5087} (Re-250)^{\frac{1}{0,003811s^{-0,3547} 0,5731L_c^{0,3770} + 0,04947N}} \mu, \quad (36)$$

Atlikus skaičiavimus pagal (36) formulę, 16 paveiksle palyginamos eksperimentinių bandymų šilumos perdavimo koeficiento reikšmės su skaičiuotinomis, iš grafiko (16 pav.) matome, kad dauguma reikšmių patenka į diapazoną $\pm 10\%$ (apribota punktyrinėmis linijomis). Tik vieno šilumokaičio ($N=2$, $L_c=2,0$ mm, $D=10,13$ mm) šilumos perdavimo reikšmių paklaida didesnė nei 10 %.



Pav. 16 Eksperimentinio šilumos perdavimo koeficiento reikšmių palyginimas su skaičiuotinomis

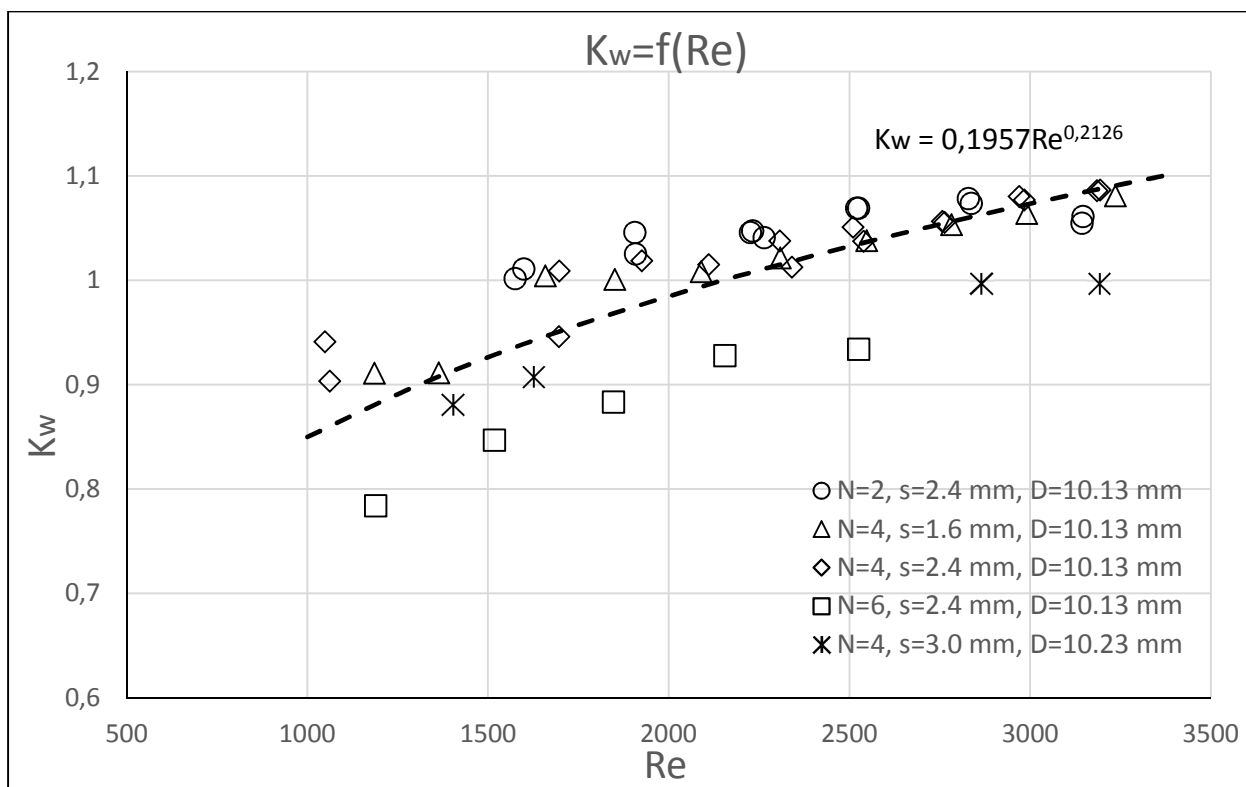
Nustačius sauso paviršiaus šilumos perdavimo koeficientą, bandymus galima tęsti vėsinimo režimu. Norint nustatyti šlapio paviršiaus šilumos perdavimo koeficientą, reikia užtikrinti tokias sąlygas, kad visas paviršiaus plotas būtų šlapias. Šiam tikslui pasiekti reikia, kad plokštelės paviršiaus temperatūra būtų žemesnė už įeinančio oro rasos tašką. Taip pat bandymo metu labai svarbu palaikyti tolygius oro parametrus, todėl laboratorija buvo prikaitinta iki 23 °C ir oro drėgnumas viršijo 65 %. Esant tokiam oro drėgnumui, rasos taško temperatūra yra didesnė nei 15 °C. Pažymėtina tai, kad realybėje šilumokaičiai dirba ilgą laiką vėsinimo režimu, todėl norėdami priartinti skaičiuojamuosius duomenis prie realių darbo sąlygų bandymų pradžioje reikia ne mažiau kaip valandą vėsinti orą, kad šilumokaičio paviršiuje spėtų susidaryti tolygus kondensato sluoksnis.

Atliekant bandymus esant vėsinimo režimui, yra nustatomas šlapios plokštelės pataisos koeficientas, kuris nusako šilumos perdavimo koeficiento pokytį palyginus su sausa plokšte. Šlapio paviršiaus šilumos perdavimo koeficientas nustatomas pagal formulę:

$$R_{aw} = k_w R_{ad} \quad (39)$$

Atliekant eksperimentinius bandymus įtekančio vandens temperatūra svyravo 5 ... 8 °C ribose, o ištekančio vandens temperatūra svyravo 10 ... 15 °C ribose.

Atlikus bandymus ir išnagrinėjus gautus duomenis buvo apskaičiuotas šlapios plokštelės pataisos koeficientas. Gauti rezultatai pateikti paveiksle 17.



Pav. 17 Šlapios plokštelės pataisos koeficiento priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus.

Išnagrinėjus duomenis buvo nustatyta empirinė formulė, kuri nusako visų išnagrinėtų šilumokaičių pataisos koeficientus. Atlikus analizę buvo nustatyta, kad naudojant gautą empirinę formulę, bendro perduoto šilumos srauto per šilumokaitį paklaida neviršija 5 %. Pataisos koeficiento priklausomybė pateikta 39 formulėje:

$$k_w = 0,1957Re^{0,2126} \quad (39)$$

Maksimali šios formulės paklaida lyginant su eksperimentiniu bandymu sudaro 12,46 %, tačiau šiame taške galios nuokrypis sudaro 3,70 %.

4.4. Rezultatų palyginimas su kitais moksliniais darbais

Rezultatų įvertinimui vienas iš šilumokaičių šilumos perdavimo koeficientų lyginamas su šilumos perdavimo koeficientais, paskaičiuotais pagal formules, kurias kiti mokslininkai nustatė eksperimentiniu būdu.

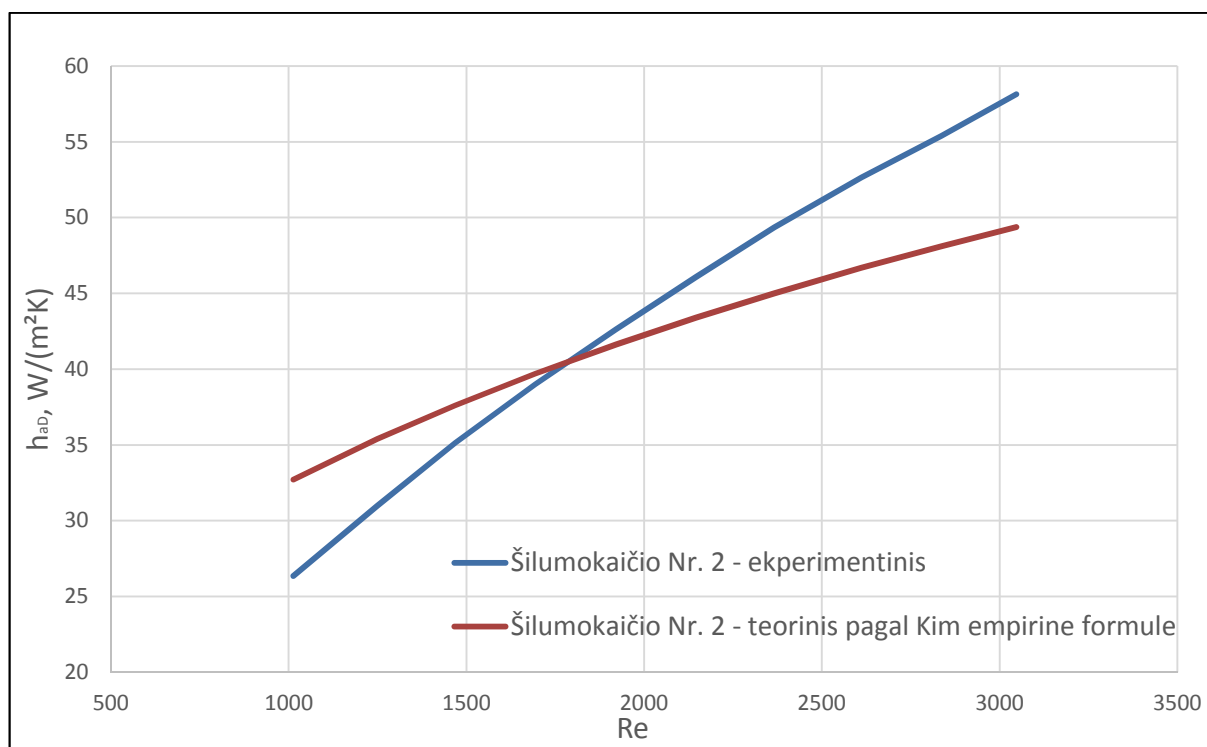
Apžvelgus esamą literatūrą buvo nustatyta, kad panašios šilumokaičio konfigūracijos (plokštelė banguota) šilumos perdavimo priklausomybė aprašoma tokia formule (Kim 2015):

$$h_{a,Kim} = Re^{-0,616} \left(\frac{P_l}{P_t} \right)^{-0,00445} \left(\frac{P_d}{P_f} \right)^{-0,00146} N^{-0,0166} \frac{G_h c_{p,a}}{Pr_a^{2/3}} \quad (40)$$

Kim darbe nagrinėjami šilumokaičiai su šiomis charakteristikomis:

- gofruota plokštelė
- eilių skaičius nuo 1 iki 4
- vamzdelio diametras 10,03 mm
- atstumas tarp plokštelių nuo 1,5 iki 2,0 mm
- vertikalus atstumas tarp plokštelių 25 mm
- horizontalus atstumas 22 mm

Šilumos perdavimo koeficiento priklausomybės palyginimas su N. H. Kim nustatyta šilumos perdavimo koeficiento priklausomybę pateiktas 18 paveiksle.



Pav. 18 Šilumos perdavimo koeficiento palyginimas su N. H. Kim nustatyta empirine formule.

Palyginus eksperimentinių bandymų būdu nustatytą priklausomybę su N. H. Kim'o bandymų gauta priklausomybe, matome kad N. H. Kim'o siūlomas modelis netinka darbe nagrinėjamiems šilumokaičiams.

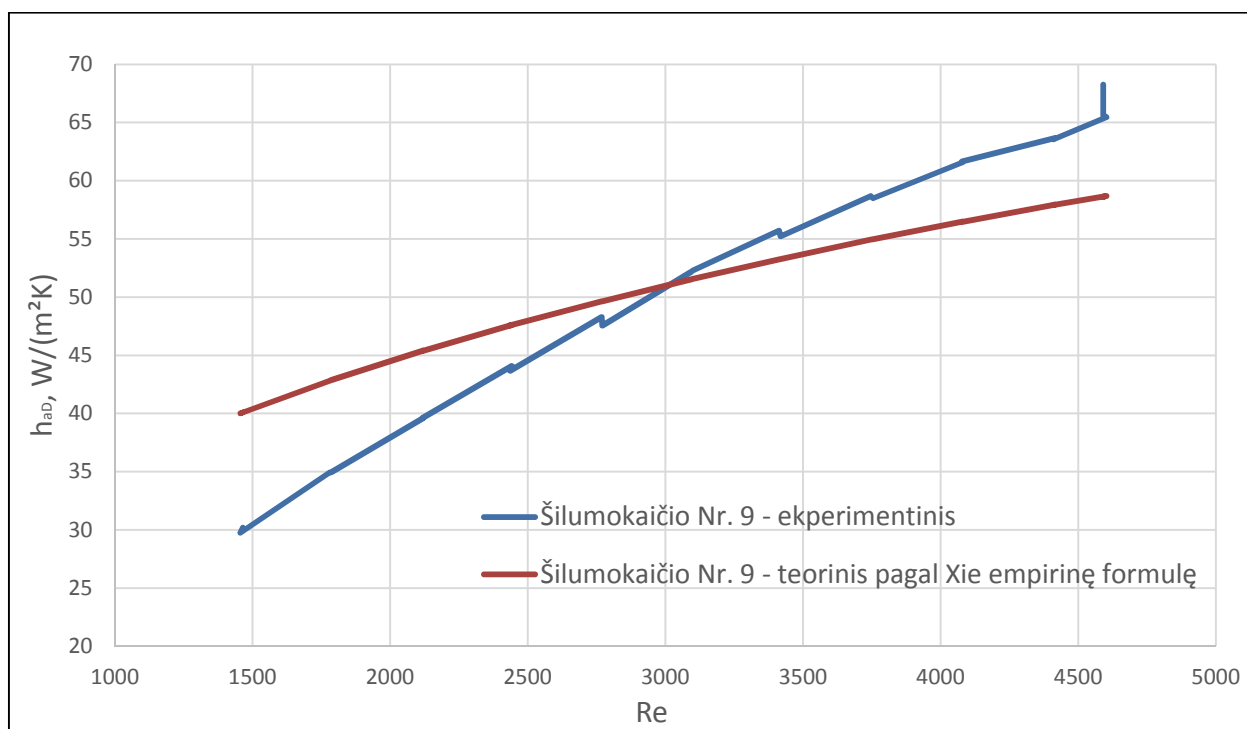
Vienas iš autorių (Xie 2009) nagrinėjo šilumokaičius su didesniais diametrais ir banguota plokštelę, kurie atitinka darbe nagrinėjamo šilumokaičio Nr. 9 diametrą. Šiems šilumokaičiams šilumos perdavimo koeficientą aprašyti buvo nustatyta tokia priklausomybė:

$$h_{a,Xie} = 1,565 Re^{0,3414} \left(\frac{P_l}{P_t} \right)^{0,0558} \left(\frac{F_p}{D_0} N \right)^{-0,165} \frac{k}{D_0} \quad (41)$$

G. Xie darbe nagrinėjami šilumokaičiai su tokiomis charakteristikomis:

- gofruota plokštelė
- eilių skaičius nuo 2 iki 7
- vamzdelio diametras nuo 12,5 iki 16,0 mm
- atstumas tarp plokštelių nuo 1,5 iki 4,5
- vertikalus atstumas tarp plokštelių 25 mm
- horizontalus atstumas 21,65 mm

Šilumos perdavimo koeficiento priklausomybės palyginimas su G. Xie nustatyta šilumos perdavimo koeficiento priklausomybę pateiktas 19 paveiksle.



Pav. 19 Šilumos perdavimo koeficiento palyginimas su G. Xie nustatyta empirine formule.

Palyginus darbe nustatytą priklausomybę su G. Xie`o nustatyta priklausomybe, prieinama prie išvados, kad ir G. Xie`o modelis netinka.

Kitų autorių nustatytos šilumos perdavimo koeficientų priklausomybės (Ma 2007; Kuvannarat 2006;) skiriasi iki 200 procentų. Pavyzdžiui, palyginus šiame darbe nagrinėjamo

šilumokaičio Nr. 2 šilumos perdavimo koeficientą ir šilumos perdavimo koeficientą apskaičiuotą pagal Youn & Kim išvestą priklausomybę (Youn 2007), paklaida svyruoja nuo 10 iki 70 procentų priklausomai nuo Reinoldso skaičiaus. Nors šilumokaitis Nr. 2 patenka į formulės taikymo ribas ($1,15 \leq P_t/P_l \leq 1,33$; $0,12 \leq s/D_c \leq 0,33$; $1,44 \leq x_f/P_d \leq 10,0$; $0,23 \leq P_d/s \leq 1,74$).

5. ŠILUMOKAIČIO MODELIAVIMAS BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODU

Vienas iš šio darbo uždavinių – šilumokaičio modeliavimas baigtinių elementų metodu. Yra didelė įvairovė modeliavimo programų, kurios veikia baigtinių elementų metodo pagrindu. Vienos populiariausių tokio tipo modeliavimo programų yra – Abaqus, Autodesk Simulation, ANSYS, COMSOL Multiphysics, Nastran ir t.t. Kadangi šios programos yra mokamos, buvo pasirinkta programa, kurią turi įsigijęs VGTU, tai yra ANSYS modeliavimo programa. Kadangi tokio tipo skaičiavimams reikia didelių kompiuterinių resursų, modeliavimui buvo pasirinktas šilumokaitis Nr.1 kuris turi tik dvi vamzdelių eiles ir kurio modelis yra mažiausias.

5.1. Modeliavimo eigos aprašymas

Modelio geometrijos kūrimui buvo naudojama Rhinoceros braižymo programa, kadangi ji specialiai pritaikyta braižymui. Nubraižius modelį, jis buvo išeksportuotas Standard ACIS Text (.sat) formatu.

ANSYS modeliavimo programa pritaikyta įvairiems uždaviniams spręsti: mechanikos, aerodinamikos, termodinamikos, elektrotechnikos ir t.t. Kadangi nagrinėjamu atveju yra tiek aerodinamikos, tiek termodinamikos reiškinių, pasirenkamas Fluid Flow (Fluent) skaičiavimo įrankis. Atidarius geometrijos skyrių („Geometry“) importuojamas anksčiau minėtas modelis. Šiame skyriuje aprašoma oro erdvė ir iš jos iškerpamas šilumokaitis, šie veiksmai atliekami, kad būtų išvengta programos klaidų, atlikus šiuos veiksmus šis skyrius uždaromas.

Baigtinių elementų metodas skirtas suskaidyti sudėtingos geometrinės formos elementą į N mažų elementų, kurių forma yra paprastesnė ir kurią įmanoma aprašyti matematinėmis formulėmis.

Kitas etapas yra baigtinių elementų tinklo kūrimas. Atidaromas tinklo kūrimo skyrius („Mesh“). Atidarome poskyrį „Mesh“ atliekame tokius nustatymus:

Relevance Center: Fine

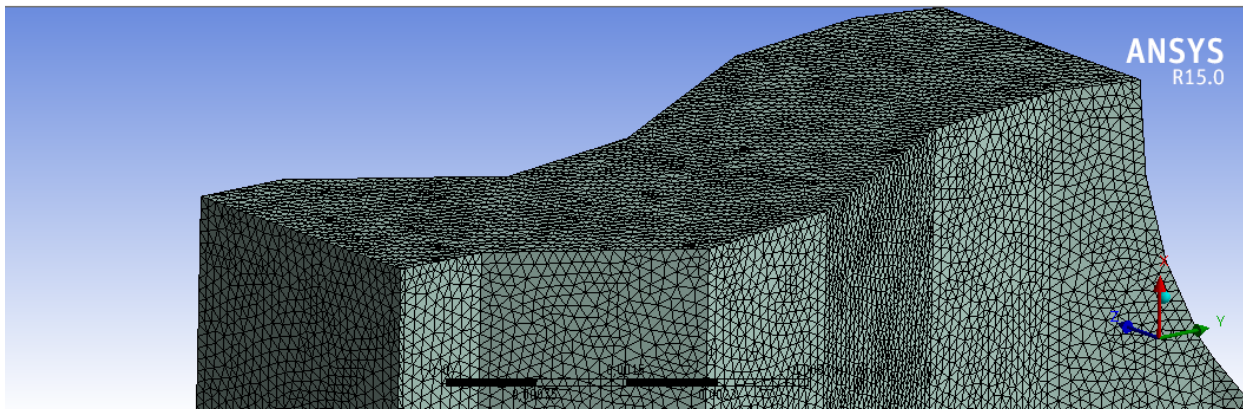
Initial Size Speed: Active Assembly

Smoothing: High

Transition: Slow

Span Angle Center: Fine

Paspaudžiame dešiniu pelės klavišu ant „Mesh“ mygtuko, spaudžiame „Sizing“ ir atsidariusiame lauke pasirenkame, kad vieno elemento dydis yra nedidesnis nei 0,1 mm. Atlikus minėtus nustatymus spaudžiame „Generate“. Sugeneruotą tinklą sudaro 5.258.718 elementų (pav. 20).



Pav. 20 Modelio diskretizuotas tinklas

Toliau pažymimos įtekėjimo ir ištekėjimo angos. Pasirinkus funkciją *Face* pasirenkame įtekėjimo angą ir, paspaudus dešinį pelės klavišą, pasirenkame *Create Named Selection*, pavadiname „Inlet“ ir spaudžiame *OK*. Analogiškai sukuriame ištekėjimo angą ir pavadiname „Outlet“. Taip pat reikia priskirti pavadinimą patalpos apsupčiai. Pasirenkame oro erdvę, spaudžiame dešinį klavišą ir pasirenkame *Create Named Selection*, pavadiname „Oras“ ir spaudžiame *OK*.

Modeliavimo nustatymai – „Setup“

Atidarome skyrių „Setup“ ir atsiradusiame lange uždėdame varnelę ties *Double Precision*, spaudžiame „OK“.

Toliau pasirenkamas skaičiavimo modelis, spaudžiame *Models* → atsidariusiame lange spaudžiame *Energy On* ir dar viename atsidariusiame lange patikriname ar uždėta varnelė ties *Energy Equation*, jeigu reikia uždėdame varnelę ir spaudžiame *OK*. Tada pasirenkame koks bus tekėjimo režimas: spaudžiame *Viscous* → pasirenkame *k-epsilon* → *standart* → *Enhanced Wall Treatment* → *OK*. Atlikus šiuos nustatymus pereiname prie naudojamų medžiagų aprašymo.

Spaudžiame *Materials* → *New* → *Create* → *Fluent Database* → ir randame reikiamas medžiagas – *Copper*, *Aluminium* ir *Air*.

Sukūrus reikiamas medžiagas, priskiriame medžiagas prie atitinkamų modelio elementų. Medžiagų priskyrimas atliekamas *Cell Zone Conditions* skiltyje. Anksčiau modelio

tūriams buvo priskirti pavadinimai, tačiau nebuvo priskirtos medžiagos. Tūriui *Oras* priskiriame tipą *Fluid*, spaudžiame *Edit*, atsidariusiame lange *Material name* pasirenkame *Air*. Analogiškai atliekame su plokštelėmis ir vamzdeliais, priskiriame tipą *Solid*, o medžiagą atitinkamai pasirenkame *Aluminium* ir *Copper*.

Aprašius modelio geometriją ir jo fizikines savybes pereiname prie kraštinių sąlygų aprašymo. Nustatome įtekėjimo angos kraštines sąlygas: pasirenkame *Boundary Conditions* → *Inlet* → *Type* → *Velocity inlet*, atsidariusiame lange įvedame norimą oro tekėjimo greitį ir spaudžiame *OK* (modeliavimo metu nagrinėjami šilumos mainai, esant oro greičiui tiekimo angoje 1, 2 ir 3 m/s). Nustatome ištekėjimo angos kraštines sąlygas, spaudžiame *Outlet* → *Type* → *Pressure Outlet*.

Kitas modelio aprašymo etapas yra sąsajų tarp elementų patikrinimas bei koregavimas. Kadangi modelyje vyksta energijos perdavimas tarp skirtingų elementų, reikia nurodyti sąsajos paskirtį. Spaudžiame *Cell Zone Conditions* → *Create/Edit*, pažiūrime kokios sąsajos yra jau sukurtos, ištriname ir sukuriame analogiškus tik pažymėjus varnele *Coupled Wall*.

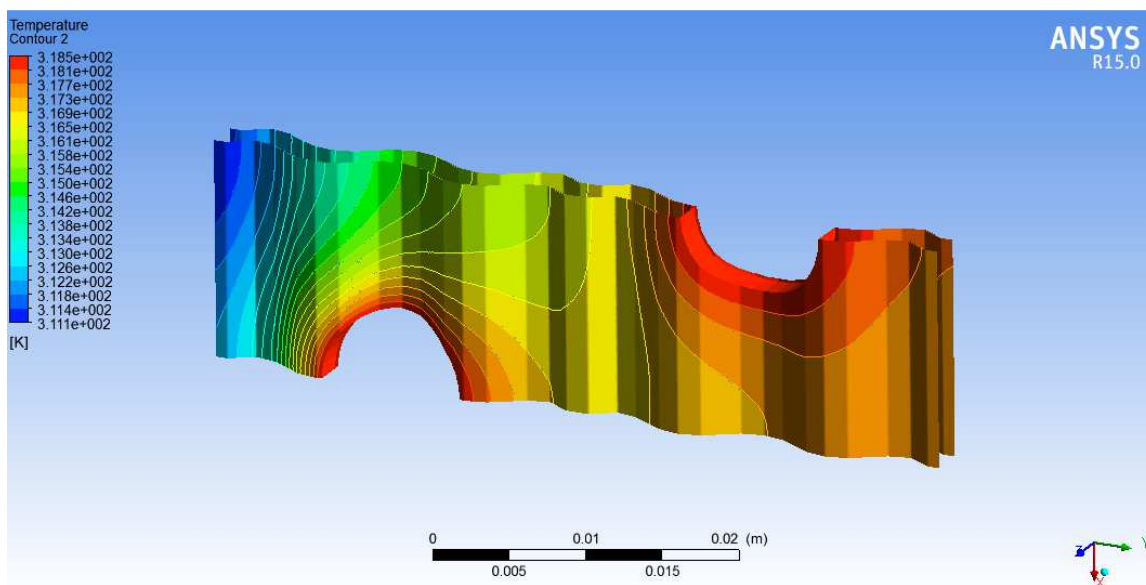
Patikrinus ir pakoregavus elementų sąsajas, atliekamas modelio paruošimas skaičiavimui, šiuo etapu programa patikrina ar nėra modelyje esminių klaidų ir ar galima pradėti modeliavimą. Spaudžiame *Solution Initialization* → *Hybrid Initialization*. Toliau spaudžiame *Run Calculation*, pasirenkame iteracijų skaičių (*Number of Iteration*) ir spaudžiame *Calculate*. Pasibaigus skaičiavimui pažiūrime į esantį grafiką ir, jeigu parametrai nenusistovėjo ir vis dar kinta, pakoreguojame iteracijų skaičių pagal poreikį ir vėl spaudžiame *Calculate*. Procedūrą kartojame iki tol, kol parametrų reikšmės nenusistovės. Atlikus skaičiavimą uždarome langą *Setup*.

5.2. Modeliavimo rezultatai

ANSYS projekto valdymo lange atidarome skyrių *Results* ir pereiname prie rezultatų peržiūros. Modeliavimo rezultatus galima peržiūrėti tiek skaitiniu pavidalu, tiek grafiniu. Grafinius rezultatus galima peržiūrėti tiek plokštumoje, tiek erdvėje. Sukuriame plokštumą/ tūrį, kuriuose bus pavaizduoti gauti rezultatai. Esančiame viršuje meniu spaudžiame *insert* → *Contour* → *OK*. Ties *variable* nustatome parametą, kurį norime matyti ir pagal poreikį nustatome ribas *Range*. Nustačius ribas, spaudžiame *Apply*.

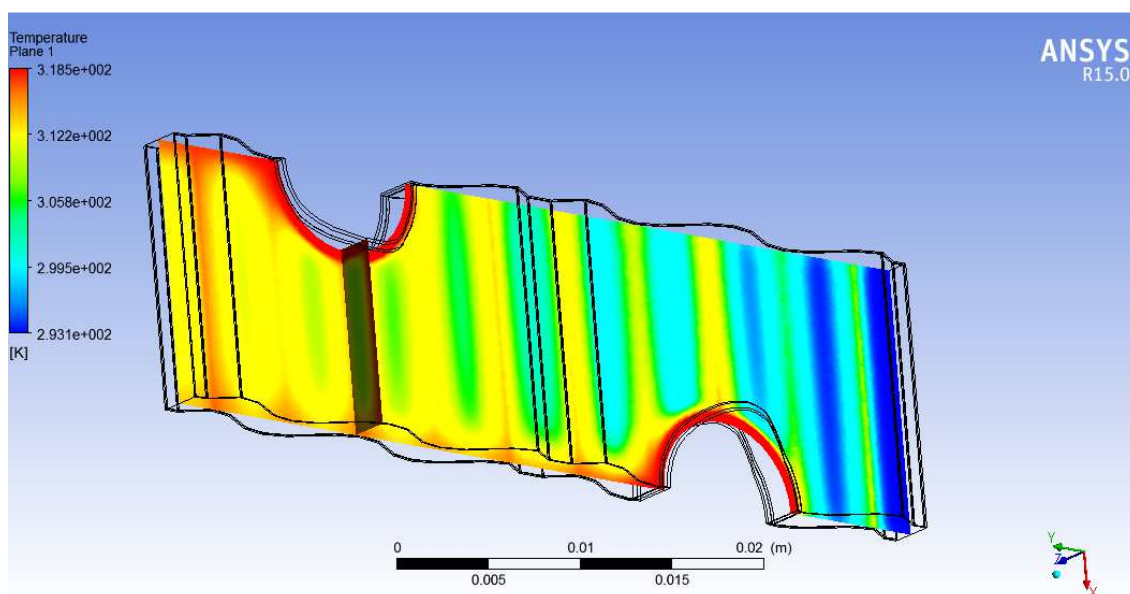
Modeliavimo rezultatai, esant oro įtekėjimo greičiui 1 m/s pateikti 21-24 paveikslėliuose. Modeliavimo rezultatai, esant oro greičiui 2 ir 3 m/s pateikti prieduose A ir B.

21 paveiksle matomas plokštelių temperatūrų pasiskirstymas orui tekant iš kairės į dešinę, šalto oro srautas apiplauna plokštelę ir vėsina ją. Kadangi ties įtekėjimu temperatūrų skirtumas yra didesnis, todėl įtekantis oras ją stipriau atvėsina. Dešinėje paveikslo pusėje matome, kad plokštelės temperatūra yra aukštesnė, kadangi oras jau sušilęs ir šilumos mainai mažiau intensyvūs.



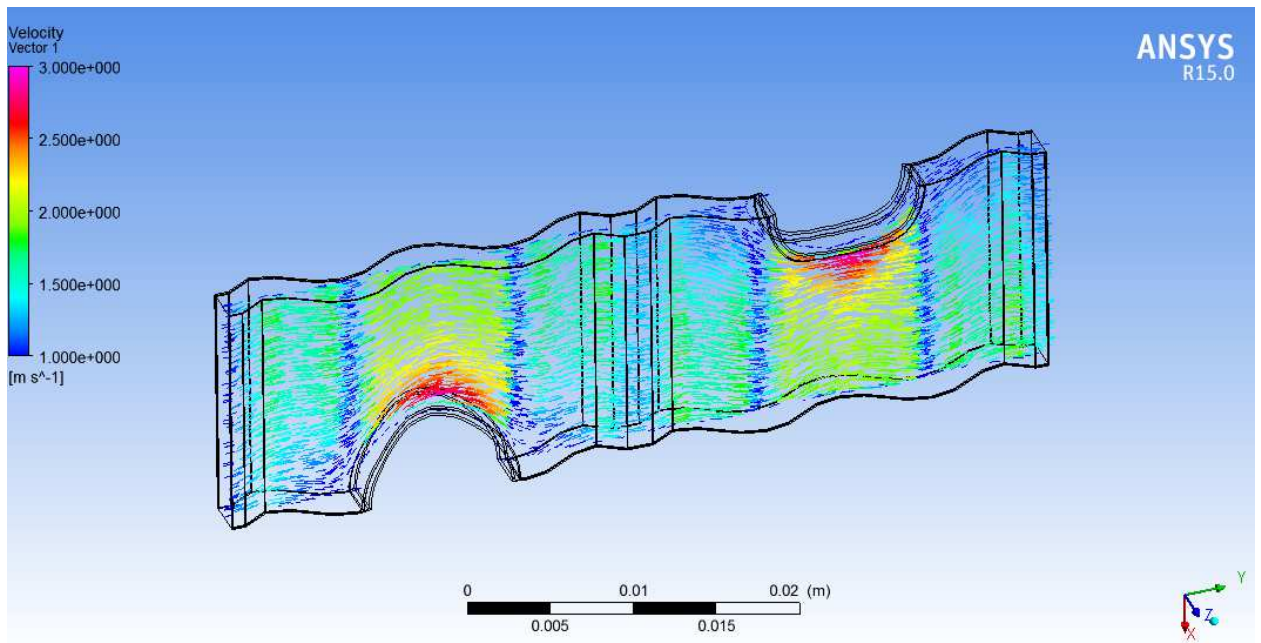
Pav. 21 Temperatūros pasiskirstymas plokštelės paviršiuje

22 paveiksle pavaizduotas oro temperatūros pasiskirstymas pjūvyje tarp plokštelių. Paveiksle matomas oro temperatūros kitimas ties vietomis, kur skerspjūvis yra arčiau plokštelių.



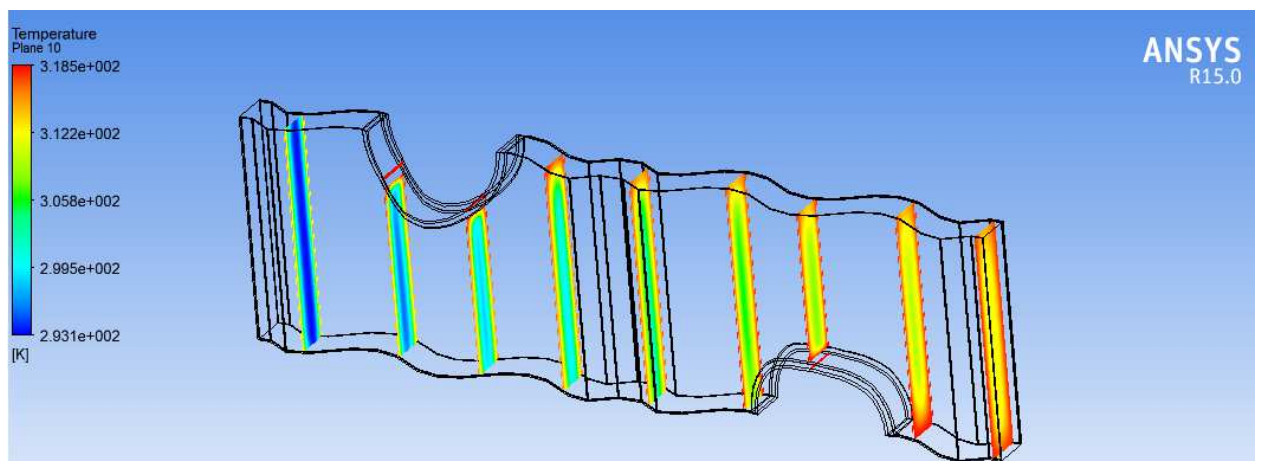
Pav. 22 Oro temperatūros pasiskirstymas išilginiame pjūvyje

23 paveiksle pavaizduotas oro greičio pasiskirstymas išilginiame pjūvyje. Matome, kad oro greitis artėjant bangai didėja, o pasiekus bangos viršūnę oro greitis staiga sumažėja, nes už jos atsiranda mažesnio slėgio zona.



Pav. 23 Išilginio skerspjūvio oro greičio pasiskirstymas

Oro temperatūros pasiskirstymas skersiniuose pjūviuose pavaizduotas 24 paveiksle. Žiūrint į pjūvius iš kairės į dešinę, matomas temperatūros kitimas ypač ties kiekvieno pjūvio viduriu. Didžiausiais temperatūros pokytis dėl oro srauto sumaišymo, matomas susiaurėjimo vietose.



Pav. 24 Skersinių pjūvių oro temperatūros pasiskirstymas

Grafiniai rezultatai esant oro įtekėjimo greičiui 2 ir 3 m/s pateikti A ir B prieduose.

Visi modeliavimo rezultatai skaitine išraiška pateikti 6lentelėje.

6 lentelė. Šilumokaičių modeliavimo rezultatai

Oro greitis įtekėjimo angoje, m/s	Vidutinė oro temperatūra ištekėjimo angoje, °C	Oro pasienio sluoksnio šilumos perdavimo koeficientas modelyje, W/m ² K	Eksperimentinis oro pasienio sluoksnio šilumos perdavimo koeficientas, W/m ² K	Modeliavimo rezultatų paklaida, %
1,0	41,58	35,67	32,01	11,41
2,0	38,62	53,48	49,17	8,75
3,0	36,38	65,88	61,84	6,53

Atlikus šilumokaičio kompiuterinį modeliavimą baigtinių elementų metodu buvo nustatytas oro pasienio sluoksnio šilumos perdavimo koeficientas, kurio paklaida svyruoja nuo 6,53 iki 11,43 procentų. Remiantis šiais skaičiais galima teigti, kad eksperimentinio bandymo rezultatai ir kompiuterinio modeliavimo rezultatai yra panašūs ir tiek eksperimentinis bandymas tiek modeliavimas atliktas teisingai.

Paklaidos atsiradimui galėjo turėti įtakos tokie veiksniai:

- Kompiuteriniame modeliavime buvo nagrinėjama tik maža šilumokaičio dalis;
- Kompiuteriniame modeliavime nebuvo modeliuojamas vandens srautas, kuris galėjo turėti įtakos rezultatui, dėl esančių posūkių ir trišakių realiaame šilumokaityje;
- Vandens pasienio sluoksnio šilumos perdavimo empirinė formulė taip pat turi tam tikrą paklaidą priklausomai nuo tekėjimo režimo;
- Realiaame nagrinėjamame šilumokaityje yra 8 hidrauliniai vandens kontūrai, o tai reiškia, kad šilumokaitis nėra 100 procentų priešsrovis;
- Realiaame šilumokaityje tarp vamzdelio ir plokštelės gali būti minimalus tarpas, kuris gali pabloginti šilumos mainus;
- Dėl esančio kondensato vonelės ir šilumokaičio dydžio reguliavimo mechanizmo maža dalis oro srauto galėjo pratekėti per esančius nesandarumus ir tokiu būdu sumažinti eksperimentinio bandymo šilumos perdavimo koeficientą.

6. IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

Išvados:

- Išnagrinėjus esamas šilumokaičių oras-vanduo skaičiavimo metodikas vėsavimo režimu ir įvertinus kiekvienos metodikos skaičiavimo tikslumą bei kompiuterinių resursų poreikį, buvo pasirinktas optimalus šių parametrų santykis, kurį atitiko LMTD-LMED skaičiavimo metodika.
- Eksperimentinių bandymų metu buvo testuoti 9 šilumokaičiai šildymo režimu ir išvesta empirinė formulė, kuri nusako visų šilumokaičių šilumos perdavimo koeficiento charakteristikas. Maksimalus šilumos perdavimo nuokrypis lygus 11,6 procentų. Taip pat 6 šilumokaičiai buvo testuoti vėsavimo režimu, nustatytas šlapios plokštelės pataisos koeficientas (Lewis'o skaičius), kuris svyruoja ribose nuo 0,75 iki 1,1, priklausomai nuo Reinoldso skaičiaus. Maksimalus galios nuokrypis lygus 3,7 procento.
- Naudojant ANSYS modeliavimo programą buvo atliktas šilumokaičio oras - vanduo modeliavimas baigtinių elementų metodu. Eksperimentinio bandymo ir modeliavimo šilumos perdavimo koeficientai skiriasi nuo 6,5 iki 11,4 procentų.
- Palyginus šilumos perdavimo koeficiento charakteristikas su kitų autorių nustatytomis charakteristikomis prieita prie išvados, kad kiekviena šilumokaičių grupė (su vienoda plokštelių forma arba atstumu tarp vamzdelių) turi savo lygtis, kurios negali būti taikomos kitiems šilumokaičiams.

Rekomendacijos:

- Šilumokaičio oras-vanduo pagrindinės šilumos perdavimo sudedamosios dalys yra oro ir vandens pasienių sluoksnių šilumos perdavimo koeficientai. Dažniausiai parinkimo metu oro greitis yra fiksuotas ir nėra galimybės reguliuoti oro pasienio sluoksnio šilumos perdavimo koeficiento, tačiau nereikėtų sumenkinti vandens pasienio sluoksnio šilumos perdavimo koeficiento, kadangi vamzdelio paviršiaus plotas yra dešimtimis mažesnis nei plokštelės plotas. Rekomenduojamas vandens tekėjimo režimas – turbulentinis.
- Kadangi šilumokaičiai gali turėti skirtingą hidraulinių kontūrų skaičių, jie gali būti tiek priešsroviniai, tiek mišrus (angl. *cross-flow*), todėl reikėtų atlikti papildomą

analizę, kurios tikslas nustatyti kokią įtaką daro hidraulinių kontūrų skaičius šilumokaičio šilumos perdavimui.

- Tolimesniuose bandymuose norint gauti tikslesnius rezultatus reikėtų mažinti kitų šiluminių varžų įtaką šilumos mainams. Šiam tikslui pasiekti reikėtų didinti vandens pasienio sluoksnio šilumos perdavimo koeficientą, maksimaliai minimizuoti galimą oro atsiradimą vandens sistemoje, taip pat eliminuoti šiluminę varžą tarp vamzdelio ir plokštelės (termopastos naudojimas).

LITERATŪRA

Standard For Forced-Circulation Air-Cooling and Heating Coils. AHRI 410, 2001.

Heat exchangers - Forced circulation air-cooling and air-heating coils - Test procedures for establishing the performance. EN 1216:1998.

Heat exchangers - Guidelines to prepare installation, operating and maintenance instructions required to maintain the performance of each type of heat exchangers. EN 307:1998.

Jiang H., Aute V., ir Radermacher R. CoilDesigner: a general-purpose simulation and design tool for air-to-refrigerant heat exchangers. *International Journal of Refrigeration* 29, 2006: 601-610.

Kastl B. K. Dehumidifying coil models for energy simulation and design. *Master of Science in Mechanical Engineering Oklagoma State University*, 2012: 120.

Khamis Monsour M., Hassab M. Thermal Desing of Cooling and Dehumifying Coils. *Mechanical Engineering Deparment, Faculty of Engineering, Beirut Arab University, Lebanon*, 2012: 29.

Kim, M.H., Bullard C.W. Air-Side Thermal Performance of Micro-Channel Heat Exchangers Under Dehumidifying Conditions. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. West Lafayette: School of Mechanical Engineering, 2000. 9.

Kim, N. H. Airside performance of fin-and-tube heat exchangers having sine wave fins under wet condition. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015: 10.

Kuvannarat T., Wang C. C., Wongwises S. Effect of fin thickness on the air-side performance of wavy fin-and-tube heat exchangers under dehumidifying conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006: 2587-2596.

Ma X., Ding G., Zhang Y., ir Wang K. Airside heat transfer and friction characteristics for enhanced fin-and-tube heat exchanger with hydrophilic coating under wet conditions. *International Journal of Refrigeration*, 2007: 1153-1167.

Pirompugd W., Wang C. C., Wongwises S. A review on reduction method for heat and mass transfer characteristics of fin-and-tube heat exchangers under dehumidifying conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009: 2370-2378.

Pirompugd W., Wang C. C., Wongwises S. Finite circular fin method for heat and mass transfer characteristics for plain fin-and-tube heat exchangers under fully and partially wet surface conditions. *Heat and Mass transfer*, 2007: 552-565.

Pirompugd W., Wang C. C., Wongwises S. Finite circular fin method for wavy fin-and-tube heat exchangers under fully and partially wet surface conditions. *Heat and mass transfer*, 2008: 16.

Taler D. A new heat transfer correlation for transition and turbulent fluid flow in tubes. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016: 15.

Taylor C. Measurement of finned-tube heat exchanger performance. *Master of Science in Mechanical Engineering Georgia Institute of Technology*, 2004: 124.

Wang, C.C. Decoupled modeling of chilled-water cooling coils. *ASHRAE transactions*, 2007: 484-493.

Wang J, ir Hihara E. Prediction of air coil performance under partially wet and totally wet condititions using equivalent dry-bulb temperature. *International Yournal of Refrigeration*, 2003: 293-301.

Xia L. Study on the heat and mass transfer taking place in a direct expansion air cooling and dehumidification coil. *The Hong Kong Polytechnic University*, 2010: 211.

Xia L., Chan M.Y., Deng S.M., Xu X.G.. A modified logarithmic mean enthalpy difference method for evaluating the total heat transfer rate of a wet cooling coil under both unit and non-unit Lewis Factor. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009: 2159-2164.

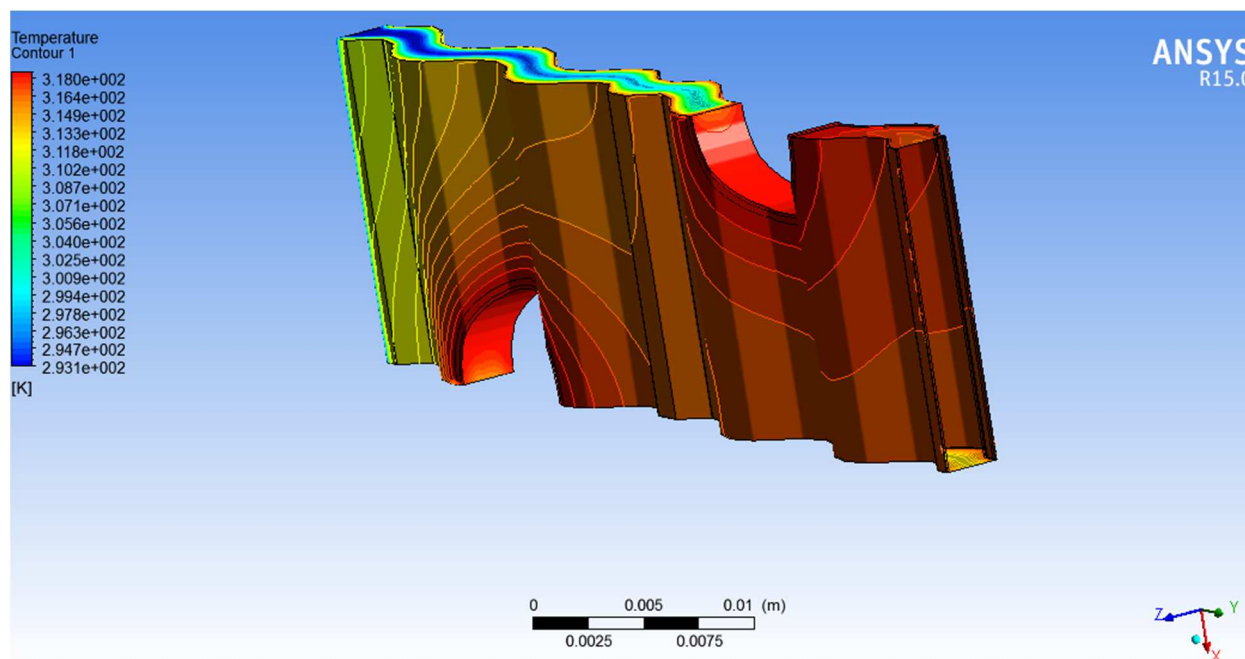
Xie G., Wang Q., Sunden B. Parametric study and multiple correlations on air-side heat transfer and friction characteristics of fin-and-tube heat exchangers with large number of large-diameter tube rows. *Applied Thermal Engineering*, 2009: 16.

Youn, B., Kim N.H. An experimental investigation on the airside performance of fin-and-tube heat exchangers having sinusoidal wave fins. *Heat Mass Transfer*, 2007: 14.

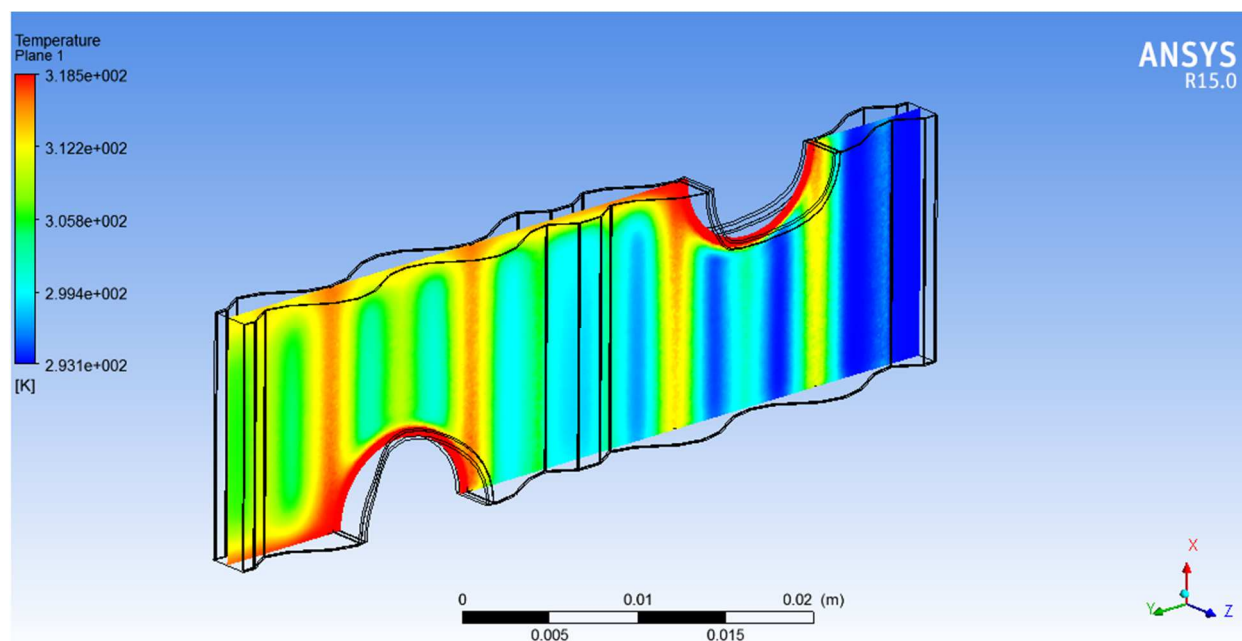
PRIEDAI

A priedas.

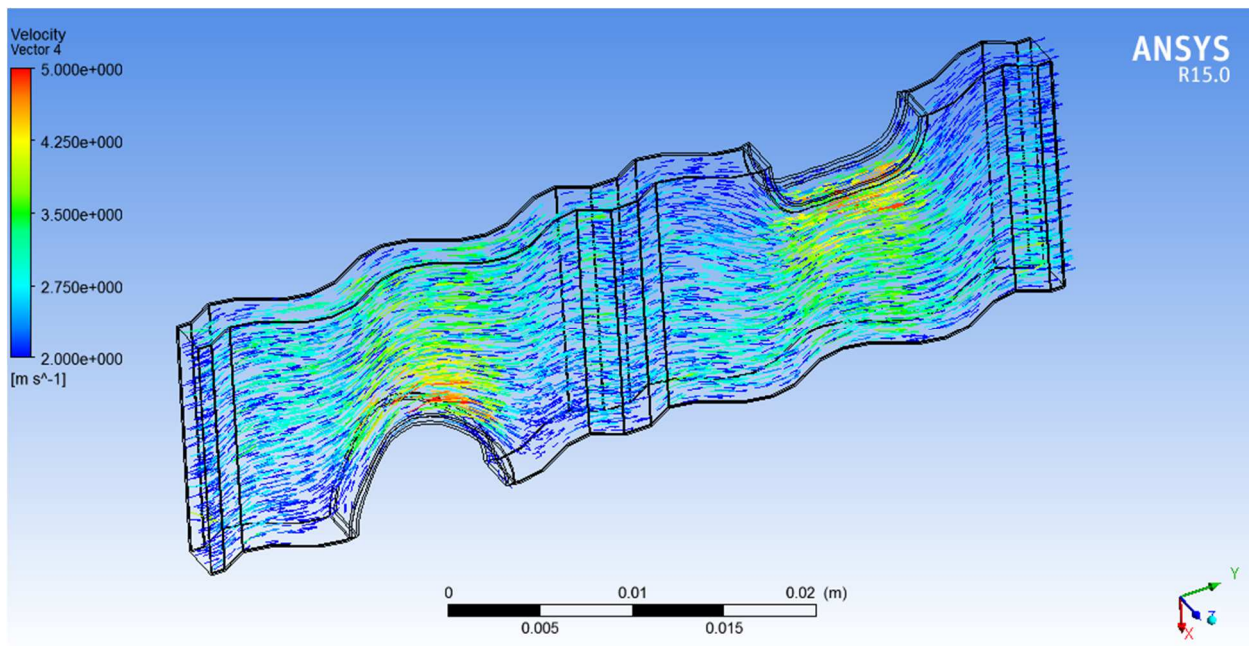
Šilumokaičio modeliavimo rezultatai esant oro įtekėjimo greičiui 2 m/s



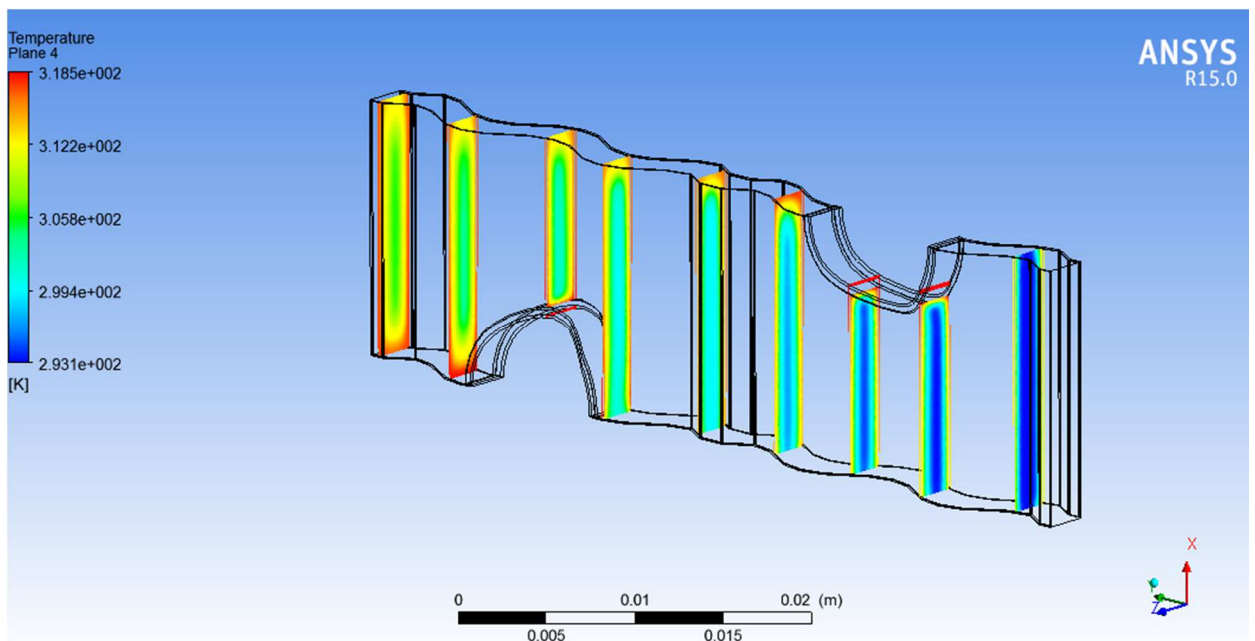
Pav. A.1 Plokštelių temperatūros pasiskirstymas esant oro greičiui 2 m/s



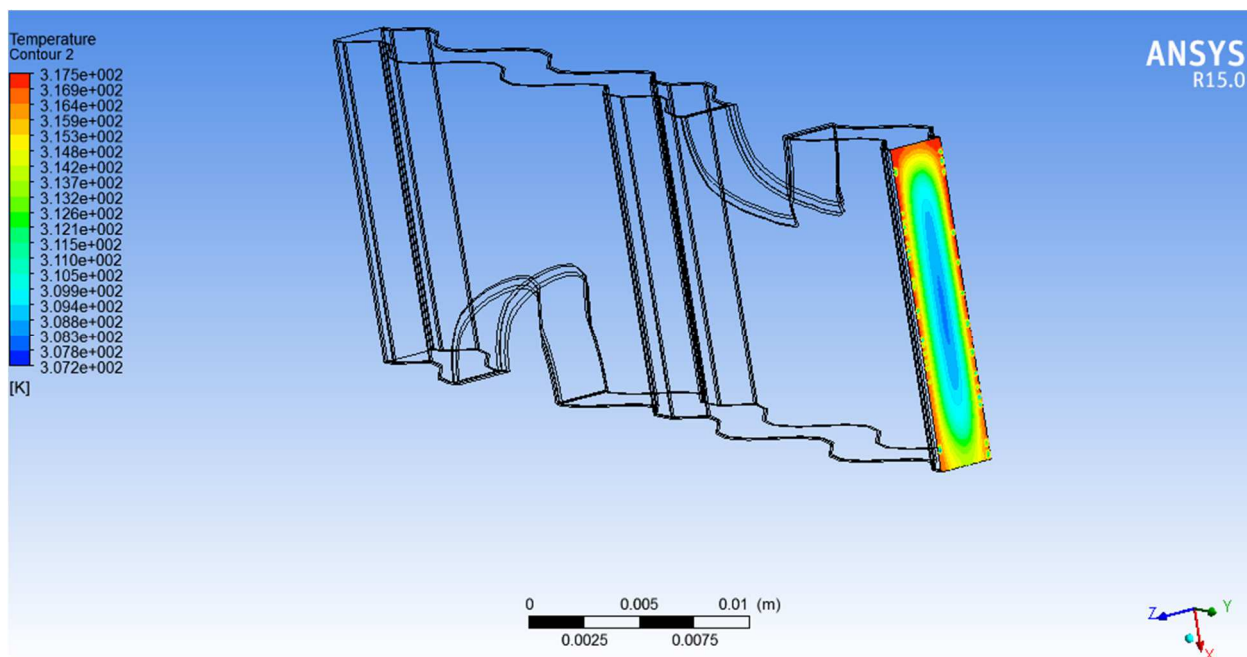
Pav. A.2 Išilginio skerspjūvio oro temperatūros pasiskirstymas esant oro įtekėjimo greičiui 2 m/s



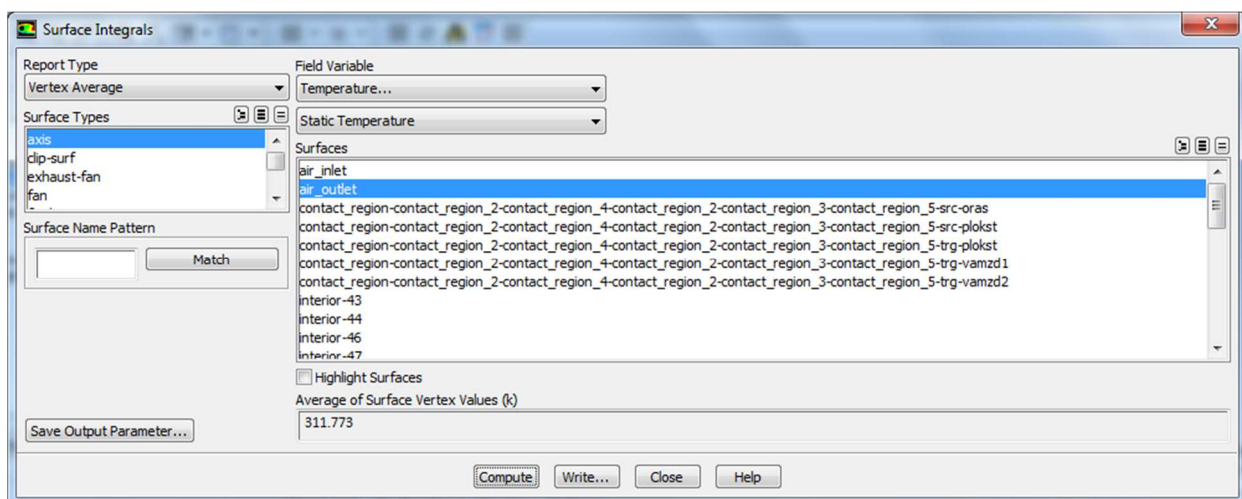
Pav. A.3 Tūrinis oro greičio pasiskirstymas esant oro įtekėjimo greičiui 2 m/s



Pav. A.4 Skersinių pjūvių oro temperatūros pasiskirstymas esant oro įtekėjimo greičiui 2 m/s



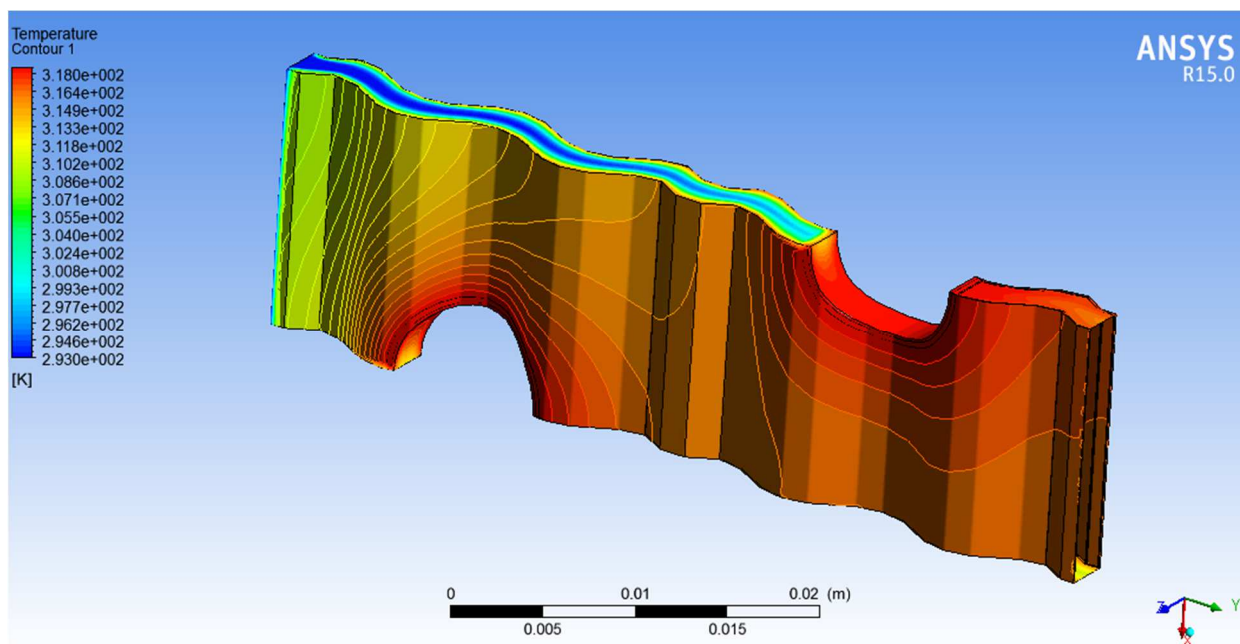
Pav. A.5 Oro temperatūros pasiskirstymas oro išteklėjimo angos esant oro įtekėjimo greičiui 2 m/s



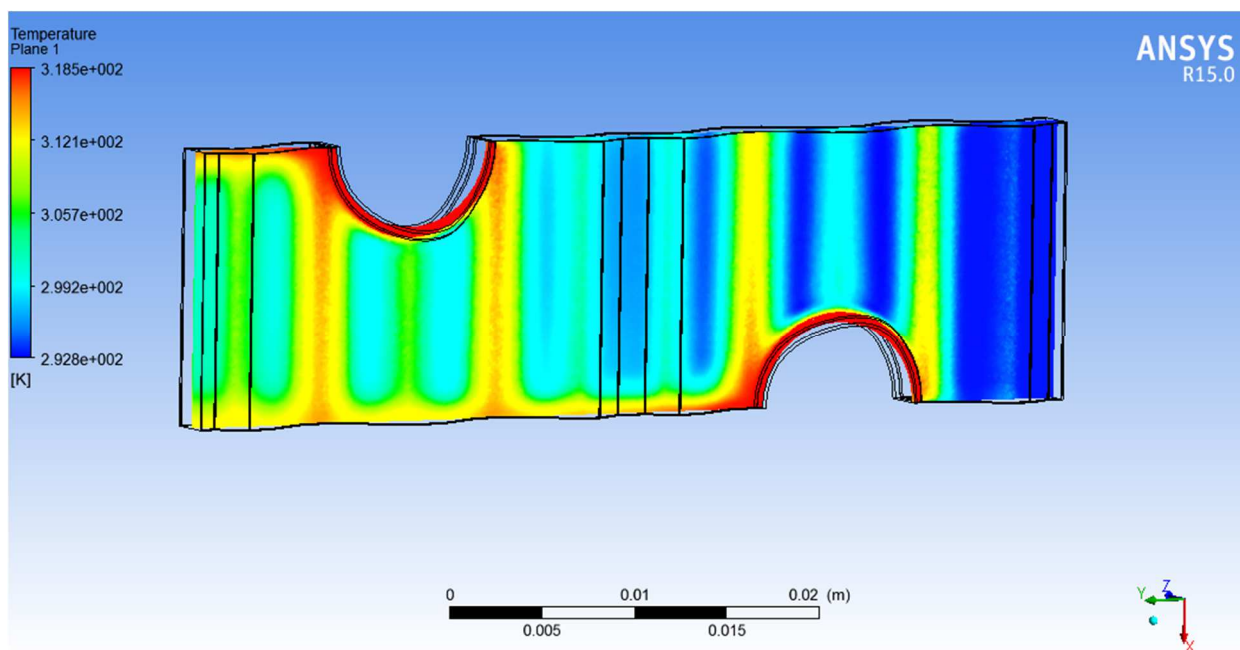
Pav. A.6 Vidutinė oro temperatūra oro išteklėjimo angos esant oro įtekėjimo greičiui 2 m/s

B priedas.

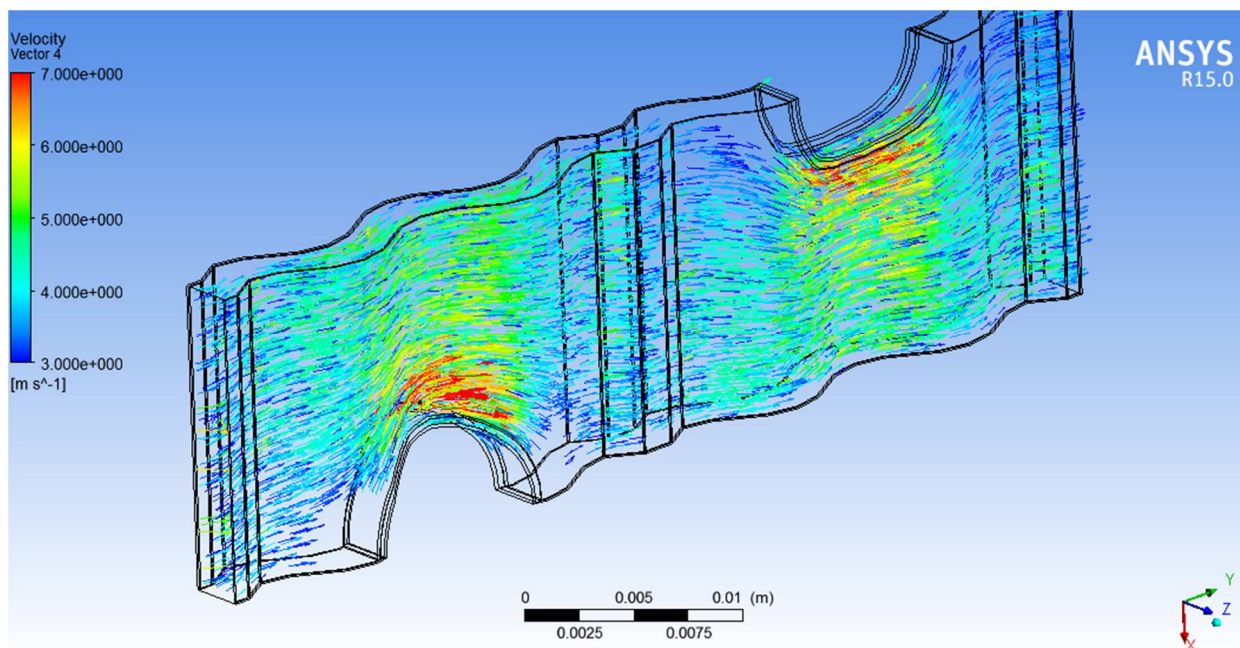
Šilumokaičio modeliavimo rezultatai esant oro įtekėjimo greičiui 3 m/s



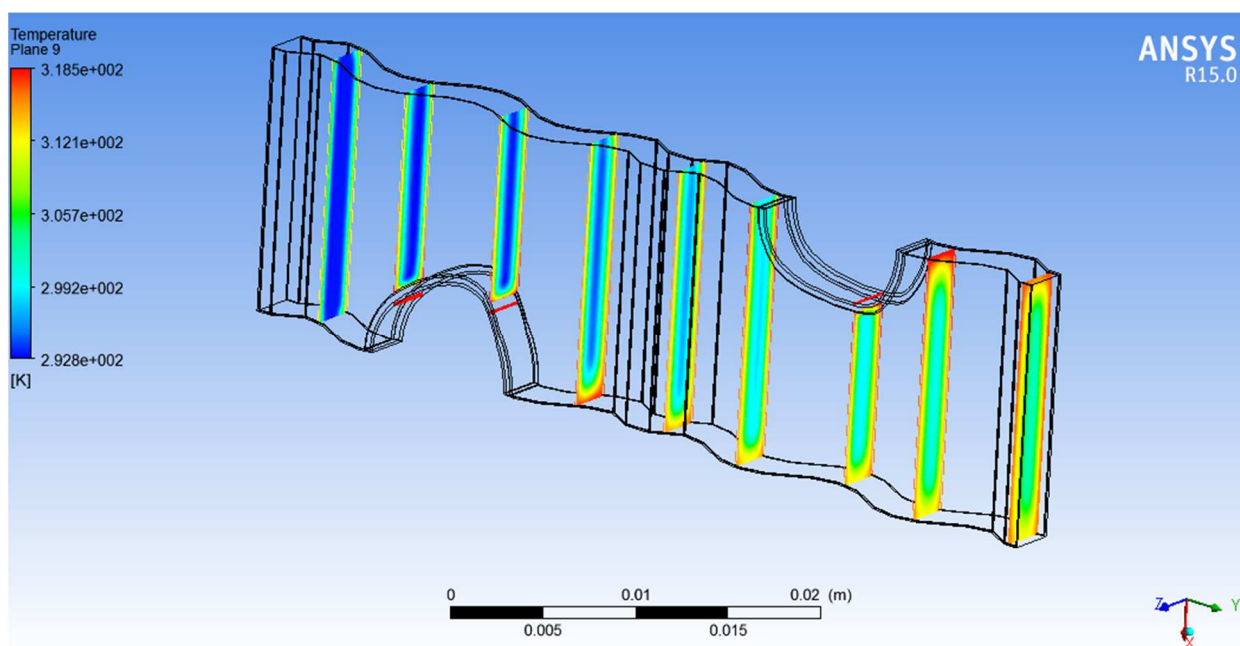
Pav. B.1 Plokštelių temperatūros pasiskirstymas esant oro greičiui 3 m/s



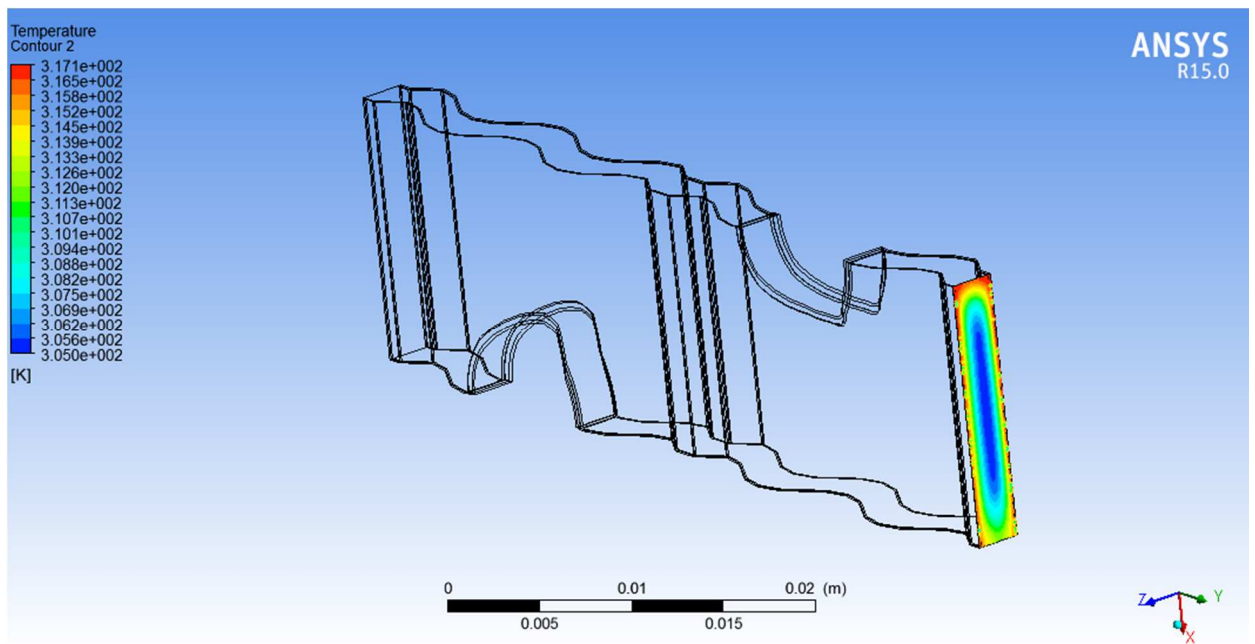
Pav. B.2 Oro temperatūros pasiskirstymas išilginiame skerspjūvyje esant oro įtekėjimo greičiui 3 m/s



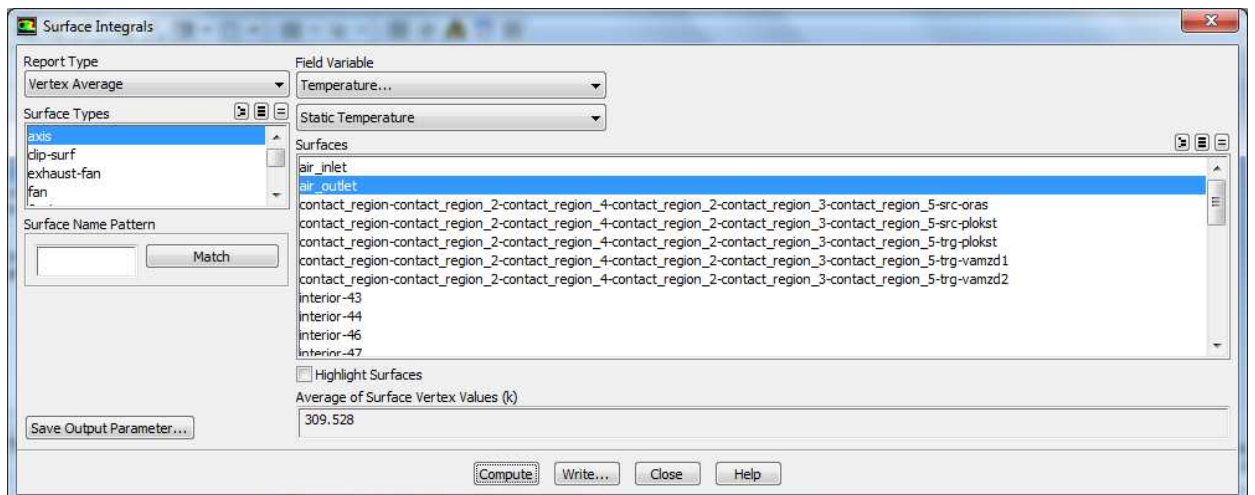
Pav. B.3 Tūrinis oro greičio pasiskirstymas esant oro įtekėjimo greičiui 3 m/s



Pav. B.4 Oro temperatūros pasiskirstymas skersiniuose pjūviuose esant oro įtekėjimo greičiui 3 m/s



Pav. B.5 Oro temperatūros pasiskirstymas oro išteklėjimo angijoje esant oro įtekėjimo greičiui 3 m/s



Pav. B.6 Vidutinė oro temperatūra oro išteklėjimo angijoje esant oro įtekėjimo greičiui 3 m/s