

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS
MECHANIKOS IR STATYBOS INŽINERIJOS KATEDRA

Paulius Gedžius

**VĖDINIMO AGREGATO SU ŠILUMOS UTILIZAVIMO
FUNKCIJA ENERGETINIO EFEKTYVUMO TYRIMAS**

Magistro baigiamasis darbas

Šiauliai, 2015

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS
MECHANIKOS IR STATYBOS INŽINERIJOS KATEDRA

**VĒDINIMO AGREGATO SU ŠILUMOS UTILIZAVIMO
FUNKCIJA ENERGETINIO EFEKTYVUMO TYRIMAS**

Magistro baigiamasis darbas

Autorius - Paulius Gedžius (MM-13 gr.)

Vadovas - doc. dr. D. Čikotienė


Recenzentas - doc. dr. S. Rimovskis

Katedros vedėja - doc. dr. L. Kelpšienė

Šiauliai, 2015

TVIRTINU

Mechanikos inžinerijos katedros vedėjas


2013 m. rugsėjo mėn. 27 d.

MAGISTRO DARBO UŽDUOTIS

Išduota magistrantui **Pauliui Gedžiui**

Darbo tema: „Vėdinimo agregato su šilumos utilizavimo funkcija energetinio efektyvumo tyrimas“

Patvirtinta 2015 m. kovo mėn. 20 d. fakulteto dekanų potvarkiu Nr. TGMDP-02.

1. Darbo tikslas

Taikant vieną iš vėdinimo agregatų energetinio efektyvumo tyrimo metodų nustatyti tiriamojo vėdinimo agregato faktinį energetinį efektyvumą. Nustatyti galimas temperatūrinio efektyvumo priklausomybes nuo realių agregato veikimo sąlygų.

2. Darbo struktūra

Apžvelgti energetiškai efektyvaus vėdinimo ir vėdinimo agregato su šilumogrąžos funkcija energetinio efektyvumo sąvokas, išanalizuoti šilumokaitos procesą. Apžvelgti vėdinimo agregato su šilumos atgavimo funkcija energetinio efektyvumo tyrimo metodus ir pasirinkti optimaliausią. Ištirti šilumokaitos procesus vėdinimo agregate. Aprašyti tyrimui naudojamą eksperimentinę įrangą, išanalizuoti tiriamojo vėdinimo agregato konstrukciją.

Aprašyti atliktus tyrimus. Pateikti tyrimų rezultatus bei išvadas.

Pateikti rekomendacijas, kurios padėtų padidinti vėdinimo agregato energetinį efektyvumą bei patobulinti patį gaminį.

Darbo pateikimo terminas 2015 m. birželio mėn. 9 d.

Užduotį gavau



(magistranto vardas, pavardė)



(parašas, data)

2013-09-27

Vadovas



(pareigos, vardas, pavardė)



(parašas, data)

2013-09-27

TURINYS

SANTRAUKA LIETUVIŲ KALBA.....	6
SANTRAUKA ANGLŲ KALBA.....	7
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	8
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	9
ĮVADAS.....	11
1. VĖDINIMO AGREGATO SU ŠILUMOGRAŽOS FUNKCIJA ENERGETINIS EFEKTYVUMAS IR JO ĮVERTINIMO METODŲ APŽVALGA.....	13
1.1 Efektyvus vėdinimas.....	13
1.2 Vėdinimo agregato energetinio efektyvumo sąvoka.....	15
1.3 Procesai, vykstantys vėdinimo agregate su šilumos atgavimo funkcija.....	16
1.4 Logaritminio temperatūrų skirtumo metodas.....	18
1.5 NTU metodas.....	19
1.6 Temperatūrinio efektyvumo metodas.....	20
2. VĖDINIMO AGREGATO SU ŠILUMOGRAŽOS FUNKCIJA TYRIMAS.....	22
2.1 Termodinaminiai pagrindai šiluminiam efektyvumui nustatyti.....	22
2.2 Šalinamo oro šilumos utilizavimas.....	23
2.3 Plokštelių šilumos utilizatorių konstrukcija.....	24
2.4 Sukamųjų regeneracinių utilizatorių konstrukcija.....	25
2.5 Oro apdorojimo procesai sukamajame regeneraciniame šilumokaityje.....	27
2.6 Priešužšaliminė sukamųjų regeneracinių šilumokaičių apsauga.....	29
2.7 Temperatūrinis šilumokaičių efektyvumas.....	30
2.8 Trumpas eksperimentinės įrangos aprašymas.....	32
2.9 Vėdinimo agregatas „Rekuperatorius 400“.....	35
3. „REKUPERATORIAUS 400“ TEMPERATŪRINIO EFEKTYVUMO IR JO GALIMŲ PRIKLAUSOMYBIŲ NUO ĮVAIRIŲ VEIKSNIŲ TYRIMAS.....	38
3.1 Tyrimo parametrų monitoringas ir apdorojimas.....	39
3.1.1 2014 m. Gruodžio 3 d. duomenų monitoringas ir analizė.....	39
3.1.2 2014 m. Gruodžio 4 d. duomenų monitoringas ir analizė.....	41

3.1.3 2014 m. Gruodžio 5 d. duomenų monitoringas ir analizė.....	44
3.1.4 2014 m. Gruodžio 6 d. duomenų monitoringas ir analizė.....	46
3.2 Tyrimo duomenų apibendrinimas.....	48
4. PUBLIKACIJA IR DALYVAVIMAS KONFERENCIJOJE.....	49
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS.....	50
LITERATŪRA.....	52
PRIEDAI.....	53
I PRIEDAS. Tiriamasis objektas – „Rekuperatorius 400“	53
II PRIEDAS. „Rekuperatoriuje 400“ naudojamas flanšas FLAU-R Ø200.....	53
III PRIEDAS. Šilumokaitis <i>Klingenburg GS 25 / 450</i> ir jo techninė charakteristika.....	54
IV PRIEDAS. „Rekuperatoriuje 400“ naudojamas ventiliatorius <i>R3G 190 RC05 03</i>	55
V PRIEDAS. „Rekuperatoriuje 400“ naudojami filtrai F7/G5.....	56
VI PRIEDAS. Dalyvavimas konferencijoje.....	57

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS
MECHANIKOS IR STATYBOS INŽINERIJOS KATEDRA

Paulius Gedžius. VĖDINIMO AGREGATO SU ŠILUMOS UTILIZAVIMO FUNKCIJA ENERGETINIO EFEKTYVUMO TYRIMAS. Magistranto baigiamasis darbas / vadovė doc. dr. D. Čikotienė.

SANTRAUKA

Efektyvus energijos vartojimas yra svarbi Lietuvos Respublikos ir visos Europos Sąjungos energetikos politikos dalis. Labai daug energijos suvartojama šildant pastatus, kuriuos taip pat būtina vėdinti. Vėdinant pastatą, galima rekuperuoti nemažą dalį šiluminės energijos. Tokia paskirtis yra vėdinimo agregatų su šilumos utilizavimo funkcija. Rekuperatoriai turi būti saugūs, patikimi ir, svarbiausia, energetiškai efektyvūs.

Taikant temperatūrinio efektyvumo metodą tiriamas vėdinimo agregatas „Rekuperatorius 400“. Tyrimo metu nustatytas faktinis vėdinimo agregato temperatūrinis efektyvumas. Pastebėtos galimos jo priklausomybės nuo realių agregato darbo sąlygų. Konstatuotas faktas, kad „Rekuperatorius 400“ nėra tinkamas eksploatuoti pasyviame name. Darbe aprašomas tyrimo procesas yra orientuotas į vėdinimo agregato su šilumogrąžos funkcija energetinio efektyvumo gerinimą, agregato tobulinimą.

Reikšminiai žodžiai: vėdinimo agregatas, efektyvus vėdinimas, šiluminė energija, šilumos utilizavimas, temperatūrinis efektyvumas.

ŠIAULIAI UNIVERSITY
FACULTY OF TECHNOLOGY AND NATURAL SCIENCES
DEPARTMENT OF MECHANICAL AND STRUCTURAL ENGINEERING

Paulius Gedžius. THE RESEARCH OF ENERGY EFFICIENCY OF VENTILATION UNIT WITH HEAT UTILIZATION FUNCTION. Master final work / research advisor doc. dr. D. Čikotienė.

SUMMARY

Efficient use of energy is important part of energetic policy of Republic of Lithuania and whole European Union. A lot of energy is used for heating buildings, which can also be sure to ventilate. During the buildings ventilation it is possible to recuperate a large amount of the thermal energy. It is the purpose of ventilation units with heat recovery (utilization) function. The recuperators must be safe, reliable and most important energy-efficient.

Using method of the thermal efficiency studied ventilation unit „Rekuperatorius 400“. During the research was determined actual thermal efficiency of the ventilation unit „Rekuperatorius 400“. Observed it available adictions from the real actual working conditions of ventilation unit. Tiding of fact, that „Rekuperatorius 400“ it is not able to operate in a passive houses. This work describes the research process – oriented ventilation unit with heat recovery function energy efficiency improvements and whole unit improvement.

Keywords: ventilation unit, efficient ventilation, thermal energy, heat recovery (utilization), thermal efficiency.

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Šilumokaičių savybės.....	14
1.2 lentelė. Šilumnešių temperatūrų skirtumų skaičiavimų atvejai.....	17

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Vėdinimo agregato energinio efektyvumo vertinimas.....	16
1.2 pav. Šilumos mainai šilumokaityje: M_1, M_2 – įeinantys ir išeinantys oro srautai; α ir β – šilumos potencialų skirtumas; Q – šiluminė energija ir jos judėjimo kryptis.....	16
1.3 pav. Pagrindiniai vėdinimo agregatuose su šilumos atgavimo funkcija vykstantys procesai: a – šildymas, b – vėsinimas, c – kondensavimas ir d – garavimas.....	17
1.4 pav. Šilumokaičio srautų schema temperatūriniam efektyvumui nustatyti.....	20
2.1 pav. Plokštelinio rekuperatoriaus bendrasis vaizdas ir plokštelinio šilumokaičio schema: 1 – rėmas; 2 – plokštelės; 3 – standinamieji intarpai.....	25
2.2 pav. Šilumnešio judėjimo kryptys plokštiniame šilumokaityje: a - pasrovinė (<i>parallel flow</i>); b - kryžminė (<i>cross flow</i>) ir priešsrovinė (<i>counter flow</i>).....	25
2.3 pav. Sukamasis regeneracinis šilumokaitis: 1 – korpusas; 2 – rotorius; 3 – prapūtimo segmentas (<i>purge sector</i>); 4 – elektros variklis.....	26
2.4 pav. Slėgis sukamajame šilumokaityje.....	27
2.5 pav. Oro apdorojimo procesai nehigroskopiškame rotoriuje.....	27
2.6 pav. Oro apdorojimo procesai higroskopiškame rotoriuje.....	28
2.7 pav. Sukamojo utilizatoriaus apšalimo galimybės nustatymas.....	29
2.8 pav. Šilumokaičio srautų schema temperatūriniam efektyvumui nustatyti: 1 – lauko oro; 2 – pašilusio šilumokaityje oro; 3 – patalpos oro; 4 – atvėsusio šalinamo oro temperatūros; t_t – tiekiamo į patalpą oro temperatūra.....	30
2.9 pav. Vėdinimo agregatų su plokšteliu ir rotoriniu šilumokaičiu šilumos atgavimo principinė schema: t_1 – lauko oro temperatūra; t_2 – tiekiamo oro temperatūra į patalpą; t_3 – ištraukiamas oras iš patalpos.....	31
2.10 pav. Bandymo stendo bendrasis vaizdas.....	32
2.11 pav. 1 – šviežio oro paėmimo iš lauko ortakis; 2 – papildomas elektrinis pašildytuvas (<i>preheater</i>); 3 – išmetimo ortakis.....	33
2.12 pav. Vėdinimo agregato pajungimo sektorius (matomi izoliuoti pajungimo ortakiai).....	33
2.13 pav. Matavimo ortakių segmentas: segmente įmontuoti temperatūros, drėgmės, slėgio davikliai.....	33

2.14 pav. Valdymo pultas.....	34
2.15 pav. Patalpos drėgmės ir temperatūros imitavimo moduliai: 1 - oro drėkintuvas; 2 - garų surinkimo kamera.....	34
2.16 pav. Valdymo pultas ir prietaisų skydelis.....	35
2.17 pav. „Rekuperatorius 400“: 1 – ventiliatoriai; 2 – plokštelinis kryžminių srautų šilumokaitis; 3 – elektrinis kaloriferis; 4 – apėjimo sklendė; 5 – paneliniai filtrai; 6 – automatikos skyrius.....	36
3.1 pav. Temperatūros.....	39
3.2 pav. Ventiliatorių tachometrija (greičių matavimas).....	40
3.3 pav. Slėgių parametrai.....	40
3.4 pav. Temperatūrinis efektyvumas.....	41
3.5 pav. Temperatūros (violetinės spalvos nepaisyti).....	42
3.6 pav. Ventiliatorių tachometrija.....	42
3.7 pav. Slėgių parametrai.....	43
3.8 pav. Temperatūrinis efektyvumas.....	43
3.9 pav. Temperatūros (violetinės spalvos nepaisyti).....	44
3.10 pav. Ventiliatorių tachometrija.....	44
3.11 pav. Slėgių parametrai.....	45
3.12 pav. Temperatūrinis efektyvumas.....	45
3.13 pav. Temperatūros (violetinės spalvos nepaisyti).....	46
3.14 pav. Ventiliatorių tachometrija.....	46
3.15 pav. Slėgių parametrai.....	47
3.16 pav. Temperatūrinis efektyvumas.....	47

ĮVADAS

Darbo aktualumas. Ateities namas – pasyvus namas! Tai komfortiškas, energetiškai efektyvus, ekonomiškas, jaukus ir draugiškas aplinkai statinys. Pasyvus namas suteikia šiluminį jaukumą ir vėdina orą nenaudojant tam papildomos energijos. Oro kokybė optimali!

Pasyvus namas – tai namas be aktyvios šildymo sistemos. Jame naudojami pasyvios energijos šaltiniai, tokie, kaip saulės energija, dirvožemio šiluma (geoterminė energija), žmogaus kūno šiluma, apšvietimas, buitiniai prietaisai ir kt. Pasyvus namas neteršia aplinkos!

Pasyvus namas nėra visiškai naujas statybos būdas. Nuo įprastinių namų skiriasi šias pagrindiniais kriterijais: gera šilumos izoliacija, kokybiškais langais ir šilumą grąžinančia (utilizuojančia) vėdinimo sistema. Kiekvienas žingsnelis, vedantis link efektyvumo mažina šiluminės energijos poreikį ir taip sutaupomi energijos kaštai.

Taigi, pasyvaus namo koncepcija (gera šilumos izoliacija, konstrukcijos be šalčio tiltelių, sandarumas, rekuperacinė vėdinimo sistema, šiltų langų instaliavimas) yra iš esmės orientuota į efektyvų šiluminės energijos taupymą. Todėl labai svarbus elementas pasyviame name yra vėdinimo sistema su šilumos utilizavimo funkcija. Pasyvus namas yra kompleksiškai apibrėžiamas *pasyvaus namo charakteristikomis ir kokybės kriterijais*. Pats svarbiausias efektyviam rekuperaciniam vėdinimui pasyviame name: *vėdinimo įrenginio šiluminio naudingumo efektyvumas turi būti ne mažesnis nei 75%, o suvartojama galia neturi viršyti 0,45 Wh/m³ tiekiamo oro*. Tai sudėtingas uždavinys projektuojant vėdinimo agregatą su šilumos utilizavimo funkcija.

Taigi, vėdinimo agregato energetinio efektyvumo tyrimas yra labai aktualus, kuriant vėdinimo agregatą su šilumos atgavimo funkcija.

Tyrimo objektas. Vėdinimo agregatas „Rekuperatorius 400“.

Tyrimo tikslas. Taikant vieną iš vėdinimo agregatų energetinio efektyvumo tyrimo metodų (temperatūrinio efektyvumo metodą), nustatyti tiriamojo vėdinimo agregato faktinį energetinį efektyvumą. Nustatyti galimas temperatūrinio efektyvumo priklausomybes nuo realių agregato veikimo sąlygų. Konstatuoti faktą, ar tiriamasis vėdinimo agregatas yra energetiškai tinkamas eksploatuoti pasyviame name.

Tyrimo uždaviniai:

- Apžvelgti vėdinimo agregatų su šilumogražos funkcija energetinio efektyvumo tyrimo metodus ir pasirinkti optimaliausią tirti vėdinimo agregatui „Rekuperatorius 400“;
- Išanalizuoti šilumokaitos procesus pagrindiniame vėdinimo agregato su šilumos atgavimo funkcija elemente - šilumokaityje (labai panašūs procesai vyksta ir visame agregate);
- Pateikti eksperimentinės įrangos konstrukcijos ir veikimo principo trumpą aprašymą;
- Išanalizuoti vėdinimo agregato „Rekuperatorius 400“ konstrukciją ir apžvelgti jo veikimo principus;
- Atlikti vėdinimo agregato „Rekuperatorius 400“ šilumogražos energetinio efektyvumo bandymus prie realių sąlygų.
- Rasti temperatūrinio efektyvumo galimas priklausomybes nuo realių sąlygų;
- Konstatuoti faktą, ar vėdinimo agregatas „Rekuperatorius 400“ gali būti tinkamas eksploatuoti pasyviame name pagal vėdinimo energetinį kriterijų pasyviame name. Jei netinkamas, pateikti konstrukcines ar funkcines alternatyvas agregato tobulinimui.

Darbo struktūra:

Pirmame skyriuje apžvelgiamos energetiškai efektyvaus vėdinimo ir vėdinimo agregato su šilumogražos funkcija energetinio efektyvumo sąvokos, išanalizuojama šilumokaitos proceso esmė ir pateikiami vėdinimo agregato su šilumos atgavimo funkcija energetinio efektyvumo tyrimo metodai bei pasirenkamas optimaliausias pagal prieinamus materialinius ir energetinius išteklius tyrimui atlikti.

Antrame skyriuje teoriškai tiriami šilumokaitos procesai vėdinimo agregato pagrindiniame elemente - šilumokaityje ir pačiame agregate. Aprašoma eksperimentinė įranga ir jos veikimo principai, pritaikant temperatūrinio efektyvumo tyrimo metodiką, pateikiamas tiriamojo vėdinimo agregato eskizas ir išanalizuojama jo konstrukcija.

Trečiame skyriuje aprašomas atliktas „Rekuperatoriaus 400“ eksperimentinis tyrimas, pritaikant temperatūrinio efektyvumo metodą. Grafiškai pateikiami tyrimo metu fiksuoti parametrai, pateikiamos galimos temperatūrinio efektyvumo priklausomybės nuo realių agregato darbo sąlygų. Pateiktos išvados apie tyrimo rezultatus ir rekomendacijos, siekiant didinti „Rekuperatoriaus 400“ energetinį efektyvumą ir tobulinti patį gaminį.

1. VĒDINIMO AGREGATO SU ŠILUMOGRAŽOS FUNKCIJA ENERGETINIS EFEKTYVUMAS IR JO ĮVERTINIMO METODŲ APŽVALGA

1.1 Efektyvus vėdinimas

Bet kokį, o ypač – gerai apšiltintą ir sandarų pastatą, būtina vėdinti dėl gyventojų ar darbuotojų sveikatos, komforto bei darbingumo, kad šildymo katilai dirbtų saugiai ir naudingai, kad išsisklaidytų kvapai ir susikaupę teršalai, žemės natūraliai skleidžiamas radonas bei vandens garai.

Pastato vėdinimo sistemos gali būti kelių tipų [1]:

- natūralaus vėdinimo sistema;
- mechaninio vėdinimo *be* šilumogražos sistema;
- mechaninio vėdinimo *su* šilumograža sistema.

Natūralus vėdinimas naudojamas tada, kai tiekiamo ar šalinamo oro nereikia valyti, o naudotojas, nekenkdamas kitiems, gali užtikrinti norminį mikroklimatą ir švarų orą. *Mechaninis vėdinimas* naudojamas, kai nėra natūralaus vėdinimo arba juo neįmanoma patalpoje išlaikyti norminių oro parametrų.

Vėdinimo sistemose, kurios veikia pagal natūralios traukos principą, šiltas šalinamas oras natūraliai išstumiamas tiekiamo šalto oro srauto. Nežiūrint to, kad natūraliai ventiliacija užtikrinti nėra naudojama energija, per šį procesą prarandama šilumos. Kai vėdinama mechaniškai nenaudojant šilumogražos, su šalinamu oru netenkama šilumos, o ventiliatoriams ir kitiems sistemos įrenginiams dirbti yra naudojama elektros energija. Šilumos nuostoliai dėl vėdinimo gali sudaryti 20-40 % pastato šilumos poreikio. Efektyvi mechaninio vėdinimo sistema su šilumos atgavimo funkcija ir galimybe reguliuoti oro srautus, atsižvelgiant į poreikį gali labai sumažinti patalpų šildymo išlaidas. Energija turi būti taupoma optimaliai valdant vėdinimo sistemą, o mechaninio vėdinimo sistema savo darbui turi vartoti minimalų energijos kiekį, tačiau neleistina taupyti energijos, bloginant patalpų oro kokybę [1].

Mechaninio vėdinimo sistemos turi būti automatizuotos. Automatizacijos ir valdymo lygis parenkamas pagal pastato ir sistemų paskirtį, pastate ar patalpoje vykdomų technologinių procesų reikalavimus bei ekonominį tikslumą. Automatizavimas turi užtikrinti patikimą ir efektyvų sistemos veikimą. Vėdinimo sistema turi būti ne statiška, o tiesiogiai reaguoti į pastato viduje vykstančius procesus. Vėdinimo įrangos automatika nustato mikroklimato pokyčius patalpose ir

operatyviai į juos reaguoja. Jei vėdinimo įrangos darbas neautomatizuotas, energija švaistoma be reikalo. Energijos nuostolius galima sumažinti programuojant vėdinimo sistemos darbą pagal tam tikrą valandinį režimą. Tada vėdinimo sistema pati išsijungia ir įsijungia kai to reikia. Šiuolaikinė moderni įranga gali automatiškai keisti vėdinimo intensyvumą ir pagal CO₂, bei drėgmės pokyčius [1].

Iš patalpų šalinamas oras šilumą gali perduoti tiekiamam į patalpas orui. Šiuo tikslu naudojami *šilumokaičiai*. *Šilumokaitis* - tai prietaisas, kuriame vyksta energetiniai šilumos mainai. Aukštesnės temperatūros šilumnešis perduoda šiluminę energiją žemesnės temperatūros šilumnešiui. *Šilumnešiu gali būti dujos (pvz.: oras) ar fluidai (pvz.: vanduo, glikolis) [1].*

Pagal veikimo principą šilumokaičiai skirstomi į plokštinius, rotacinius, atskirų srautų su tarpiniu šilumnešiu, šilumos siurblius ir šilumos vamzdžius (žr. 1.1 lentelę). Plokštiniuose šilumokaičiuose šildantysis ir šildomasis šilumnešiai yra atskirti šilumai laidžia sienele ir tiesiogiai nesimaišo. Rotaciniuose šilumokaičiuose tą patį paviršių pakaitomis „apiplauna“ arba šildantysis arba šildomasis šilumnešiai. Šilumokaičiai su tarpiniu šilumnešiu, šilumos siurbliai ir šilumos vamzdžiai daugiausia naudojami pramonėje, bet nėra paplitę dėl žemo naudingumo koeficiento (iki 50%) ir didelės kainos. Rotaciniai šilumokaičiai yra efektyviausi ir atsiperka greičiausiai. Plokštiniai šilumokaičiai yra pigesni nei rotaciniai, bet prasčiau veikia žiemą [1,8].

1.1 lentelė Šilumokaičių savybės

Šilumokaičio tipas	NK*, proc.	Recirkuliacija**, proc.	Privalumai	Trūkumai
Plokštelinis	50-60	< 1	Paprasta ir nebrangi konstrukcija, nėra judančių dalių.	Išdžiovina patalpų orą, kai temperatūra lauke - žemiau 0°C, apšąla, krinta NK.
Rotacinis	60-85	< 5	Aukštas NK, šaltuoju metų laiku atkuria drėgmę patalpose, regeneruoja šaltį kondicionuojamose patalpose, labai maža apledėjimo tikimybė, geras kainos ir kokybės santykis.	Yra judančių mechaninių dalių: variklis, diržas, guolis - jos dėvėsi ir genda, maišosi skirtingi oro srautai, patenka kvapai (apribotas naudojimas).
Atskirų srautų su tarpiniu šilumnešiu	Apie 50	0	Tiekiamo ir šalinamo oro srautai gali būti skirtingose vietose.	Žemas NK, brangi ir sudėtinga konstrukcija, yra judančių mechaninių dalių.
Šilumos siurblys	Apie 50	0	Galima naudoti norint atvėsinti orą patalpose.	Žemas NK, brangi ir sudėtinga konstrukcija, yra judančių mechaninių dalių.
Šilumos vamzdis	Apie 50	0	Kompaktiškas, maža tikimybė, kad apledės.	Žemas NK, brangi ir sudėtinga konstrukcija.

* Naudingumo koeficientas; ** Viso ar dalies šalinamo oro grąžinimas į tas pačias ar kitas patalpas.

1.2 Vėdinimo agregato energetinio efektyvumo sąvoka

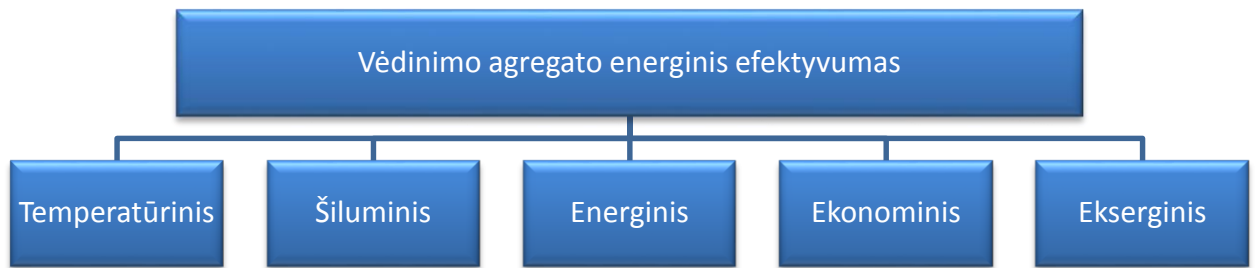
Imliausi energijai pastato inžinierinėse sistemose yra energiją transformuojantys įrenginiai – vėdinimo agregatai su šilumos atgavimo funkcija. Principinis tokio vėdinimo agregato komponentas – šilumokaitis, nes jame slypi didelis potencialas energijai taupyti arba didinti termodinaminį sistemos naudingumą [2].

Vėdinimo kaip proceso tikslas - užtikrinti geros kokybės oro tiekimą ir jo palaikymą patalpose [3; STR 2.09.02:2005]. Oro kokybė pastatuose bei jų patalpose daro įtaką tiek pastatų, tiek juose esančių bei dirbančių žmonių savijautai. Esant nepakankamam oro kiekiui, pastato atitvaruose kaupiasi drėgmė, formuojasi pelėsis, žmonės gali susirgti įvairiomis kvėpavimo ir kitomis ligomis.

Vėdinimo orui paruošti ir jam tiekti naudojami įvairios paskirties vėdinimo įrenginiai. Dažnai, bet ne visuomet parenkami vėdinimo įrenginiai su šilumogražiais, nors tokių agregatų naudojimas yra skatinamas ne tik Lietuvos teisės aktuose (STR 2.09.02:2005), bet ir Europos Sąjungos normatyviniuose dokumentuose (2010/31/EB, [4,9]).

Mechaninėse vėdinimo sistemose su šilumos atgavimo funkcija svarbiausia atgauti kuo daugiau šiluminės energijos iš šalinamo oro ir sunaudoti kuo mažiau elektros energijos pačiam vėdinimo procesui vykdyti (ventiliatorių darbas, papildomas tiekiamo oro pašildymas, jonizavimas, drėkinimas ir t.t.). Taigi, vėdinimo agregato su šilumos atgavimo funkcija energetinis efektyvumas - tai minėto įrenginio geba atgauti kuo daugiau šiluminės energijos iš šalinamo oro, vėdinimo procesui sunaudojant kuo mažiau energijos. Savaime suprantama, kad vėdinimo agregato energetinis efektyvumas negali būti lygus 100%, nes fiziškai neįmanoma atgauti visos šiluminės energijos iš šalinamo oro, be to egzistuoja vėdinimo procese šiluminiai nuostoliai. Vėdinimo agregato energinis efektyvumas priklauso nuo šilumos atgavimo efektyvumo šilumokaityje (apie 80% ir) šilumos nuostolių bei elektros energijos išėigos agregate (apie 20%). Todėl nustatant vėdinimo agregato energetinį efektyvumą naudojami tie patys metodai kaip ir nustatant šilumokaičių energetinį efektyvumą.

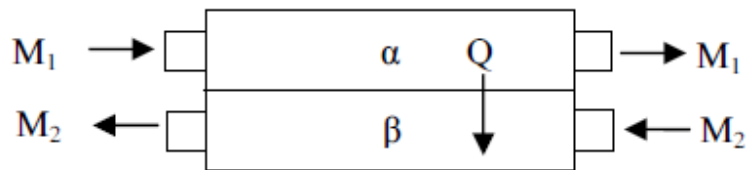
Vėdinimo agregato energetinio efektyvumo vertinimo rodikliai pavaizduoti 1.1 pav.



1.1 pav. Vėdinimo agregato energetinio efektyvumo vertinimas

1.3 Procesai, vykstantys vėdinimo agregate su šilumos atgavimo funkcija

Vykdamas ir intensyvinant įvairius technologinius procesus oras yra šildomas arba vėsinamas naudojant šilumokaičius. Šilumokaičiuose vykstančių procesų metu šiluma (vėsa) perduodama nuo vieno karštesnio (α) (karštesnio arba vėsesnio) šilumnešio kitam (β). Šie procesai pavaizduoti 1.2 pav.



1.2 pav. Šilumos mainai šilumokaityje: M_1, M_2 - įeinantys ir išeinantys oro srautai; α ir β - šilumos potencialų skirtumas; Q - šiluminė energija ir jos judėjimo kryptis

Bet kokiam procesui vykti reikalingas potencialų (koncentracijų, temperatūrų, slėgių, įtampų) skirtumas. Nagrinėjant šiluminius procesus vėdinimo agregate su šilumos atgavimo funkcija pagrindinis potencialų skirtumas yra temperatūrų skirtumas, kuris ir yra jų veikimo priežastis. Apibendrinančiu temperatūrų skirtumo šiluminiuose skaičiavimuose yra vadinamas šilumokaičio vidutinis temperatūrų skirtumas. Priklausomai nuo šilumnešių tekėjimo krypties šilumokaityje, skirtingai apskaičiuojamas vidutinis temperatūrų skirtumas ΔT_m , naudojamas šilumos perdavimo lygtyje (1.1)

$$Q = A \times k \times \Delta T_m , \quad (1.1)$$

čia Q – šilumokaičio galia, (W); k – šilumos perdavimo koeficientas, (W/m^2K); A – šilumos perdavimo plotas, (m^2); ΔT_m – vidutinis temperatūrų skirtumas, (K).

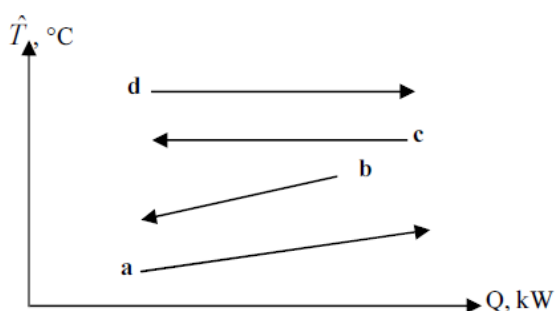
Dydžių A ir k sandauga traktuojama šilumokaičių šiluminiu pralaidumu. Kai šilumnešiai šilumokaityje teka priešroviui, šilumnešių temperatūrų skirtumo skaičiavimo atvejai pateikiami 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Šilumnešių temperatūrų skirtumo skaičiavimo atvejai

Šilumnešių temperatūrų skirtumas $\Delta T'$ tame šilumokaičio gale, kur jis yra didesnis	Šilumnešių temperatūrų skirtumas $\Delta T''$ tame šilumokaičio gale, kur jis yra mažesnis
Jeigu $T_1'-T_2'' > T_1''-T_2'$, tai $T_1'-T_2''$	$T_1' - T_2''$
Jeigu $T_1'-T_2'' < T_1''-T_2'$, tai $T_1''-T_2'$	$T_1'' - T_2'$
Jeigu $\frac{\Delta T'}{\Delta T''} < 2$, tuomet ΔT_m apskaičiuojamas kaip aritmetinis vidurkis	
Jeigu $\frac{\Delta T'}{\Delta T''} > 2$, tuomet ΔT_m apskaičiuojamas kaip vidutinis logaritminis temperatūrų skirtumas (angl. Log-Mean Temperature Difference (LMTD) , t.y. $\Delta T_m = \frac{\Delta T' - \Delta T''}{\ln \frac{\Delta T'}{\Delta T''}}$)	

1.2 lentelėje simboliai T' – pradinė šilumnešio temperatūra, °C, T'' – galinė šilumnešio temperatūra, °C. Indeksu „1“ žymimas šildantysis šilumnešis, o „2“ – šildomasis šilumnešis.

Pagrindiniai vėdinimo agregatuose su šilumos atgavimo funkcija vykstantys procesai: šildymas (a), vėsinimas (b), kondensavimas (c) ir garavimas (d) apibendrintai gali būti pavaizduoti (1.3 pav.).



1.3 pav. Pagrindiniai vėdinimo agregatuose su šilumos atgavimo funkcija vykstantys procesai: a – šildymas, b – vėsinimas, c – kondensavimas ir d – garavimas

Vėdinimo agregatų su šilumos atgavimo funkcija vykstantys procesai ir veikimo režimai priklauso visų pirma nuo lauko oro temperatūros, apskritai nuo klimatinių parametų reikšmių – suprantama, kad jos nuolat kinta [5].

1.4 Logaritminio temperatūrų skirtumo metodas

Kad galėtų vykti šilumos mainai vėdinimo agregate su šilumos atgavimo funkcija, turi būti temperatūrų skirtumas (potencialų skirtumas) tarp jame tekančių oro srautų ΔT_m . Norint įvertinti šilumokaitos procesą šis skirtumas apskaičiuojamas remiantis 1.2 formule:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{2}, \quad (1.2)$$

čia Δt_1 – temperatūrų skirtumas tarp šiltesnio paduodamo į agregatą ir šaltesnio išmetamo iš agregato oro srautų, (°C); Δt_2 – temperatūrų skirtumas tarp šiltesnio išmetamo iš agregato ir šaltesnio paduodamo į agregatą oro srautų, (°C).

Tai vidutinis temperatūrų skirtumas. Kuo šis skirtumas didesnis, tuo vėdinimo agregatas su šilumos atgavimo funkcija (pirmiausia pagrindinis jo elementas – šilumokaitis) yra efektyvesnis. Logaritminis temperatūrų skirtumas apskaičiuojamas pagal 1.3 formulę [5]:

$$\Delta t_{\ln} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}}. \quad (1.3)$$

Iš formulės matyti, kad vėdinimo agregato su šilumos atgavimo funkcija logaritminis temperatūrinis efektyvumas (vadinasi ir energetinis efektyvumas) bus tuo didesnis, kuo aukštesnė bus įeinančio į šilumokaitį šiltesnio oro srauto M_1 temperatūra ir kuo žemesnė įeinančio šaltesnio oro srauto M_2 temperatūra (žr. 1.2 pav.). Tuo daugiau šiluminės energijos Q bus sutaupoma vykdant šilumos rekuperaciją vėdinimo proceso metu. Norint gauti tokias optimalias srautų konfigūracijos sąlygas taikomi įvairūs vėdino agregatų su šilumos atgavimo funkcija konstravimo metodai.

Logaritminis temperatūrų skirtumo metodas yra universalus klasikinis metodas, kuriuo galima įvertinti vėdinimo agregato energetinį - funkcinį efektyvumą. Tačiau skaičiavimai šiuo metodu yra gana sudėtingi ir imlūs laikui [5].

Norint programiniu būdu apskaičiuoti logaritminį temperatūrų skirtumą nuskaitomi ir registruojami parametrai yra [5]:

- įeinančio į vėdinimo agregatą su šilumos atgavimo funkcija šiltojo oro srauto temperatūra;
- įeinančio į vėdinimo agregatą su šilumos atgavimo funkcija šaltojo oro srauto temperatūra;
- išeinančio iš vėdinimo agregatą su šilumos atgavimo funkcija sušilusiojo oro srauto temperatūra;
- išeinančio iš vėdinimo agregato su šilumos atgavimo funkcija atvėsusio oro srauto temperatūra.

Tuomet programinė įranga skaičiuoja logaritminį temperatūrų skirtumą ir įvertina vėdinimo agregato energetinį efektyvumą (naudingumą) [5].

1.5 NTU metodas

Kai nėra pakankamai duomenų logaritminiam temperatūrų skirtumui apskaičiuoti, naudojamas kitas alternatyvus metodas vėdinimo agregatui su šilumos atgavimo funkcija (šilumokaičiu) efektyvumo analizei – *NTU* (angl. *Number of Transfer Units (NTU)*). Metodą sukūrė ir išplėtojo amerikiečių inžinierius W. M. Kays (1972-1982 metais) [6].

Iš esmės metodas yra paremtas trijų labai svarbių termodinaminių parametru priklausomybe. Tai yra *šilumos perdavimo koeficientu, specifiniu šilumos perdavimo plotu ir srautų šiluminės talpos koeficientu*. Vėdinimo agregato su šilumos atgavimo funkcija efektyvumas yra NTU funkcija [6]:

$$\epsilon = f\left(NTU, \frac{(M \times c_p)_{min}}{(M \times c_p)_{max}}\right), \quad (1.4)$$

čia NTU – perdavimo vienetų skaičius (bedimensis parametras), C_{min} – minimalus šilumnešio masinio debito ir savitosios šilumos sandaugos dydis (W/K); C_{max} – maksimalus šilumnešio masinio debito ir savitosios šilumos sandaugos dydis (W/K).

Tuomet NTU apskaičiuojamas pagal 1.5 formulę. Šiems parametrams nustatyti reikia žinoti srautų mases, temperatūras ir greičius (debitus) [6]:

$$NTU = \frac{UA_s}{(M \times c_p)_{min}}, \quad (1.5)$$

čia U – Šilumos perdavimo koeficientas (W/m²K); A_s – šilumą perduodančio paviršiaus plotas (m²).

Remiantis NTU skaičiavimo formule galima teigti, kad vėdinimo agregato su šilumos atgavimo funkcija energetinis efektyvumas priklauso pirmiausia nuo instaliuoto šilumokaičio tipo, jo konstrukcijos ir medžiagos, šilumą perduodančio paviršiaus specialaus padengimo (jei toks yra) ir nuo paties agregato vidinės konstrukcijos. Automatizuotai nustatant NTU reikia nuskaityti ir registruoti parametrus [6]:

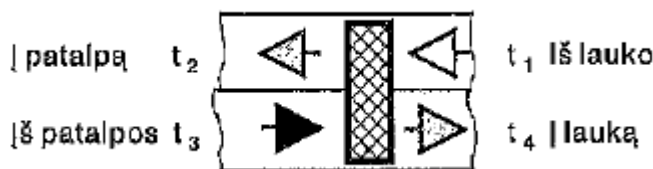
- tiekiamo oro srauto greitis (debitas);
- ištraukiamo oro srauto greitis (debitas);

- tiekiamo oro temperatūra;
- ištraukiamo oro temperatūra;
- reikia žinoti šilumą perduodančių paviršių plotus šilumokaityje ir vėdinimo agregate.

1.6 Temperatūrinio efektyvumo metodas

Vėdinimo agregato su šilumos atgavimo funkcija temperatūrinis efektyvumas yra *nusakomas santykiu tarp to, kiek laipsnių tiekiamasis oras pašilo vėdinimo agregato šilumokaityje, bei šalinamo ir lauko oro temperatūrų skirtumo t. y. kiek galėjo pašilti idealiu atveju. Visa tai yra išreiškiama procentine išraiška pvz.; jeigu vėdino agregato su šilumos atgavimo funkcija temperatūrinis efektyvumas yra apie 60%, tai reiškia, kad tokio po šiluminio apdorojimo procesu tiekiamas šviežias oras atgauna apie 60% šiluminės energijos iš šalinamo šilto oro. Vadinasi šilumokaičio temperatūrinis efektyvumas yra dar didesnis pvz.: apie 80%, nes agregate yra patiriami šiluminiai nuostoliai. Taip pat šiluminiai nuostoliai yra patiriami ir pačiame šilumokaityje. Siekiant sumažinti šilumos nuostolius agregate didžiausią įtaką turi jo konstrukcija (konstrukciniai sprendimai)[6,7,8].*

Vėdinimo agregato su šilumos atgavimo funkcija temperatūrinis efektyvumas apskaičiuojamas pagal 1.4 pav. [6,7].



1.4 pav. Šilumokaičio srautų schema temperatūriniam efektyvumui nustatyti

Tuomet temperatūrinis efektyvumas apskaičiuojamas pagal 1.6 formulę:

$$\eta_t = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} \times 100\% \quad (1.6)$$

čia: t_1 – pradinė tiekiamo oro temperatūra (°C); t_2 – pašilusio tiekiamo oro temperatūra (°C); t_3 – pradinė šalinamo oro temperatūra (°C).

Temperatūrinis efektyvumas nėra lygus atgaunamos šilumos daliai, nes jo išraiškoje nėra šalinamo ir tiekiamo oro masių. Jis priklauso nuo šilumos mainų sąlygų – nuo oro judėjimo greičio, šildančio ir šildomojo oro srautų masių santykio, šilumos mainų paviršiaus konstrukcijos.

Reikia paminėti, kad analogiškai temperatūriniam efektyvumui yra skaičiuojamas ir drėgminis efektyvumas [6,7,8]:

$$\eta_d = \frac{d_2 - d_1}{d_3 - d_1} \times 100\% , \quad (1.7)$$

čia indeksai 1, 2, 3 reiškia tą patį, kaip ir skaičiuojant temperatūrinį efektyvumą.

Parametrai, kuriuos reikia nuskaityti ir registruoti norint įvertinti vėdinimo agregato su šilumos atgavimo funkcija temperatūrinį efektyvumą:

- tiekiamo į patalpą oro temperatūra;
- ištraukiamo oro temperatūra;
- šalinamo oro temperatūra;
- lauko (tiekiamo šviežio) oro temperatūra;
- temperatūra esanti vėdinimo agregato sekcijoje „už šilumokaičio“;
- kambario temperatūra (nustatyta kaip vėdinimo agregato valdymo signalas);

Kaip papildomi parametrai gali būti registruojami:

- tiekiamo oro slėgis (tyrimo proceso reguliavimui);
- ištraukiamo oro slėgis (tyrimo proceso reguliavimui);
- ventiliatorių greičiai (apsukos);
- CO_2 patalpoje, nuo šio parametro priklauso vėdinimo agregato darbo režimai (intensyvumas);
- gali būti fiksuojami įvairių elementų (pvz.: ventiliatorių, apėjimo sklendės, elektrinio pašildytuvo ir kt. valdymo signalai.

Papildomai reikia nuskaityti ir registruoti ir valdyti oro srautų debitus, drėgmės kiekius ore, oro srautų mases, valdymo signalus, ventiliatorių galias.

Šiame darbe yra pasirinktas temperatūrinio efektyvumo tyrimo metodas, nes jis yra išsamiausias. Taip pat tinkamiausias pagal turimus materialinius ir energetinius išteklius.

2. VĖDINIMO AGREGATO SU ŠILUMOS ATGAVIMO FUNKCIJA ŠILUMOGRAŽOS TYRIMAS

Daug fizikinių parametru reikia užfiksuoti norint nustatyti vėdinimo agregato šiluminį efektyvumą, bei rasti jo priklausomybes nuo kitų parametru ir taip didinti vėdinimo agregato šiluminį efektyvumą, įtakojant jo konstrukciją. Trumpai apžvelgsime šilumokaitos teoriją, kuria remiamasi nustatant vėdinimo agregato šiluminį efektyvumą. *Šiluminis vėdinimo agregato efektyvumas yra labai svarbus parametras siekiant taupyti šiluminę energiją pastatuose, kas yra labai aktualu šiuo metu, brangstant įvairioms energijos rūšims.*

2.1 Termodinaminiai pagrindai šiluminiam efektyvumui nustatyti

Šilumokaita arba šilumos perdavimas (dar vadinama šilumos mainai) – tai fizikinis procesas, kurio metu šiluminė vieno fizikinio kūno energija perduodama kitam fizikiniam kūnui. Pagal antrąjį termodinamikos dėsnį natūraliai šiluma yra perduodama visada viena kryptimi – iš šiltesnio fizikinio kūno į šaltesnį. Šilumokaita vyksta trimis būdais: šiluminiu laidumu (kondukcija), konvekcija ir šiluminiu spinduliavimu [6].

Kondukcija (šiluminis laidumas) – tai šiluminės energijos perdavimas iš vieno kūno į kitą arba iš vienos kūno dalies į kitą tiesiogiai jiems liečiantis, bet *nepernešant medžiagos*. Kristalų gardelėse atomai yra glaudžiai susieti tarpusavyje ir šiluma čia pasireiškia kaip gardelės mazgų virpėjimas apie pusiausvyros padėtį: kuo didesnė kristalo temperatūra, tuo didesnė gardelės mazgų virpesių amplitudė, t. y. jų kinetinė energija. Šiluminis laidumas yra pagrindinis šilumos perdavimo būdas kietuosiuose kūnuose, kol juose negalima konvekcija ar spinduliavimas. Kadangi yra temperatūros gradientas, molekulės perduoda kinetinę energiją. Matematiškai šį procesą aprašo **Furjė dėsnis**: *šilumos srauto tankis proporcingas temperatūros gradientui* [6]:

$$q = -\lambda \times \nabla T, \quad (2.1)$$

čia: q yra šilumos srauto tankis (šilumos kiekis perneštas per laiko vienetą vieno kvadratinio metro plotu), $(\frac{J}{m^2 \cdot s})$; λ – yra šiluminio laidumo koeficientas, ∇ – nabla arba Hamiltono operatorius (gradientas), $(\frac{W}{m \cdot K})$; T – absoliutinė temperatūra (K).

Konvekcija – šilumos perdavimas judančioms skysčio ar dujų (oro) srovėms. Šildant skysčius ar dujas, jų tankis kinta. Šiltesnis skystis (arba dujos) yra lengvesni (mažesnio tankio) ir kyla aukštyn, o šaltesnis, būdamas sunkesnis slenka žemyn. Skysčiuose ir dujose susidaro konvekcinių srovių, kurios, nešdamos šiltesnio (mažesnio tankio) skysčio ar dujų mases, perneša ir jų turimą šiluminę energiją [6]. Konvekcija yra laisvoji ir priverstinė. Laisvoji vyksta konvekcija skysčiuose arba dujose, kai jų dalelės juda dėl skirtingos vienos ar kitos medžiagos temperatūros ir tankio įvairiose vietose. Šiai konvekcijai labai svarbi gravitacija. Konvekcija yra priverstinė, kai medžiagos dalelės (atomai, molekulės) juda dėl kokio nors išorinio poveikio, pavyzdžiui, siurblio, maišytuvo. Kietuosiuose kūnuose, net ir šildomuose, konvekcija negali vykti – juose srovės nesusidaro [6].

Spinduliavimas – tai šilumos perdavimo būdas, kai vienas nuo kito nutolę kūnai šilumą perduoda vienas kitam spinduliuodami. Bet koks kūnas, kurio temperatūra aukštesnė negu 0 laipsnių pagal Kelviną, skleidžia spinduliuotę. Šie spinduliai yra tokios pačios prigimties kaip ir regimoji šviesa, tik didesnio bangos ilgio t. y. jų sritis yra už raudonųjų spindulių, todėl šie spinduliai ir vadinami infraraudonaisiais spinduliais (lot. infra – po). Atsižvelgiant į kūno temperatūrą, keičiasi spinduliavimo intensyvumas ir spektrinė sudėtis. Maksimalų šiluminės energijos kiekį, kurį gali išspinduliuoti kūnas nuo savo paviršiaus galima apskaičiuoti pagal Stefano-Bolcmano (Stefan-Boltzman) dėsnį [6]:

$$W_b = \sigma \times T^4, \quad (2.2)$$

čia: W_b – išspinduliuotoji energija, (W/m^2); σ – Stefano - Bolcmano konstanta $5,67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$; T – absoliutinė temperatūra (K).

2.2 Šalinamo oro šilumos utilizavimas

Dalį šalinamo vėdinimo oro šilumos galima atgauti tiek tobulinant oro mainus patalpoje, tiek naudojant šilumokaičius. Oro mainai optimizuojami [7]: 1) recirkuliuojant patalpos orą; 2) naudojant šiltesnį viršutinės zonos orą darbo zonai šildyti.

Šalinamo oro recirkuliacija leistina tik tada, kai oras pakankamai švarus. Šis pigus ir patogus šilumos taupymo būdas nuo seno naudojamas kondicionieriuose. Staklėms, tekėlams, kuriems

dirbant susidaro daug dulkių, sukonstruoti specialūs oro šalinimo agregatai. Išvalytas oras gražinamas į patalpą prie veikiančio įrenginio. Brangstant šilumai pradedama recirkuliuoti stambių aspiracijos sistemų 2-3 kartus valytą orą. Tai įmanoma metalo, medienos, statybinių medžiagų ir pan. pramonėje, kur mechaniškai apdorojama netoksiška žaliava [7].

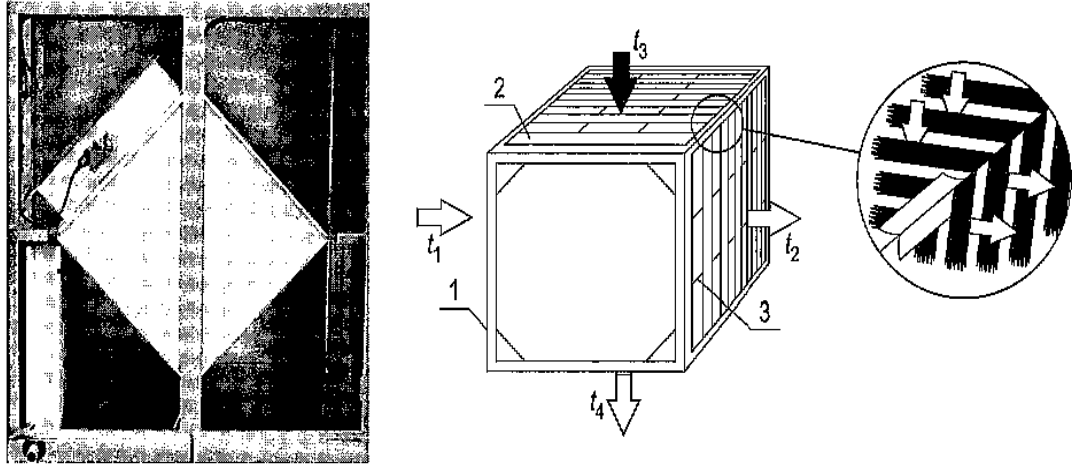
Taip pat šilumą galima utilizuoti naudojant šilumokaičius. Trumpa šilumos utilizavimo šilumokaičių charakteristika [7]:

1. *Sukamieji šilumokaičiai*. Naudojami tada, kai į tiekiamąjį orą gali patekti šiek tiek šalinamo oro. Nenaudojami, kai šalinamas oras pavojingai terštas ligų sukėlėjais, yra nemalonaus kvapo;
2. *Paviršiniai plokšteliniai šilumokaičiai*. Pakankamai efektyvūs kai yra didelis temperatūrų skirtumas, jų n. k. iki 60% . Kadangi šilumnešiai izoliuoti vienas nuo kito, gali būti panaudota ir agresyvių, labai užterštų oro srautų šiluma;
3. *Paviršiniai šilumokaičiai su tarpiniu šilumnešiu (antifrizu)*. Antifrizas cirkuliuoja abiejuose srautuose esančiais paviršiniais šilumokaičiais; efektyvūs tik esant dideliame temperatūrų skirtumui. Tačiau esminis jų pranašumas – šilumokaičiai gali būti toli vienas nuo kito, oro srautai nesusimaišo;
4. *Šilumos siurbliai*. Tai sudėtingi ir brangūs įrengimai. Tam, kad šilumos siurblių būtų verta įrengti, jis turi būti pakankamai galingas, jo metinė darbo trukmė ilga, tinkamas elektros energijos ir šilumos kainų santykis. Svarbus trūkumas – eksploatavimas sudėtingesnis už vėdinimo sistemos eksploatavimą.

2.3 Plokštelių šilumos utilizatorių konstrukcija

Tai plonų aliuminio plokščių paketas, tarp plokščių yra 2-4 mm tarpeliai (žr. 2.1 pav.). Korozijai atsparios plokštelės padengtos plonu plastiko sluoksniu. Šildantysis šalinamasis oras teka kas antru kanalu tarp plokštelių, o šildomasis lauko oras likusiais tarpais. Kad dėl oro srautų slėgių skirtumo plokštelės neišlinktų tarp jų dedami tarpikliai. Tarpikliai taip pat kuria oro srauto sūkurius (turbulenciją), taigi gerina šilumos mainų sąlygas.

Esant žemai lauko temperatūrai, šalinamo oro garai kondensuojasi ant plokštelių, tada šildomam orui perduodama ir garavimo šiluma. Tačiau kai plokštelių paviršiaus temperatūra nukrinta žemiau 0 °C, jos apšerkšnija, užsikemša kanalai. Šerkšnas turi būti šalinamas (plačiau žr. 2.6 skyrelį). Kondensatui ir ištirpusio šerkšno vandeniui nutekėti įrengiamas šilumokaičio drenažas [7].

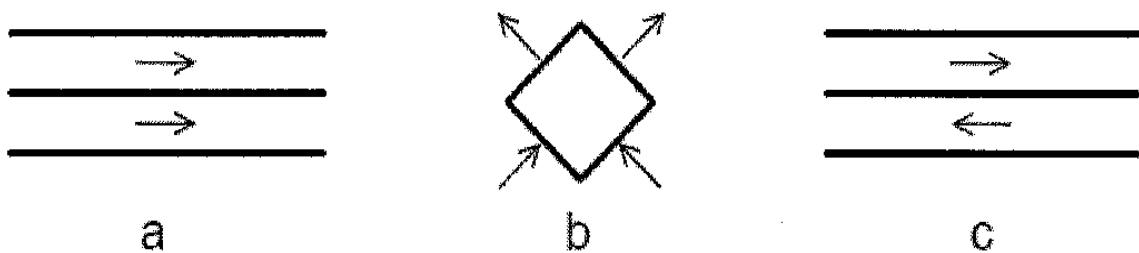


2.1 pav. Plokštelinio rekuperatoriaus bendrasis vaizdas ir plokštelinio šilumokaičio schema: 1 – rėmas; 2 – plokštelės; 3 – standinamieji intarpai

Galimos kelios šilumnešio judėjimo schemos (žr. 2.2 pav.): *passrovinė*, *kryžminė* ir *priešrovinė*. Dažniausiai naudojama kryžminė schema.

Optimalus oro judėjimo greitis 3-5 m/s. Toliau didinant greitį, pastebimai kyla aerodinaminis šilumokaičio pasipriešinimas, o šilumos mainų intensyvumas auga menkai. Plokštelinių šilumokaičių našumas 30-40 tūkst. m^3/h oro. Kai reikia didesnio našumo, įrengiami sukamieji regeneraciniai šilumokaičiai. **Plokštelinių utilizatorių temperatūrinis efektyvumas 55-75 %.**

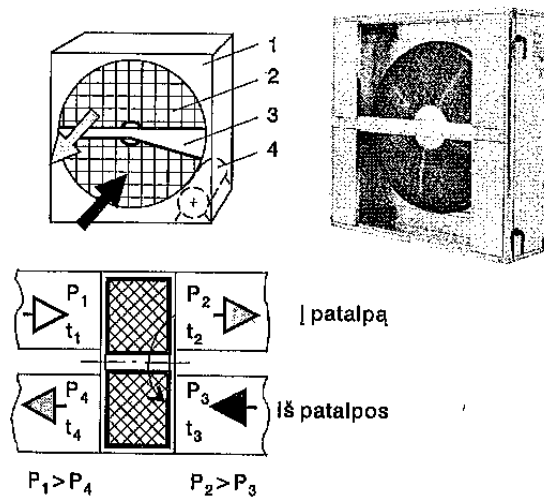
Tvarkinguose šilumokaičiuose šalinamas oras nepatenka į oro tiekimo kanalus [6,7].



2.2 pav. Šilumnešio judėjimo kryptys plokšteliniame šilumokaityje: a – pasrovinė (*parallel flow*); b – kryžminė (*cross flow*) ir c – priešrovinė (*counter flow*)

2.4 Sukamųjų regeneracinių utilizatorių konstrukcija

Besisukant utilizatoriaus (2.3 pav.) rotoriumi, šalinamame ore įšilusi įkrova patenka į vėsaus lauko oro srautą ir jam atiduoda sukauptą šilumą. Atvėsusi įkrova patenka į šilto oro srautą, išyla ir t.t. Tam, kad ši įkrovos šiluminė inercija būtų mažesnė, ji daroma iš 0,3-0,5 mm lygių arba lankstytų aliuminio lakštų. Sūkių dažnis iki $10-20 \text{ min}^{-1}$.



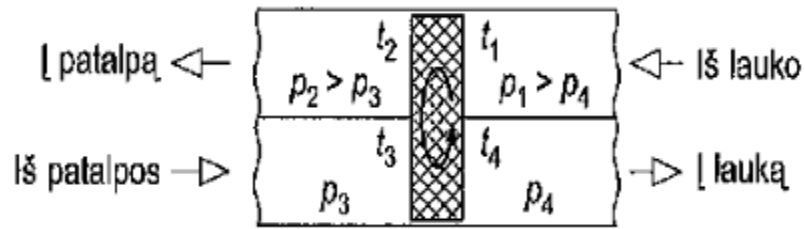
2.3 pav. Sukamasis regeneracinis šilumokaitis: 1 – korpusas; 2 – rotorius; 3 – prapūtimo segmentas (*purge sector*); 4 – elektros variklis

Vėdinimo tikslams skirtuose šilumokaičiuose leistinoji šalinamo oro temperatūra negali viršyti 50 °C .

Kai rotorius sausas, tarp šildomojo ir šildančiojo srauto vyksta tik šilumos mainai. Kritus lauko oro temperatūrai, pradeda kondensuotis šalinamojo oro garai. Pasisukus rotoriumi, drėgna įkrova patenka į kitą kanalą, ir drėgmė šildomajame sraute ima garuoti. Vyksta šilumos ir drėgmės mainai. Jei norima, kad drėgmės mainai vyktų ir sausame rotoriuje, įkrovos paviršius apdorojamas, kad ant jo esantis oksidų sluoksnis taptų korėtas ir higroskopiškas.

Rotoriai gaminami su nehigroskopiška arba higroskopiška įkrova. Higroskopiška įkrova pageidautina ten, kur patalpų orą reikia drėkinti ir šildyti, aušinti ir sausinti. Nauda abejotina, kai kondensuojasi žmonių išskirta drėgmė. Kondensate gali būti vandenyje tirpstančių nemalonaus kvapo medžiagų. Šios medžiagos garuoja į tiekiamąjį orą. Visos medžiagos, kurių buvo šaliname ore, daugiau ar mažiau prikimba prie įkrovos, pavyzdžiui, virtuvės kvapai, mikroorganizmai, todėl sukamieji šilumokaičiai draudžiami gyvenamiesiems namams, mokykloms, gydymo įstaigoms.

Pro plyšius tarp rotoriaus ir korpuso, taip pat ir su įkrova oras gali pertekėti iš vieno kanalo į kitą. Užteršto šalinamo oro pertekėjimas į švaraus tiekiamojo oro srautą nepageidautinas. Kad taip neatsitiktų, švariame sraute palaikomas didesnis slėgis (2.4 pav.), ir rotoriaus dalis uždengiama prapūtimo segmentu. Kol rotorius prasisuka pro šį segmentą, švarus oras išpučia iš įkrovos užterštą. Segmentas užima 1-6, todėl, kuo jis siauresnis, ir didesnis sūkių dažnis, tuo didesnis turi būti slėgių skirtumas švaraus ir užteršto oro kanaluose (apytiksliai apie 300 Pa). Slėgių skirtumas reguliuojamas balansiniu vožtuvu. Nuteka apie 3% švaraus oro [7].



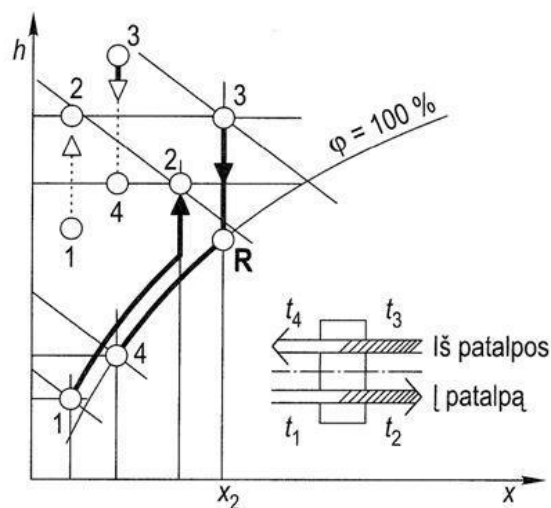
2.4 pav. Slėgis sukamajame šilumokaityje

Sukamieji regeneraciniai šilumokaičiai sudėtingesni, bet energetiškai efektyvesni už plokštelinius. Gaminama 100 tūkst. m³/h ir didesnio našumo šilumokaičiai. Vėdinimo sistemose naudojamų rotorių skersmuo – 0,2-5m. **Temperatūrinis efektyvumas didžiausias iš visų šilumos utilizatorių – 65-85% [7].**

2.5 Oro apdorojimo procesai sukamajame regeneraciniame šilumokaityje

Nehigroskopiška įkrova (2.5 pav.). Galimi du atvejai [7]:

1. šildomojo oro pradinė temperatūra pakankamai aukšta, šildantysis oras neatvėsta žemiau jo rasos taško;
2. pradinė šildomojo oro temperatūra žema, šildantysis oras atvėsta žemiau jo rasos taško, rotoriuje kondensuojasi drėgmė (tai šildymo sezono režimas).



2.5 pav. Oro apdorojimo procesai nehigroskopiškame rotoriuje

Kai drėgmė nesikondensuoja, tarp šildančiojo ir šildomojo oro vyksta tik šilumos mainai, drėgmė neperduodama. Šildančiojo ir šildomojo oro parametrų kitimo linijos eina lygiagrečiai (2.5 pav., kreivės). Šildantysis oras ataušta (linija $x=\text{const}$) nuo pradinių parametrų (3) iki 4 taško

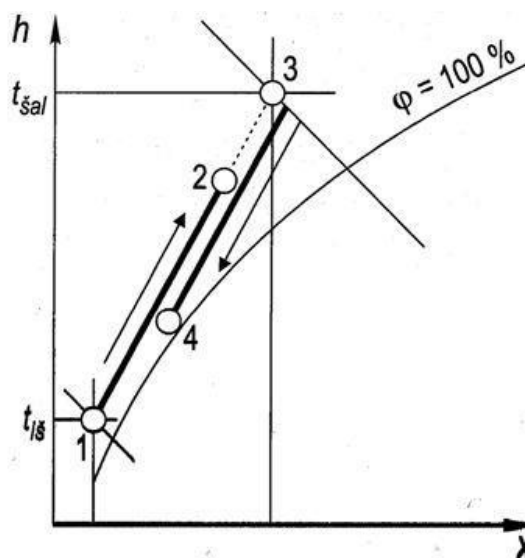
parametrų. Šildomasis pašyla (linija $x=\text{const}$) nuo taško 1 iki taško 2. Žinant temperatūrinio efektyvumo koeficientą, pašildyto oro temperatūra [7]:

$$t_2 = \eta_1(t_2 - t_3) + t_1. \quad (2.3)$$

Atvėsusio šalinamo oro temperatūra t_4 randama iš šalinamo ir tiekiamo oro šilumos balanso. Išraiška (2.3) leidžia apskaičiuoti, iki kokios temperatūros pašilo tiekiamas oras, tačiau nežinoma, iki kokios absoliučiojo drėgnumo jis sudrėks. Vandens garų kiekis ore $2x$ nustatomas pagal analogišką (2.3) formulę [2].

Kondensuojantis drėgmei, šildantysis oras vėsta (2.5 pav., ištisinė linija nuo taško 3 iki rasos taško R ir toliau), kondensuojantis jo drėgmei (linija $\varphi = 100\%$, iki taško 4). Susikondensavusi drėgmė, įkrovai įėjus į šildomojo oro kanalą, garuoja. Vyksta šilumos ir drėgmės mainai. Tiekiamas (šildomasis) oras šyla ir drėksta (linija 1-2). Laikoma, kad temperatūrinio ir drėgmės mainų efektyvumo koeficientai yra vienodi, $\eta_1 = \eta_2$. Radus d_2 ir t_2 , nustatomas pašildyto oro parametrų taškas (2) [7].

Higroskopiškoji įkrova (2.6 pav.). Įkrovos paviršius sugeria drėgmę, todėl šilumos ir drėgmės mainai vyksta esant bet kuriai oro temperatūrai. Šildomas oras šyla ir drėksta. Pašildytas oro parametrų taškas (2) ir atvėsusio šildančiojo oro parametrų taškas (4) yra pradinis parametras (1 ir 3) jungiančioje tiesėje.

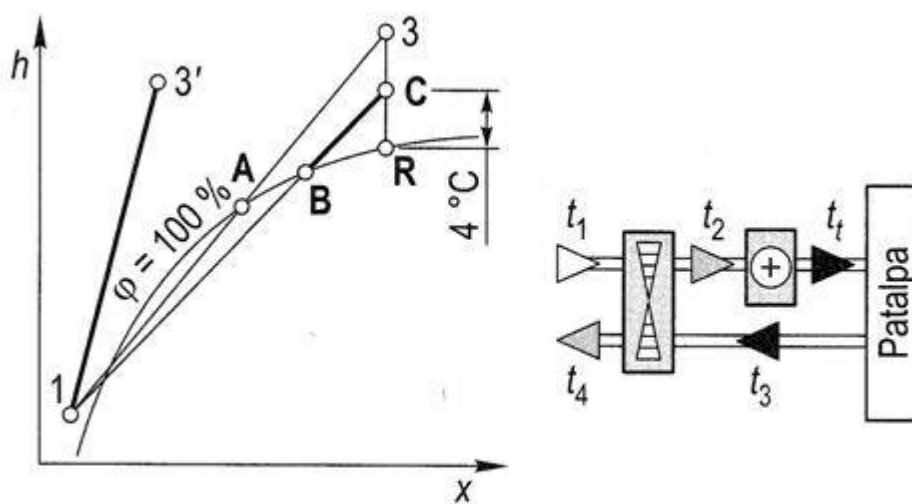


2.6 pav. Oro apdorojimo procesai higroskopiškame rotoriuje

Žinant temperatūrinio efektyvumo koeficientą, randami pašildyto oro parametrai (taške 2). Kritus šalinamojo oro temperatūrai žemiau rasos taško, procesai vyksta panašiai, kaip ir esant nehigroskopiškai įkrovai. Supaprastintoje schemoje galutiniai parametrai yra pradinis parametras (1 ir 3) jungiančioje tiesėje, taip pat kaip ir be drėgmės kondensacijos.

2.6 Priešužšaliminė sukamųjų regeneracinių šilumokaičių apsauga

Kai lauke temperatūra žemesnė nei $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, rotorius ne visada paledėja, nes šerkšnas gali išgaruoti tiekiamo oro pusėje, kol rotorius apsisuka. Tad, kad rotorius apledėtų, jame turi kondensuotis tiek drėgmės, kad ji nebespėtų išgaruoti. Apšala paprastai per kelias ar keliolika valandų, todėl apsaugą palengvina tai, kad šilumokaitis veikia ne ištisą parą. Normaliai veikiantį rotorių pradeda aptraukti ledas, kai lauko temperatūra tampa žemesnė nei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tiksliau nustatoma pagal h-x diagramą (2.7 pav.).



2.7 pav. Sukamojo utilizatoriaus apšalimo galimybės nustatymas

Pavojingai lauko temperatūrai nustatyti šalinamo oro parametrų taškas (3) sujungimas su pradinių lauko oro parametrų tašku (1). Atkarpa 1-3 nekerta soties kreives, vadinasi, rotorius neapledės. Tegu 3 yra pradinių šalinamo oro parametrų taškas. Atkarpa 1-3 kerta soties kreivę taške A. Jei rotorius higroskopiškas, kai temperatūra žemesnė nei šio taško, gali susidaryti šerkšnas. Kai rotoriaus įkrova nehigroskopiška, patariama jungti pradinių tiekiamo oro parametrų tašką ne su 3 tašku, o su C [7]. Šiame taške $x_c = x_3$, $t_c = t_r + 4^{\circ}\text{C}$.

Ištirpinama per 5 – 10 min. Tai daroma keliais būdais [7]:

1. rotoriaus sukimo dažnis lėtinamas iki $0,5\text{ min}^{-1}$;
2. lauko oras pašildomas bent iki $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$;
3. per rotorių tiekiamas oras recirkuliuojamas taip, kad šalinamo oro temperatūra būtų ne žemesnė kaip $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Atšildyti pradedama, kai tiekiamo oro kanale slėgio jutiklis signalizuoja apie padidėjusį aerodinaminį rotoriaus pasipriešinimą [7].

Apsauga nuo apšalimo. Visi toliau išvardinti veiksmai, leidžiantys išvengti apledėjimo

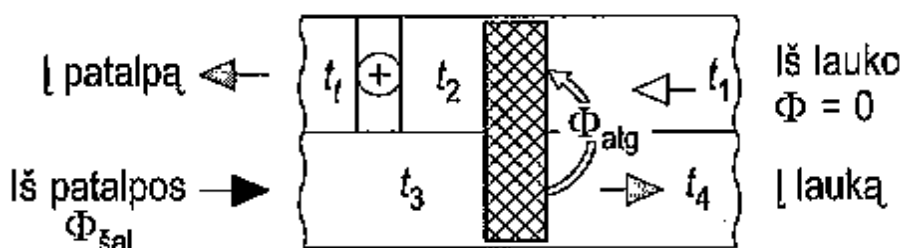
padarinių, atliekami [7]:

1. pagal pavienių jutiklių signalus, pavyzdžiui, atitirpinti pradeda, kai šilumokaičio aerodinaminis pasipriešinimas padidėja 50 %; pagal iš utilizatoriaus ištekancio šalinamo oro temperatūrą;
2. pagal laiko relės programą, pavyzdžiui, kai lauko temperatūra žemesnė nei 0°C, tirpdomas kas 4 valandas, netikrinant, ar yra šerkšno;
3. optimizuojant darbo režimą ir tirpinimo eigą mikroprocesoriumi, pvz., parenkant tokius šilumnešių greičius, tirpinimo būdą ir momentą, kad būtų sutaupoma daugiausiai lėšų.

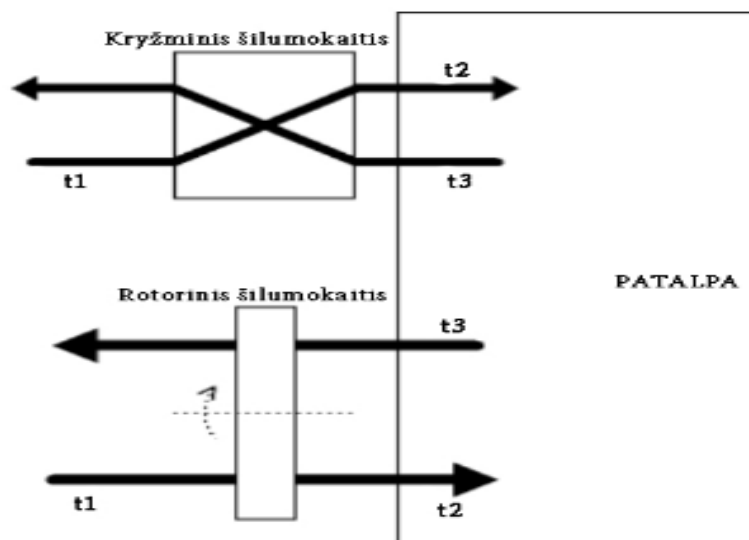
Apšalimo pavojus visiškai išvengiama, jei lauko oras pašildomas prieš jam patenkant į rotorių. Šis būdas netaikytinas, nes kelis kartus sumažėja atgaunamos šilumos kiekis [2].

2.7 Temperatūrinis šilumokaičių efektyvumas

Temperatūrinis efektyvumas nusakomas santykiu tarp to, kiek laipsnių tiekiamasis oras šilumokaityje pašilo, bei šalinamo oro ir lauko oro temperatūrų skirtumo t. y. kiek galėjo pašilti idealiu atveju.



2.8 pav. Šilumokaičio srautų schema temperatūriniam efektyvumui nustatyti: 1 - lauko oro; 2 - pašilusio šilumokaityje oro; 3 - patalpos oro; 4 - atvėsusio šalinamo oro temperatūros; t_t - tiekiamo į patalpą oro temperatūra



2.9 pav. Vėdinimo agregatų su plokšteline ir rotoriniu šilumokaičiu šilumos atgavimo principinė schema: t_1 – lauko oro temperatūra; t_2 – tiekiamo oro temperatūra į patalpą; t_3 – ištraukiamas oras iš patalpos

Šilumos atgavimo efektyvumas priklauso ne tik nuo lauko oro temperatūros, bet taip pat ir nuo vėdinimo agregato dydžio, konstrukcijos, taip pat nuo juo transportuojamo oro kiekio (debito) [7].

Šiluminis efektyvumas apskaičiuojamas pagal formulę [7]:

$$\eta_t = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} \times 100\% , \quad (2.4)$$

čia: t_1 – pradinė tiekiamo oro temperatūra (°C); t_2 – pašilusio tiekiamo oro temperatūra (°C); t_3 – pradinė šalinamo oro temperatūra (°C).

Temperatūrinis efektyvumas nėra lygus atgaunamos šilumos daliai, nes jo išraiškoje nėra šalinamo ir tiekiamo oro masių. *Jis priklauso nuo šilumos mainų sąlygų – nuo oro judėjimo greičio, šildančio ir šildomojo oro srautų masių santykio, šilumos mainų paviršiaus konstrukcijos.*

Reikia paminėti, kad analogiškai temperatūriniam efektyvumui yra skaičiuojamas ir drėgminis efektyvumas [7]:

$$\eta_d = \frac{d_2 - d_1}{d_3 - d_1} \times 100\% , \quad (2.5)$$

čia indeksai 1,2,3 reiškia tą patį, kaip ir skaičiuojant temperatūrinį efektyvumą. Kai klimatas žiemą yra labai sausas rekuperaciniai vėdinimo agregatai gali sugrąžinti dalį drėgmės iš išmetamo oro, kuri kitu atveju išmetama lauk su šalinamu oru. Rekuperatoriai su rotoriniais šilumokaičiais, kurie padengti higroskopine danga (buvo minėta), drėgmės iš ištraukiamo oro sugrąžina žymiai daugiau nei naudojant rotorinį šilumokaitį be dangos. Plokšteliniai šilumokaičiai drėgmės sugrąžina dar mažiau.

2.8 Trumpas eksperimentinės įrangos aprašymas

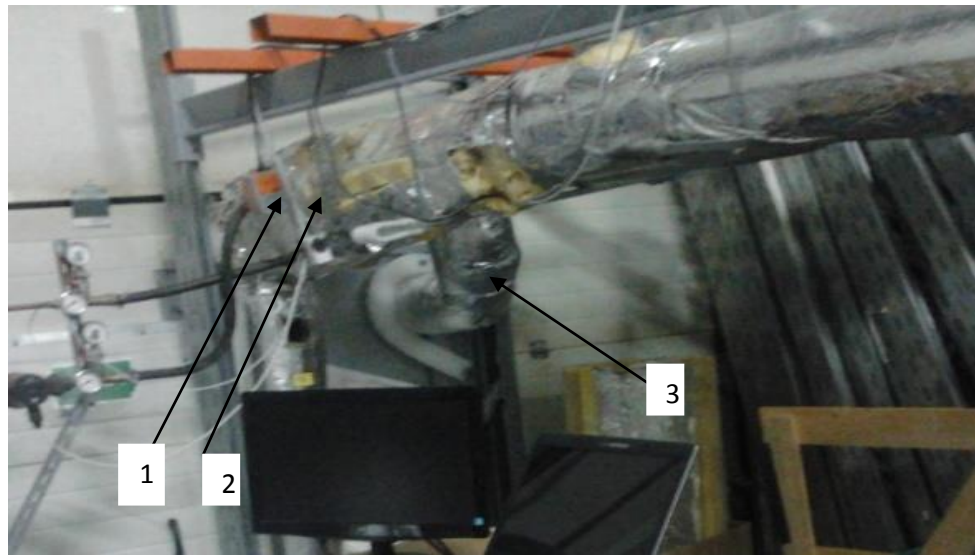
Vėdinimo agregato „*Rekuperatorius 400*“ temperatūriniam efektyvumui tirti (nustatyti) naudojamas specialus įmonėje „X“ sukonstruotas ir pagamintas „savadarbis“ bandymų stendas. *Bandymo stendo paskirtis (2.10 pav.) – imituoti realias vėdinimo agregato veikimo sąlygas (oro temperatūra, oro slėgis, srautai (debitai), oro drėgmė) ir nustatyti bandomojo vėdinimo agregato temperatūrinį efektyvumą.*



2.10 pav. Bandymo stendo bendrasis vaizdas

Bandymo stendo veikimo principas ir temperatūrinio efektyvumo nustatymo metodika. Paimamas iš lauko švarus oras esant poreikiui gali būti pašildomas iki norimos (tikslinės) temperatūros (2.11 pav.) ir patenka į vėdinimo agregatą, kuris yra sumontuotas pajungimo sektoriuje (2.12 pav.). Toliau už vėdinimo tiekiamo oro flanšo yra ortakiai, kuriuose yra atliekami pagrindiniai matavimai - oro slėgio, srautų, temperatūrų. Tai matavimo ortakių segmentas (2.13

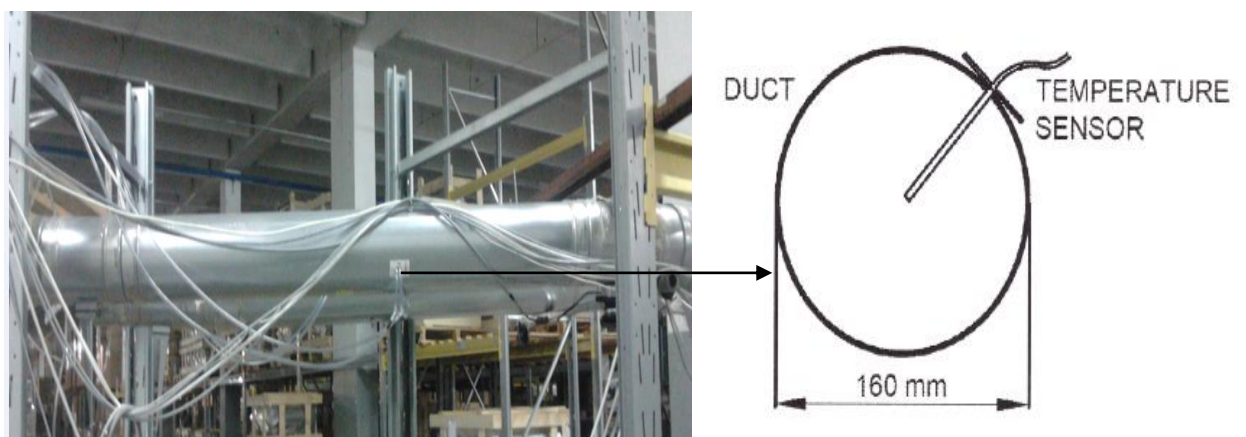
pav.) Matavimai yra stebimi, registruojami, apdorojami ir siunčiami į tarnybinę stotį iš valdymo pulto (2.14 pav.).



2.11 pav. 1 – šviežio oro paėmimo iš lauko ortakis; 2 – papildomas elektrinis pašildytuvas (*preheater*); 3 – išmetimo ortakis



2.12 pav. Vėdinimo agregato pajungimo sektorius (matomi izoliuoti pajungimo ortakiai)



2.13 pav. Matavimo ortakių segmentas: segmente įmontuoti temperatūros, drėgmės, slėgio davikliai



2.14 pav. Valdymo pultas

Realias patalpos sąlygas – drėgmę imituoja oro drėkintuvas ir garų (drėgmės) surinkimo kamera, kurie kartu veikdami leidžia didelį drėgmės kiekį paduoti į bandymų stendo sistemą, o temperatūra reguliuojama papildomais elektriniais pašildytuvais (2.15 pav.). Šie du moduliai imituoja patalpos temperatūros ir drėgmės modelį ir yra valdomi specialiu valdymo bloku, kurio momentinius parametrus galima stebėti prietaisų skydelyje (2.16 pav.).



2.15 pav. Patalpos drėgmės ir temperatūros imitavimo moduliai: 1 - oro drėkintuvas; 2 - garų surinkimo kamera

Veikimo principas: kintant (imituojant) realioms vėdinimo agregato darbo sąlygoms: kintant temperatūroms, drėgmei, ventiliatorių greičiams (oro srautams arba debitams) stende matuojami esminiai parametrai: t_1 – pradinė tiekiamo oro temperatūra ($^{\circ}\text{C}$), t_2 – pašilusio tiekiamo oro temperatūra ($^{\circ}\text{C}$), t_3 – pradinė šalinamo oro temperatūra ($^{\circ}\text{C}$), kuriuos turint programa automatiškai

apskaičiuoja pagal minėtą (1.5 formulę) vėdinimo agregato *temperatūrinį efektyvumą tam tikru laiko momentu.*



2.16 pav. Valdymo pultas ir prietaisų skydelis

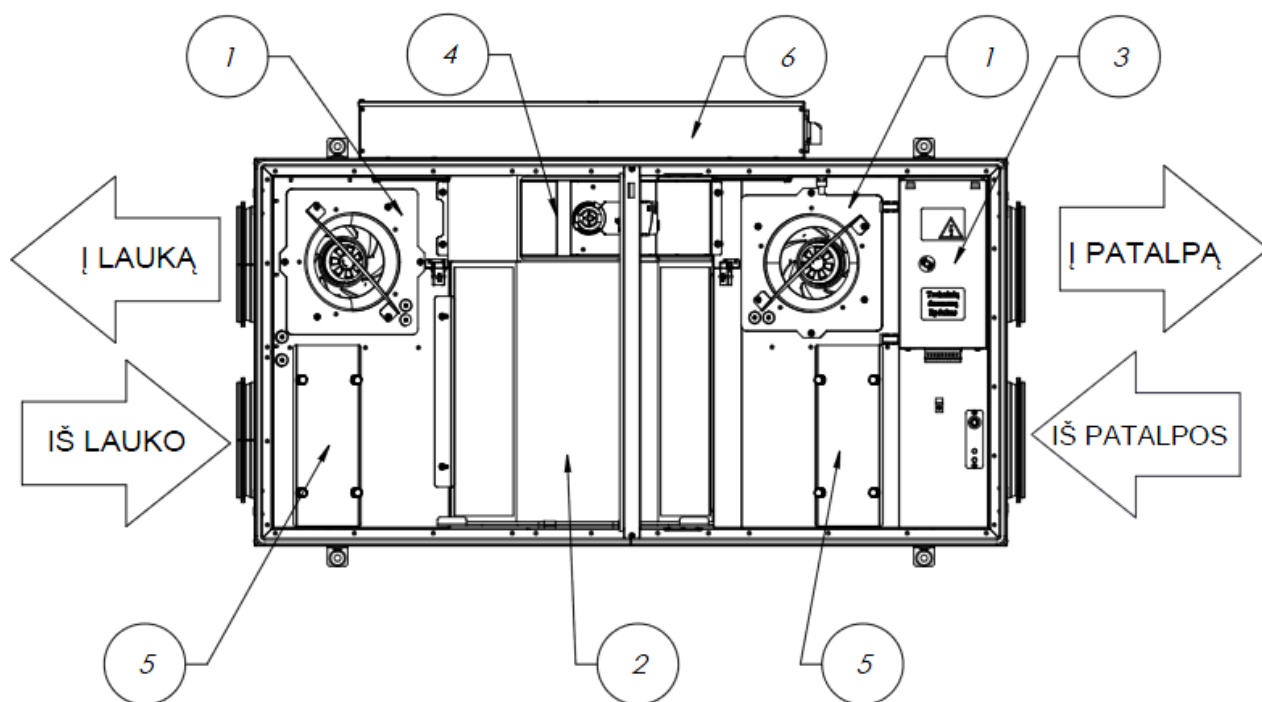
Temperatūrinis efektyvumas yra vėdinimo agregato energetinis parametras. Kuo šalinamo oro temperatūra yra žemesnė ir tiekiamo į patalpą oro, po rekuperacinio proceso vėdinimo agregate, temperatūra aukštesnė, tuo didesnis vėdinimo agregato temperatūrinis efektyvumas, vadinasi tuo vėdinimo agregatas yra energetiškai efektyvesnis.

2.9 Vėdinimo agregatas „Rekuperatorius 400“

Rekuperatorius – tai mechaninės ventilacijos įrenginys, taupantis šiluminę energiją ir patalpų vidaus orą keičiantis lauko oru. *Rekuperacija* – tai energijos taupymas, kai šilumokaičio pagalba grąžinama šiluma iš šalinamo oro tiekiamam orui. Kaip jau buvo minėta šiluminės energijos rekuperacijai yra naudojami dviejų tipų šilumokaičiai – plokšteliniai ir rotoriniai. „Rekuperatorius 400“ yra vadinamasis palubinis rekuperatorius – jis tvirtinamas prie lubų ar sijų specialias tvirtikliais ar lynais ir jungiamas prie ortakių per lanksčias jungtis, apkabas ar perėjimus.

„Rekuperatoriaus 400“ konstrukcija (žr I priedą):

- Korpusas izoliuotas 30 mm storio izoliacine medžiaga. Izoliavimo paskirtis slopinti įrenginio veikimo triukšmą, vibracijas, šiluminius nuostolius;
- Ventiliatoriai (2.17 pav. 1 poz., žr. IV priedą) EC tyliai veikiantys ir energiją taupantys bei atitinkantys ERP direktyvą 2009/125/EB. Ventiliatoriai skirti oro judėjimui agregate ir vėdinimo sistemoje sukelti. Jiems sukti sunaudojama beveik visa agregato sunaudojama el. energija. Jie yra pagrindinis vėdinimo agregato keliamo triukšmo ir vibracijų šaltinis.



2.17 pav. „Rekuperatorius 400“: 1 – ventiliatoriai; 2 – plokštelinis kryžminių srautų šilumokaitis; 3 – elektrinis kaloriferis; 4 – apėjimo sklendė; 5 – paneliniai filtrai; 6 – automatikos skyrius

- Principinis „Rekuperatoriaus 400“ komponentas plokštelinis priešpriešinių srautų šilumokaitis su ypač aukštu šiluminiu efektyvumu – iki 94 % (2.17 pav. 1 poz.). Šilumokaičio techninės charakteristikos pateiktos III priede.
- Elektrinio kaloriferio (2.17 pav. 3 poz.) paskirtis pašildyti papildomai iki norimos (tikslinės) temperatūros į patalpą paduodamą orą, kadangi šilumokaitis perduoda iš šildančio (išmetamo lauko) oro šildomam (tiekiamam į patalpą) orui ne visą, o tik tam tikrą dalį šiluminės energijos, tai tiekiamo oro temperatūra yra žemesnė nei patalpos temperatūra.

- Motorizuota oro apėjimo sklendė (angl. *bypass technology*) (2.17 pav. 4 poz.), gavusi valdymo signalą „atsidaryti“ iš valdymo sistemos, kurios temperatūros davikliai matuoja patalpos ir lauko temperatūrą, ir vakare, kai oras atvėsta, atsidaro ir leidžia gaiviam orui vėsinti patalpas, kad viduje esantis oras kuo greičiau atvėstų (tai ypač aktualu šiltuoju metu laikotarpiu). Tuomet rekuperatorius veikia kaip oro tiekimo agregatas – „kondicionierius“.
- Narveliniai filtrai (2.17 pav. 5 poz. žr. VI priedą) yra efektyvūs ir mažų slėgio nuostolių. Filtrinė medžiaga F7/M5. Oras prieš patekdamas į patalpas yra išvalomas nuo žiedadulkių ir vabzdžių. Taip pat yra valomas ir išmetamas oras.
- Automatikos sekcija (2.17 pav. 6 poz.) – tai skyrius, kuriame yra patalpinta įrenginio valdymo automatikos plokštė ir kiti elektros komponentai.

3. „REKUPERATORIAUS 400“ TEMPERATŪRINIO EFEKTYVUMO IR JO GALIMŲ PRIKLAUSOMYBIŲ NUO ĮVAIRIŲ VEIKSNIŲ TYRIMAS

Norėdamas nustatyti vėdinimo agregato temperatūrinį efektyvumą ir jo priklausomybę nuo tam tikrų veiksnių, pritaikiau temperatūrinio efektyvumo nustatymo metodą įmonėje „X“, naudodamasis jos technologiniais ir energetiniais ištekliais.

Rekuperatorius – tai bazinė energetiškai ir funkciškai efektyvios vėdinimo sistemos dalis, kurios svarbiausios funkcijos - užtikrinti reikiamą oro apykaitą, valyti tiekiamą ir šalinamą orą, bei vykdyti šiluminės energijos atgavimą (rekuperaciją arba šilumos utilizavimą). Projektuojant rekuperatorių pagrindiniai elementai, lemiantys įrenginio energetinį ir funkcinį efektyvumą yra šie:

- ventiliatoriai (rekuperatoriaus našumas ir galingumas);
- šilumokaitis;
- rekuperatoriaus triukšmo izoliacija;
- rekuperatoriaus antivibracinė (virpesių gesinimo) įranga;
- filtrai;
- rekuperatoriaus valdymo modulis (valdiklis ar automatika);
- vidinė ir išorinė konstrukcija.

Visi šie faktoriai turi būti įvertinti prieš pradėdant projektuoti energetiškai efektyvą, konstrukciškai racionalų bei technologišką vėdinimo agregatą. Šiuo atveju tiriamas „Rekuperatorius 400“, kuris detalčiau aprašytas 2.9 skyrelyje. Pritaikant temperatūrinio efektyvumo metodą (plačiau 1.6 ir 2.9 skyreliuose) tiriamas rekuperatoriaus temperatūrinis efektyvumas, jo priklausomybė nuo realių sąlygų – pvz. lauko oro temperatūros, ventiliatorių greičio ir kt.

Tyrimo tikslai:

- Atlikti realų temperatūrinio efektyvumo bandymą su realiu tyrimo objektu;
- Nustatyti faktinį „Rekuperatoriaus 400“ temperatūrinį efektyvumą prie realių darbo sąlygų;
- Nustatyti temperatūrinį efektyvumą įtakančius veiksnius;
- Nustatyti temperatūrinį efektyvumą įtakančių veiksnių priklausomybes.

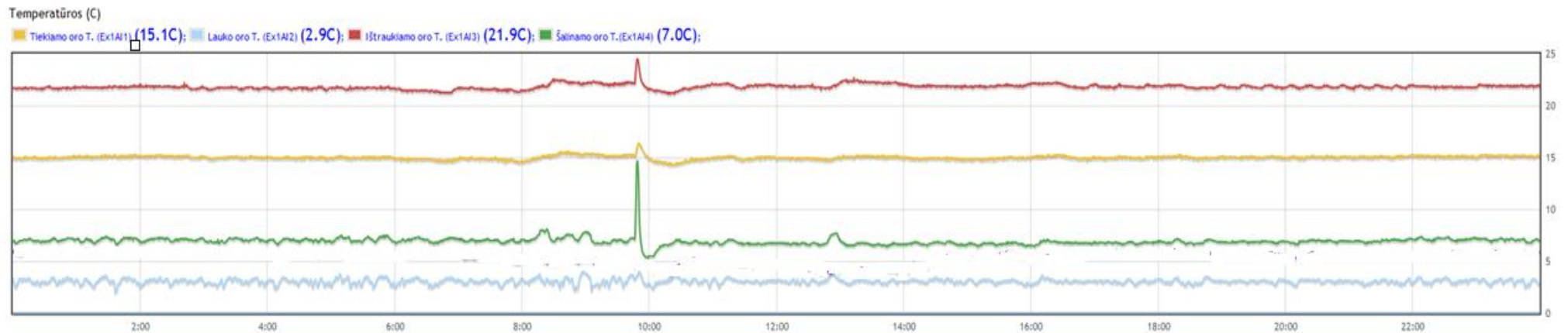
Tyrimas buvo atliekamas nuo 2014 m. gruodžio 3 iki 2014 m. gruodžio 6 d.

3.1 Tyrimo parametrų monitoringas ir apdorojimas

3.1.1 2014 m. Gruodžio 3 d. duomenų monitoringas ir analizė

- Tiekiamo į patalpą oro temperatūra, T_2 (°C)
- Lauko oro temperatūra, T_1 (°C)
- Ištraukiamo oro temperatūra, T_3 (°C)
- Šalinamo oro temperatūra, $T_{\text{šal}}$ (°C)

Grafiko X ašyje paros laikas, o Y ašyje temperatūrų reikšmės (analogiškai ir kituose temperatūrų grafikuose).

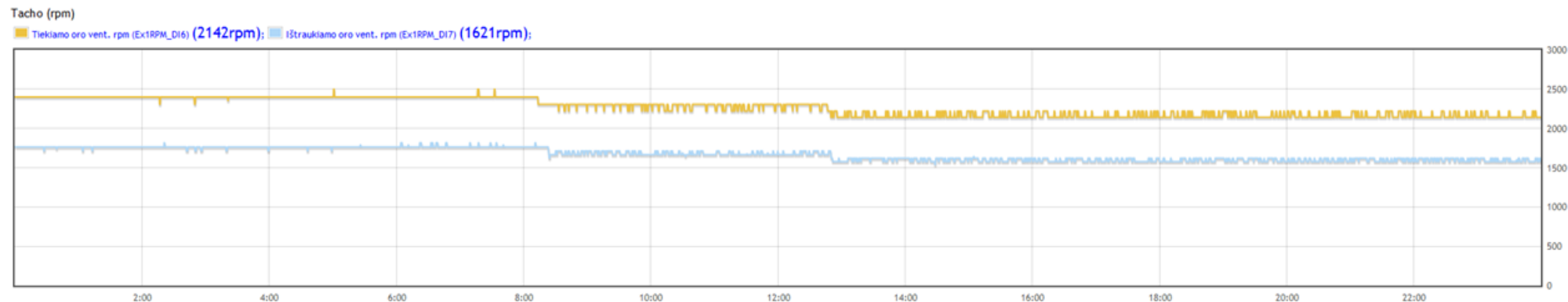


3.1 pav. Temperatūros

— Tiekiamo oro ventiliatoriaus greitis, (rpm)

— Ištraukiamo oro ventiliatoriaus greitis, (rpm)

Grafiko X ašyje paros laikas, o Y ašyje ventiliatorių sukimosi greičiai (analogiškai ir kituose tachometrijos grafikuose).



3.2 pav. Ventiliatorių tachometrija (greičių matavimas)

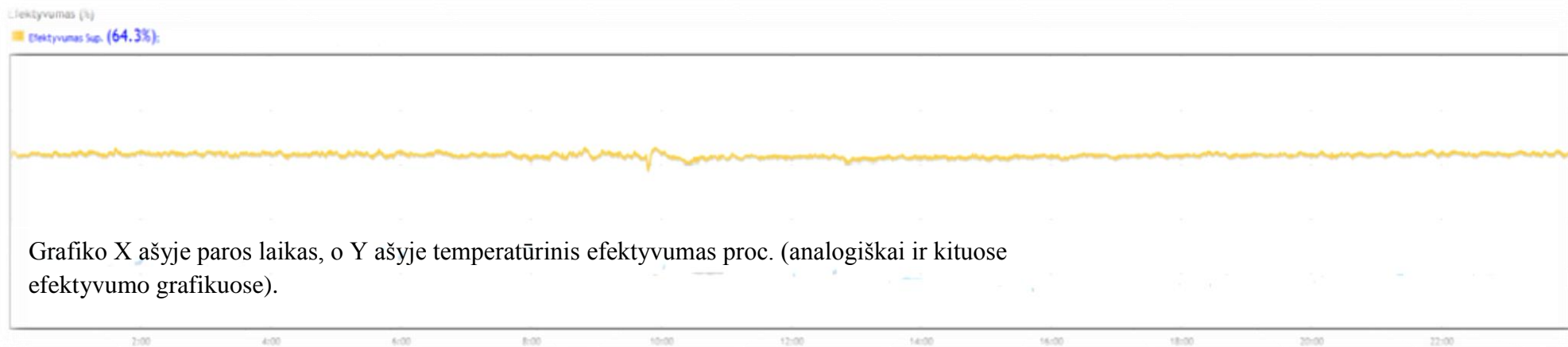
— Tiekiamo oro slėgis, (Pa)

— Ištraukiamo oro slėgis, (Pa)

Grafiko X ašyje paros laikas, o Y ašyje Tiekiamo ir Ištraukiamo oro slėgiai (analogiškai ir kituose slėgių grafikuose).



3.3 pav. Slėgių parametrai



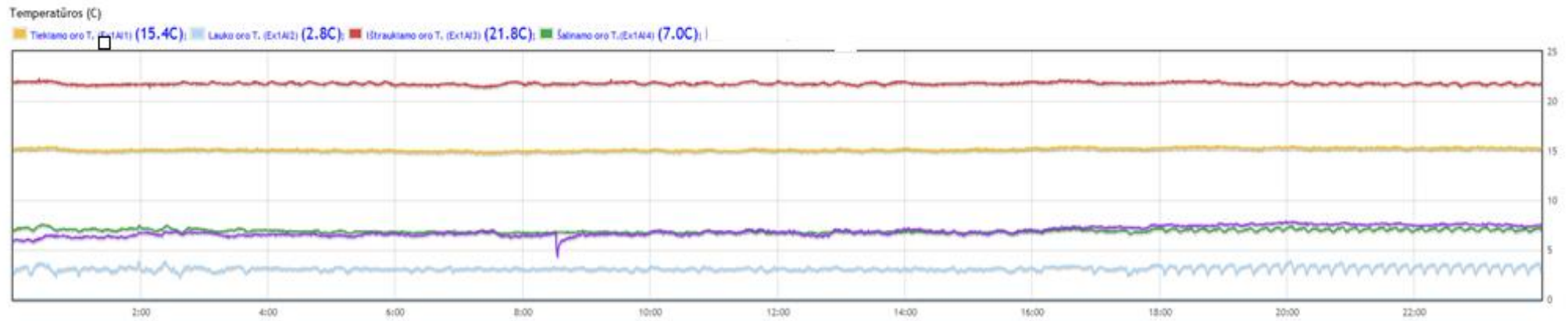
3.4 pav. Temperatūrinis efektyvumas

Pastebėta, kad prieš 10:00 val. padidėjo patalpos temperatūra, taip pat padidėjo išmetamo lauk oro temperatūra ir mažėja temperatūrinis efektyvumas. Tai trumpalaikis proceso pokytis. Valdymo automatika reguliuoja procesą (per ventiliatorių našumą – greičius) taip, kad agregato temperatūrinis efektyvumas būtų kuo didesnis. Vidutinis agregato paros efektyvumas – 64,3 %. Šilumokaitis neužšalė.

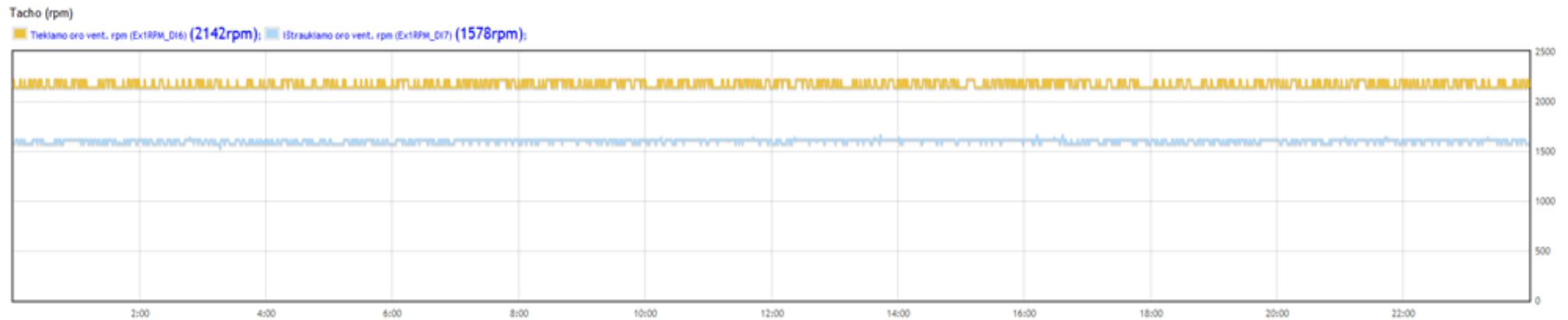
Prielaida: temperatūrinis efektyvumas blogėja kylant patalpos temperatūrai, kai lauko temperatūra yra pastovi, ventiliatorių greitis pastovus, nenaudojama apėjimo sklendė (by pass), šviežias oras nėra pašildomas elektriniu kaloriferiu.

3.1.2 2014 m. Gruodžio 4 d. duomenų monitoringas ir analizė

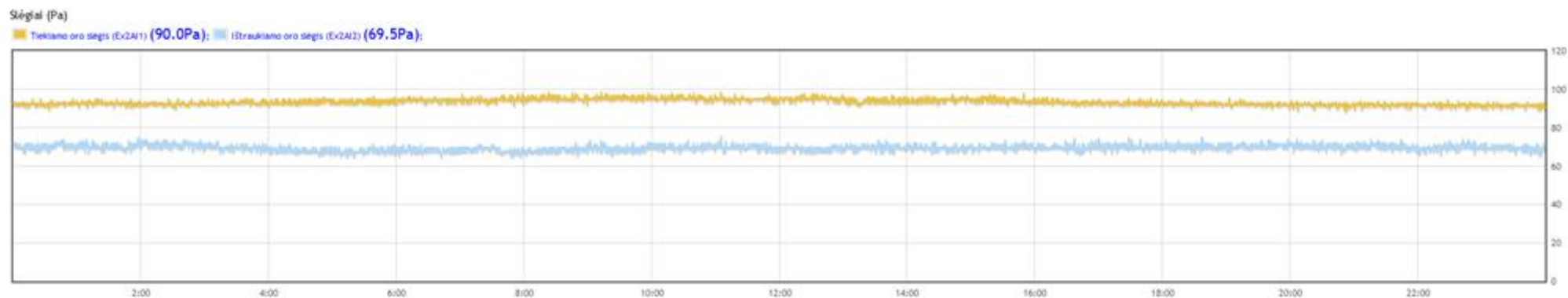
Pastaba: garfikų legendos yra analogiškos kaip ir 3.1.1 skyrelyje, todėl toliau nebebus kartojamos.



3.5 pav. Temperatūros (violetinės kreivės nepaisyti)



3.6 pav. Ventilatorių tachometrija



3.7 pav. Slėgio parametrai

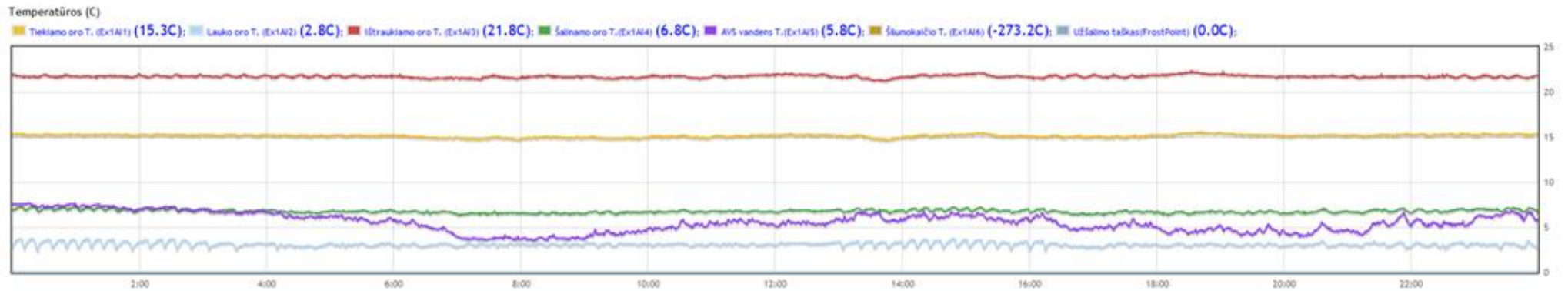


3.8 pav. Temperatūrinis efektyvumas

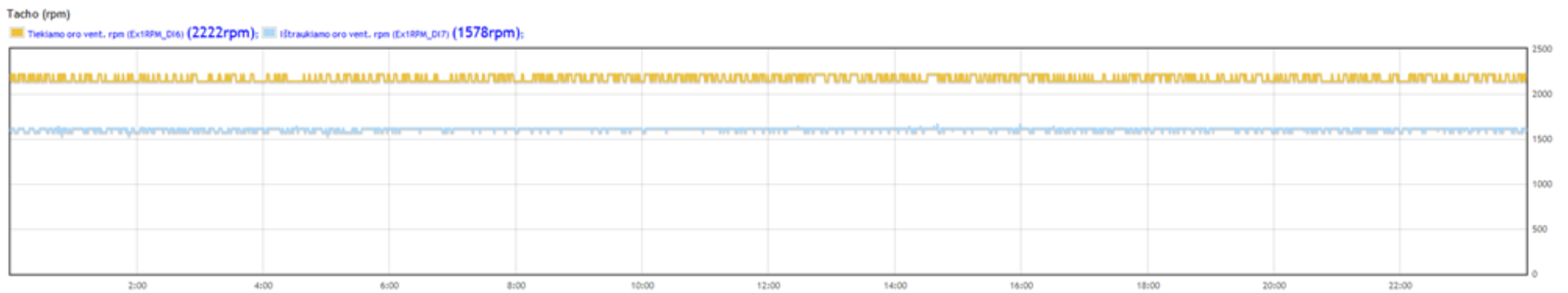
Stebimas nusistovėjęs procesas. Pastebima, kad svyruojant lauko temperatūrai 22:00 - 24:00 laiko intervale, keičiasi ir ištraukiamo bei šalinamo oro temperatūros, bei efektyvumas. Vidutinis agregato paros efektyvumas – 65,7 %. Šilumokaitis neužšalė.

Prielaida: lauko temperatūra įtakoje agregato temperatūrinį efektyvumą (šilumokaitos procesą ir jo valdymą).

3.1.3 2014 m. Gruodžio 5 d. duomenų monitoringas ir analizė



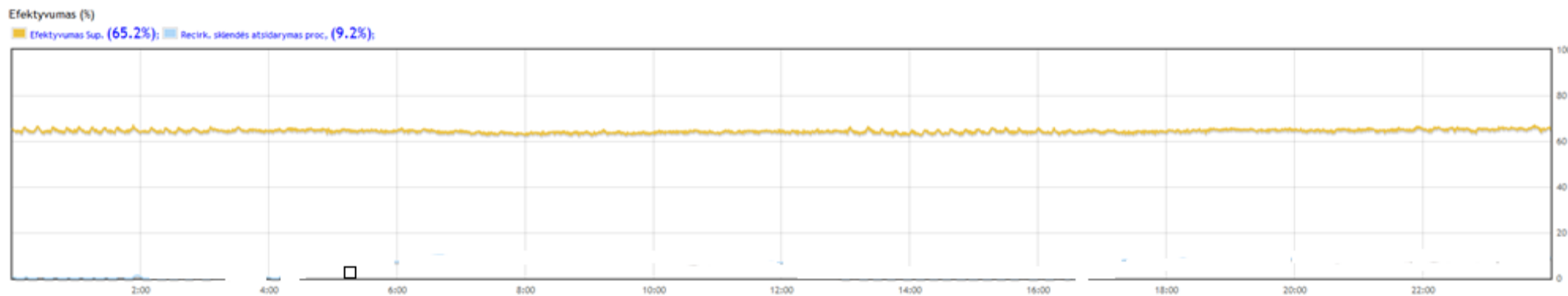
3.9 pav. Temperatūros (violetinės kreivės nepaisyti)



3.10 pav. Ventiliatorių tachometrija



3.11 pav. Slėgio parametrai

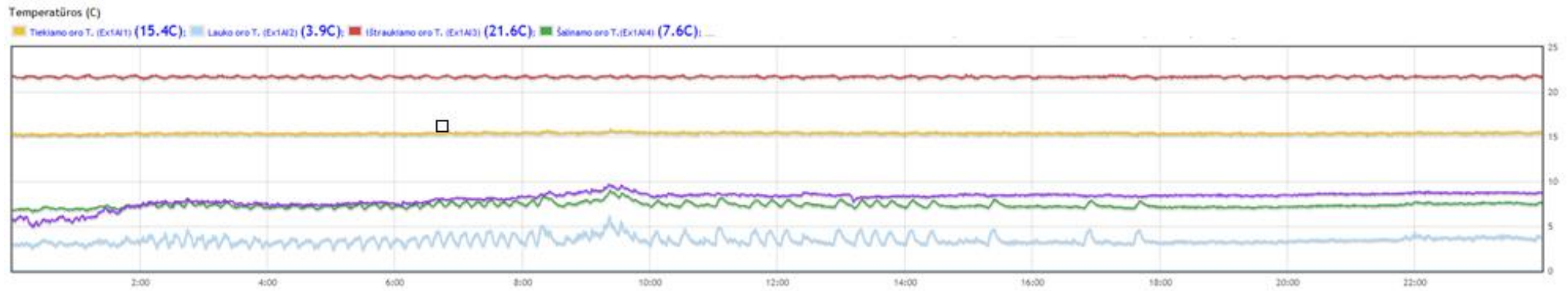


3.12 pav. Temperatūrinis efektyvumas

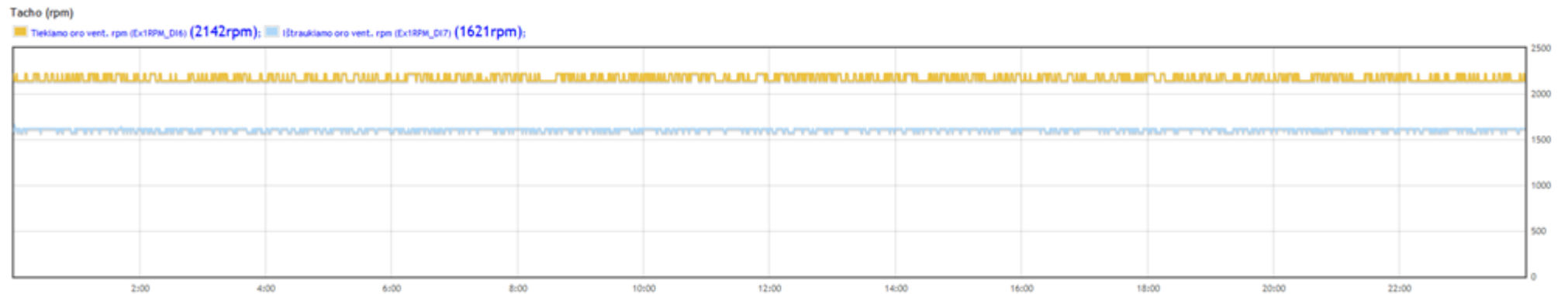
Stebimas nusistovėjęs procesas. Pastebima, kad svyruojant lauko temperatūrai 13:00 - 17:00 ir 22:00 - 04:00 laiko intervaluose, keičiasi ir ištraukiamo bei šalinamo oro temperatūros, bei efektyvumas. Vidutinis agregato paros efektyvumas – 65,2 %. Šilumokaitis neužšalė.

Prielaida didėjant lauko temperatūrai ir nekintant valdymui, agregato temperatūrinis efektyvumas didėja.

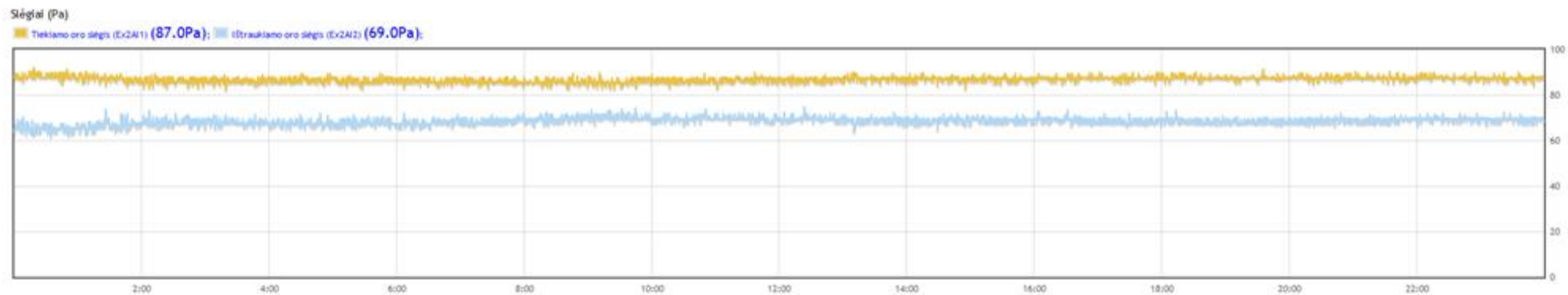
3.1.4 2014 m. Gruodžio 6 d. duomenų monitoringas ir analizė



3.13 pav. Temperatūros (violetinės kreivės nepaisyti)



3.14 pav. Ventilatorių tachometrija



3.15 pav. Slēgio parametri



3.16 pav. Temperatūrinis efektyvums

Stebimas nusistovējēš procesas. Vidutinis agregato paros efektyvumas – 65,3 %. Šilumokaitis neuzšalē.

3.2 Tyrimo duomenų apibendrinimas

Vidutinis keturių dienų „Rekuperatoriaus 400“ temperatūrinis efektyvumas:

$$\eta_{tvid} = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_t}{n} = \frac{64,3+65,7+65,2+65,3}{4} = 65,125\%.$$

- Viso tyrimo metu lauke nebuvo neigiamos temperatūros, todėl nebuvo galimybės stebėti ir tirti agregato darbo „sunkiais režimais“. Todėl nebuvo stebimi šilumokaičio užšalimo reiškiniai. Juos indikuotų slėgių kritimas, kadangi užšalus šilumokaičiui didėja jo aerodinaminė varža. Todėl agregato temperatūrinis efektyvumas mažėtų. Tačiau prieš šiuos negatyvius reiškinius valdant agregatą taikomos priemonės aptartos 2.6 skyrelyje.
- Pastebėta, kad kintant patalpos (išmetamo oro) ir lauko (šviežio) oro temperatūros kinta ir vėdinimo agregato temperatūrinis efektyvumas.
- Padidėjus patalpos oro temperatūrai padidėjo ir išmetamo lauk oro temperatūra, todėl sumažėjo vėdinimo agregato temperatūrinis efektyvumas. Tačiau tai trumpalaikis pokytis, agregato valdymo sistema sureguliuavo procesą taip, kad temperatūrinis efektyvumas būtų pastovus ir didžiausias galimas prie tuo metu sąlygų.
- Krintant lauko temperatūrai stebimas trumpalaikis temperatūrinio efektyvumo sumažėjimas.

4. DALYVAVIMAS KONFERENCIJOJE

2015 m. gegužės 21 d. vyko Šiaulių universiteto Technologijos ir gamtos mokslų fakulteto organizuota 10-oji konferencija „*Studentų moksliniai darbai*“.

Dviejose sekcijose (1 – oji sekcija: Elektronikos inžinerija, Elektros inžinerija ir Informacinės technologijos; 2 – oji sekcija: Mechanikos inžinerija, Statybos inžinerija ir Aplinkotyra) buvo perskaityta 18 pranešimų. Savo tyrimus pristatė daugiausia Šiaulių universiteto studentai, buvo skaitomas pranešimas Vilniaus Gedimino technikos universiteto studento ir Valstybinio mokslinių tyrimų instituto Fizinių ir technologijos mokslų centro darbuotojo pranešimas.

Konferencijoje taip pat pristačiau savo tyrimus ir aš tema: „*Vėdinimo agregato su šilumos utilizavimo funkcija energetinio efektyvumo tyrimas*“ (žr. VI priedą).

Konferencijos Mokslo komiteto atrinkti darbai bus publikuojami recenzuojamame Šiaulių universiteto leidinyje „*Jaunųjų mokslininkų darbai*“.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

Išvados:

1. Tiriama „Rekuperatorių 400“ temperatūrinio efektyvumo metodu, nustatytas jo vidutinis (buvo tiriama 4 - ias paras) *faktinis temperatūrinis efektyvumas – 65,125%. Tai aukštas vėdinimo agregato energetinis efektyvumas;*
2. Tyrimo metu pastebėta, kad keičiantis patalpos (išmetamo lauko oro) ir lauko (šviežio) oro temperatūroms kinta ir tiriamojo vėdinimo agregato temperatūrinis efektyvumas. Vyksta trumpalaikiai pereinamieji režimai, kol valdymo sistema „atstato“ vėdinimo agregato darbą į pusiausvyros padėtį. Agregato darbo metu valdymo sistema „siekia“, kad jo temperatūrinis efektyvumas būtų kuo didesnis;
3. Pastebėta, kad padidėjus patalpos oro temperatūrai padidėja ir išmetamo lauko oro temperatūra (esant pastoviams rekuperatoriaus darbo režimui), todėl sumažėja vėdinimo agregato temperatūrinis efektyvumas. Tai trumpalaikiai pereinamieji režimai;
4. Pastebėta, kad krintant lauko temperatūrai, stebimas trumpalaikis temperatūrinio efektyvumo mažėjimas;
5. Vėdinimo agregato valdymo sistema gali adaptyviai prisitaikyti prie kintančių realių darbo sąlygų, siekdama, kad vėdinimo agregatas dirbtų maksimaliai energetiškai efektyviai;
6. „Rekuperatorius 400“ remiantis tyrimo duomenimis **nėra tinkamas eksploatuoti pasyviame name, kaip vėdinimo sistemos kertinis elementas**, nes, pirmiausia, neatitinka pasyvaus namo energetinio efektyvumo kriterijaus ($65,125\% < 75\%$). Pateikiami pasiūlymai ir rekomendacijos įmonei „X“, siekiant didinti „Rekuperatoriaus 400“ energetinį efektyvumą.

Rekomendacijos:

1. Projektuoti rekuperatorių kuo kompaktiškesnį, kad jo vidinių konstrukcinių paviršiaus elementų plotas būtų kuo mažesnis (mažėja šilumos nuostoliai), ventiliatoriai turi būti kuo arčiau flanšų;
2. Izoliuoti aukštos kokybės termoizoliacine medžiaga vidinių sekcijų sienes, kad nesusidarūtų „šalčio tilteliai“, taip izoliuojami skirtingą šiluminę energiją turintys srautai;
3. Užtikrinti aukščiausią įmanomą agregato išorinį ir vidinį sandarumą, hermetizuoti sujungimo vietas;
4. Progresyviausia alternatyva konstruoti vidinę agregato struktūrą iš EPP (polipropileno putplastis). Išorinis korpusas gali būti iš lakštinio metalo. EPP vidines korpusas gali būti

liejamas ir frezuojamas (frezuojama tik eksperimentinėje stadijoje dėl finansinio aspekto, kuriant gaminį), todėl išgaunamos optimalios formos oro srautui judėti, labai aukštas vidinis ir išorinis sandarumas, labai gera šilumos garso ir vibracijų izoliacija. Medžiaga yra ekologiška. Tai įmonei „X“ leistų turėti labai konkurencingą gaminį šiuolaikinėje rinkoje.

LITERATŪRA

1. **GURSKIS, Vincas** et al. *Efektyvaus energijos vartojimo pastatuose vadovas* [interaktyvus]. Kaunas, Lietuvos Respublikos ūkio ministerija, 2008 m. 93 p. ISBN 978-9955-751-20-5. [Žiūrėta 2014 kovo 22 d.]. Prieiga per internetą: <www.ena.lt/doc_atsti/EE_vadovas.pdf>.
2. **NYMAN, M., SIMSON, C.J.** *Life cycle assesment of residential ventilation units in cold climate. Buildings and Enviroment.* [interaktyvus]. 2005 m., 40 p. [Žiūrėta 2014 kovo 27 d.]. Prieiga per internetą: <www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132304001532>.
3. STR 2.09.02:2005 *Šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas.* [interaktyvus]. Vilnius, 2005 m. 51 p. [Žiūrėta 2014 balandžio 3 d.]. Prieiga per internetą: <www3.lrs.lt/pls/inter3/oldsearch.preps2?Condition1=257930&Condition2=>>.
4. *Europos parlamento ir tarybos direktyva 2010/31/ES: dėl pastarų energinio naudingumo (nauja redakcija)* [interaktyvus]. 2010 m., 23 p. [Žiūrėta 2014 balandžio 3 d.]. Prieiga per internetą: <www.lsta.lt/files/2010_31_Pastat_energinio_naudingumo.pdf>.
5. **BAŽAN, P. I., KANCEV, G. E., SELVERSTOV, V., M.** *Šilumokaičių žinynas.* Maskva. 1989 m. Mašinų technika. 368 p.
6. **ABEL, E., ELMOTH, A.** *Buildings and energy - a systemic approach.* Forskningsrådet Formas, 2007, Sweden, Stockholm, 285 p. 978-91-540-5997-3.
7. **JUODIS, E.** *Vėdinimas: [vadovėlis aukštųjų mokyklų studentams].* Vilnius. Enciklopedija, 1998 m. 352 p. ISBN 9986-433-14-2.
8. **JUODIS, E.** *Extracted ventilation air heat recovery efficiency as afunction of a building's thermal properties.* Energy and buildings. 2006, Vol. 38, iss. 6, p. 568-573.
9. HN 69:2003. *Šiluminis komfortas ir pakankama šiluminė aplinka darbo patalpose. Parametų norminės vertės ir matavimo reikalavimai.* Vilnius, LR SAM, 2003.
10. **ASHRAE Handbook.** Fundamentals. ASHRAE Inc., N. E., Atlanta, 2001.
11. *Pasyvus namas. Nacionalinė pasyvaus namo asociacija* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2014 lapkričio 10 d.]. Prieiga per internetą:< <http://www.pasyvuspastatai.lt/pasyvus-namas>>.
12. *HEAT RECOVERY VENTILATION.* Wikipedia. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2014 birželio 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_recovery_ventilation>.

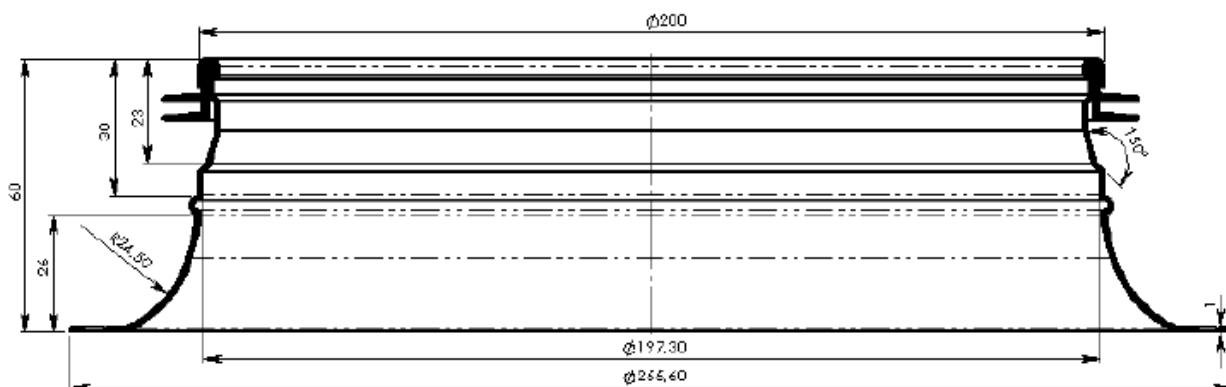
PRIEDAI

I PRIEDAS. Tiriamasis objektas – „Rekuperatorius 400“



II PRIEDAS. „Rekuperatoriuje 400“ naudojamasis flanšas FLAU-R Ø200

„Rekuperatoriuje 400“ naudojami 4 - eri FLAU-R tipo Ø200 mm diametro su užvalcuota gumine tarpine flanšai.



III PRIEDAS. Šilumokaitis *Klingenburg GS 25 / 450* ir jo techninė charakteristika

Klingenburg Counterflow Plate Heat Exchanger



Klingenburg GmbH
Boystrasse 115
D - 45968 Gladbeck
Germany

Tel.: +49 (0) 20 43/96 36-0
Fax: +49 (0) 20 43/7 23 62
E-Mail: klingenburg@klingenburg.de
Internet: www.klingenburg.de

Notes: Condensation! - Freezing limit not considered!



Type: GS 25 / 450

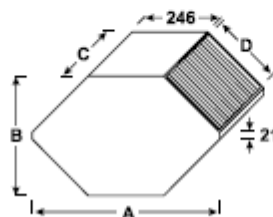
		Supply air	Exhaust air
Inlet condition	Standard air volume	400	400 m ³ /h
	Air volume	362	400 m ³ /h
	Temperature	-7,0	20,0 °C
	relative humidity	90,0	60,0 %
	absolute humidity	1,88	8,73 g/kg
	Enthalpy	-2,4	42,3 kJ/kg
Outlet condition	Air volume	395	377 m ³ /h
	Temperature	17,3	4,9 °C
	relative humidity	15,4	94,0 %
	absolute humidity	1,88	5,03 g/kg
	Enthalpy	22,2	17,5 kJ/kg
Face air velocity		1,67	1,84 m/s
Pressure drop		88	112 Pa
Pressure drop (Standard density)		101	101 Pa
Temperature efficiency dry		80,5	80,0 %
Temperature efficiency wet		90,1	56,0 %
Heat recovery dry		2,92	-2,92 kW
Heat recovery wet		3,27	-3,27 kW
Condensation			-3,70 g/kg -1,76 kg/h

Calculation based on

Air pressure 1013 mbar
Altitude 0 m

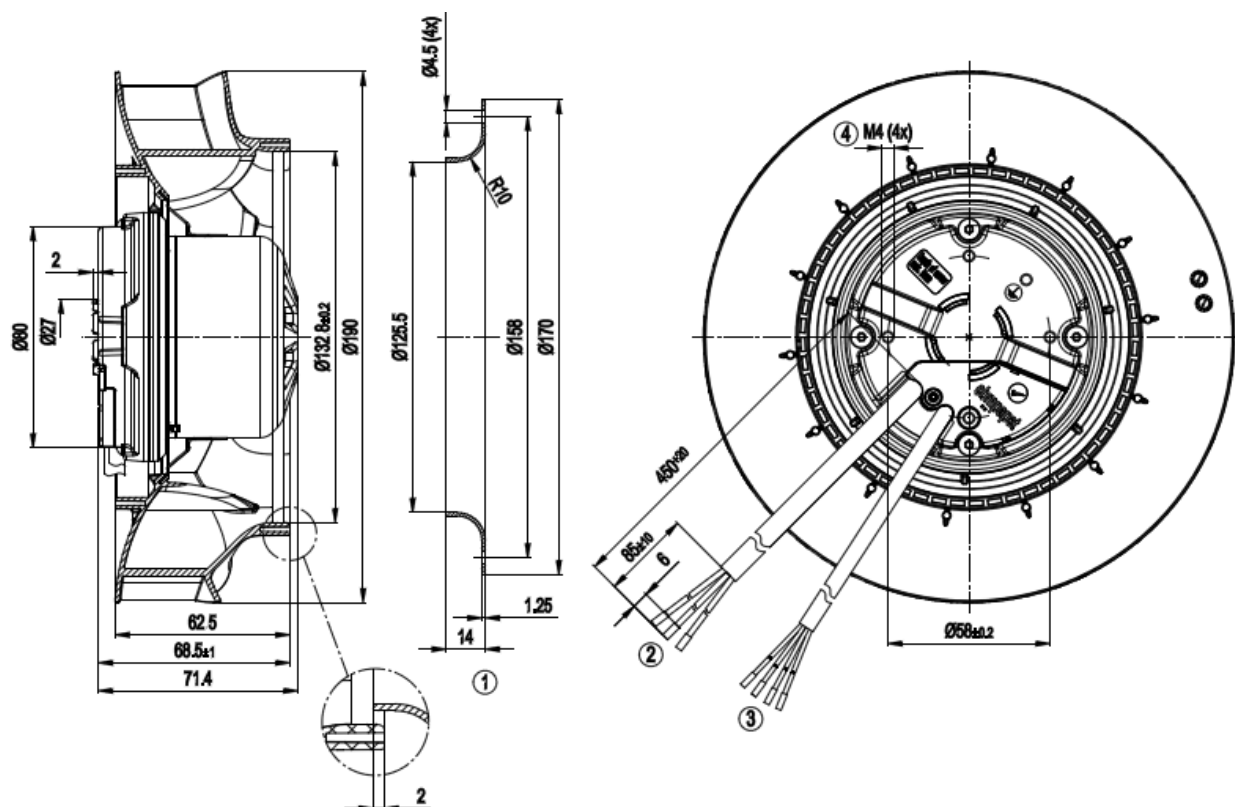
Dimensions

A = 454 mm
B = 230 mm
C = 450 mm
D = 134 mm



Weight 7,8 kg

IV PRIEDAS. „Rekuperatoriuje 400“ naudojamas ventiliatorius R3G 190 RC05 03



Techninė charakteristika

Type	R3G190-RC05-03	
Motor	M3G055-BI	
Phase		1~
Nominal voltage	VAC	230
Nominal voltage range	VAC	200 .. 240
Frequency	Hz	50/60
Type of data definition		ml
Speed	min ⁻¹	3200
Power input	W	83
Current draw	A	0.75
Min. ambient temperature	°C	-25
Max. ambient temperature	°C	60

V PRIEDAS. „Rekuperatoriuje 400“ naudojami filtrai F7/G5

Filtrų grupės	Klasė pagal	Sulaikymo	Naudingumo	Dalelių dydis μm				
	EN 779	Lygis %	Lygis %	< 0,3	0,3 – 0,5	0,5 – 1	1 – 5	> 5
G	G1	60	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0	70
	G2	70	~ 10	~ 0	~ 0	~ 0	~ 10	80
	G3	85	~ 25	~ 0	~ 0	~ 0	~ 20	90
	G4	95	~ 35	~ 0	~ 5	~ 10	~ 35	95
F	F5	~ 97	50	~ 10	20	30	65	98
	F6	~ 98	70	~ 15	30	50	80	99
	F7	~ 98	83	~ 25	50	70	90	~ 100
	F8	~ 99	92	~ 35	70	90	95	~ 100
	F9	~ 100	96	~ 50	80	95	98	~ 100

Filtruojamų medžiagų pavyzdžiai:

G1, G2 – lapai, vabzdžiai, tekstilės pluoštai, smėlis, vandens lašai, plaukai;

G3, G4 – gėlių ir kitos žiedadulkės, migla;

F5 – sporos, cemento dulkės (grubioji frakcija), dulkių sluoksnį sukurančios dalelės;

F6 – didelės bakterijos, mikrobai ar jų nešiotųjų dalelės, PM 10 dulkės;

F7, F8 – suodžiai, „į plaučius papuolančios dulkės“, PM 2,5 dulkės, cemento dulkės (smulkioji frakcija);

F8, F9 – tabako dūmai (grubioji frakcija), metalo oksido dūmai (grubioji frakcija), tepalų dūmai, bakterijos.

VI PRIEDAS. Dalyvavimas konferencijoje



ŠIAULIŲ
UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS IR
GAMTOS MOKSLŲ
FAKULTETAS

PAŽYMĖJIMAS

Reg. Nr. TGMP-15

2015 gegužės 21 d.
Šiauliai

Paulius Gedžius

dalyvavo

Šiaulių universiteto Technologijos ir gamtos mokslų fakulteto
10-oje mokslinėje konferencijoje „Studentų moksliniai darbai“
ir skaitė pranešimą tema

*Vėdinimo agregato su šilumos utilizavimo funkcija energetinio
efektyvumo tyrimas*

Organizacinio komiteto pirmininkas



dr. Nerijus Ramanauskas