VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Dovydas RIMDŽIUS

VĖJO ENERGIJĄ NAUDOJANČIO TURBININIO VENTILIATORIAUS TERMODINAMINIS MODELIS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MECHANIKOS INŽINERIJA (T 009)

Vilnius, 2021

Disertacija rengta 2016–2021 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. habil. dr. Vytautas MARTINAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

doc. dr. Artūras KILIKEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009).

Nariai:

prof. habil. dr. Rimantas KAČIANAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009),

dr. Fernando MARQUES DA SILVA (Nacionalinė civilinės inžinerijos laboratorija, Portugalija, mechanikos inžinerija – T 009),

dr. Raimondas PABARČIUS (Lietuvos energetikos institutas, energetika ir termoinžinerija – T 006),

doc. dr. Kęstutis VALANČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009).

Disertacija bus ginama viešame Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2021 m. balandžio 27 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vilniustech.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2021 m. kovo 26 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto 2021-007-M mokslo literatūros knyga

doi:10.20334/2021-007-M

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2021

© Dovydas Rimdžius, 2021

dovydas.rimdzius@vilniustech.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Dovydas RIMDŽIUS

THERMODYNAMIC MODEL OF WIND DRIVEN TURBINE VENTILATOR

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MECHANICAL ENGINEERING (T 009)

Vilnius, 2021

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2016–2021.

Supervisor

Prof. Dr Habil. Vytautas MARTINAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Mechanical Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Assoc. Prof. Dr Artūras KILIKEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009).

Members:

Prof. Dr Habil. Rimantas KAČIANAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009),

Dr Fernando MARQUES DA SILVA (National Laboratory for Civil Engineering, Portugal, Mechanical Engineering – T 009),

Dr Raimondas PABARČIUS (Lithuanian Energy Institute, Energetics and Power Engineering – T 006),

Assoc. Prof. Dr Kęstutis VALANČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Mechanical Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a. m. on 27 April 2021.**

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vilniustech.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 26 March 2021.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at Vilnius Gediminas Technical University repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje taikant eksperimentinius tyrimus ir sisteminės analizės metodus tiriami vėjo energiją naudojančys stoginiai turbininiai ventiliatoriai, jų veikimas, efektyvumas, funkcionalumas. Tiriamos galimybės padidinti vėjo energijos panaudojimo efektyvumą vėdinimui, esant stochastiniam vėjo kitimui metų cikle. Disertacijos tikslas – parengti eksperimentiškai nustatomomis mechaninėmis ir aerodinaminėmis charakteristikomis paremtą turbininio ventiliatoriaus teorinį veikimo modelį.

Darbe sprendžiami šie pagrindiniai uždaviniai: pirmasis – parengti ir įvykdyti eksperimentinių tyrimų programą, kuria struktūrizuojami STV veikimo režimai į atskirus srautinius procesus; antrasis – kiekybiškai ir kokybiškai palyginti skirtingų tokio tipo įrenginių eksperimentines charakteristikas; trečiasis – pasiūlyti turbininio ventiliatoriaus konstrukciją ir tekėjimo procesus jame atspindinčią struktūrinio suskaidymo koncepciją; ketvirtasis – parengti turbininio ventiliatoriaus veikimo termodinaminį modelį; penktasis – įvertinti galimybes padidinti vėjo energijos panaudojimo efektyvumą turbininiuose ventiliatoriuose.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriama problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, mokslinis darbo naujumas, ginamieji teiginiai, pristatomos disertacijos tema paskelbtos autoriaus publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje pateikiama vėjo energiją naudojančių natūralaus vėdinimo sistemų tyrimų apžvalga. Atliktos apžvalgos pagrindu suformuluoti tyrimo uždaviniai leidžiantys pasiekti tyrimo tikslą.

Antrajame skyriuje pristatoma turbininių ventiliatorių eksperimentinių tyrimų programa, metodika bei šių tyrimų rezultatai.

Trečiajame skyriuje pateiktas turbininio ventiliatoriaus veikimo termodinaminis modelis, kuris suformuotas eksperimentinių tyrimų pagrindu. Taip pat pateiktas teorinis turbininių ventiliatorių funkcionalumo padidinimo vertinimas, kuomet įrenginys gali akumuliuoti perteklinę vėjo energiją.

Abstract

This dissertation studies, through application of experimental research and methods of systematic analysis, wind driven roof turbine ventilators, their mode of operation, effectiveness, and functionality. It furthermore looks into the possibilities to boost wind energy efficiency for ventilation purposes, based on stochastic variation of wind throughout the year-cycle. The aim of the dissertation is to prepare a theoretical model of turbine ventilator operation based on experimentally determined mechanical and aerodynamic characteristics.

The thesis addresses the following objectives: preparing and executing an experimental research programme to structure the operating modes of the RTV into separate flow processes; carrying out a quantitative and qualitative comparison of the experimental characteristics of different RTVs of this type; proposing a structural breakdown concept reflecting the turbine ventilator construction and flow processes inside it; designing a thermodynamic model of turbine ventilator operation; and evaluating the possibilities to improve the efficiency of the use of wind energy by turbine ventilators.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, and lists of literature and scientific publications by the author on the topic of this dissertation.

The introduction covers the formulation of the problem, the relevance of the thesis, describes the object of research, formulates the aim and tasks of the thesis, describes the research methodology, the scientific novelty of the thesis, defended statements, outlines the author's publications and reports at science conferences on the topic of the dissertation, as well as the structure of the dissertation.

Chapter 1 presents a review of wind-driven natural ventilation systems research and features the research tasks formulated on the basis of said review to allow achieving the aim of the research.

Chapter 2 outlines the programme, methodology, and results of experimental research into turbine ventilators.

Chapter 3 describes the thermodynamic model of operation of the turbine ventilator as developed on the grounds of experimental research. It also contains a theoretical assessment of boosting the functionality of the turbine ventilator when the device can accumulate excess wind energy.

Žymėjimai

Simboliai

A – plotas;
 C – aerodinaminės traukos koeficientas;
 d – skersmuo;
 E – energija;
 F – jėga;
 g – laisvojo kritimo pagreitis;
 h – entalpija arba aukštis;
 k – koeficientas;
 M – masė;
 P – slėgis;
 Q – oro debitas;
 R – universalioji dujų konstanta;
 s – entropija;
 T – temperatūra;
 u – vėjo greitis;
 v – oro srauto greitis;

w – plotis;
 ε – energijos dalis arba efektyvumas;
 ζ – aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas;
 η – efektyvumo koeficientas;
 π – bedimensinis rodiklis, arba π ;
 ρ – oro tankis;
 τ – sukimo momentas;
 ω – sukimosi dažnis.

Indeksai

$'$ – idealus procesas;
 a – atmosfera;
 c – vėdinama patalpa;
 d – dinaminis slėgis arba aerodinaminė trauka;
 de – ištraukiamo oro srauto dinaminis slėgis;
 dej – dinaminis slėgis ežektoriuje;
 do – traukos jėga veikianti oro ištraukimo ortakį;
 dt – pilnutinė traukos jėga;
 dw – vėjo srauto dinaminis slėgis;
 e – ištraukiamas oro srautas;
 ej – ežekcija;
 ejs – aktyvaus srauto suspaudimas ežektoriuje;
 er – reikalingas ištraukiamas oro srautas;
 ex – termodinaminę sistemą paliekantis srautas;
 i – ištraukiamo oro įtekėjimo anga;
 $\max$ – maksimumas;
 p – slėgis arba savitoji šiluma;
 Q – oro debitas;
 r – rotorius;
 s – statinis slėgis;
 sc – vėdinamos patalpos statinis slėgis;
 se – ištraukiamo oro srauto statinis slėgis;
 STV – stoginis turbininis ventiliatorius;
 sw – vėjo srauto statinis slėgis;
 t – turbina;
 te – pilnutinis slėgis ištraukiant oro srautą;

tej – pilnutinis slėgis dėl ežekcijos;
tr – rotoriaus pridedamas pilnutinis slėgis;
tw – vėjo srauto pilnutinis slėgis;
ve – įrenginio skerspjuvio dalis statmena vėjo srautui;
w – vėjo srautas;
wi – į turbininio ventiliatoriaus vidų patekęs vėjo srautas;
wl – nuo turbininio ventiliatoriaus atitrūkęs vėjo srautas;
 ω – sukimosi dažnis.

Santrumpos

NCIL – Nacionalinė civilinės inžinerijos laboratorija;
SFD – skaičiuojamoji fluidų dinamika;
STV – stoginis turbininis ventiliatorius.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas	5
Disertacijos struktūra	5
1. VĖJO ENERGIJĄ NAUDOJANČIŲ NATŪRALAUS VĖDINIMO SISTEMŲ TYRIMŲ APŽVALGA	7
1.1. Natūralaus vėdinimo technologinių sprendimų apžvalga	8
1.1.1. Pasyvios natūralaus vėdinimo technologijos	9
1.1.2. Aktyvios natūralaus vėdinimo technologijos	16
1.2. Stoginių turbininių ventiliatorių tyrimų apžvalga	16
1.2.1. Eksperimentiniai tyrimai	18
1.2.2. Skaitiniai tyrimai	24
1.3. Stoginių turbininių ventiliatorių tyrimų suvestinė	27
1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	28

2. TURBININIŲ VENTILIATORIŲ MECHANINIAI IR AERODINAMINIAI	
TYRIMAI.....	31
2.1. Eksperimentinių tyrimų programa ir bandomi įrenginiai	31
2.2. Eksperimentinių tyrimų metodika	35
2.2.1. Eksperimentinių tyrimų standai	35
2.2.2. Ištraukiamo oro srauto įvertinimas	39
2.2.3. Aerodinaminės traukos ir pasipriešinimo charakteristikų įvertinimas	41
2.2.4. Rotoriumi generuojamos galios įvertinimas	42
2.2.5. Eksperimentinių rezultatų neapibrėžtis	44
2.3. Eksperimentinių tyrimų rezultatai	46
2.3.1. Ištraukiamo oro srauto charakteristikos	46
2.3.2. Aerodinaminės traukos ir pasipriešinimo rodikliai	54
2.3.3. Sukimo momento ir generuojamos galios charakteristikos.....	57
2.4. Antrojo skyriaus išvados	62
3. TURBININIO VENTILIATORIAUS TRIKOMPONENTĖS KONCEPCIJOS	
TERMODINAMINIS MODELIS	63
3.1. Turbininio ventiliatoriaus kontrolinis tūris	64
3.2. Turbininio ventiliatoriaus menami komponentai.....	66
3.2.1. Turbinos termodinaminis modelis	67
3.2.2. Ežektorius termodinaminis modelis	71
3.2.3. Ventiliatorius termodinaminis modelis	77
3.3. Menamų turbininio ventiliatoriaus komponentų veikimą integruojantis termodinaminis modelis.....	82
3.3.1. Turbininio ventiliatoriaus menamų komponentų tarpusavio sąveikos rezultatas.....	82
3.3.2. Teorinis turbininių ventiliatorių efektyvumo palyginimas.....	87
3.4. Turbininių ventiliatorių funkcionalumo padidinimo vertinimas.....	89
3.4.1. Perteklinės vėjo energijos akumuliacinio potencialo skaičiavimas	93
3.4.2. Hibridinio vėdinimo funkcionalumo padidinimo teorinio skaičiavimo rezultatai	96
3.4.3. Akumuluotos vėjo energijos naudojimo galimybės hibridinėje vėdinimo sistemoje	100
3.5. Trečiojo skyriaus išvados	101
BENDROSIOS IŠVADOS	103
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	105
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS ..	111
SUMMARY IN ENGLISH.....	113

PRIEDAI ¹	129
A priedas. Sąžiningumo deklaracija	131
B priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą daktaro disertacijoje.....	132
C priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	138

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem.....	1
Relevance of the thesis	2
The object of research	2
The aim of the thesis	2
The tasks of the thesis	2
Research methodology	3
Scientific novelty of the thesis	3
Practical value of the reasearch findings	4
Defended statements.....	4
Approval of the research findings	5
The structure of the dissertation	5
1. REVIEW OF WIND DRIVEN NATURAL VENTILATION SYSTEMS	
RESEARCH	7
1.1. Review of natural ventilation technological solutions.....	8
1.1.1. Passive natural ventilation technologies	9
1.1.2. Active natural ventilation technologies.....	16
1.2. Review of roof turbine ventilators research.....	16
1.2.1. Experimental research.....	18
1.2.2. Numeric studies	24
1.3. A summary of research of roof turbine ventilators	27

1.4. Conclusions of the first chapter and tasks formulation for thesis.....	28
2. MECHANICAL AND AERODYNAMIC RESEARCH OF TURBINE VENTILATORS	31
2.1. Experimental research programme and test devices	31
2.2. Experimental research methodology	35
2.2.1. Experimental research stands.....	35
2.2.2. Evaluation of extracted airflow.....	39
2.2.3. Evaluation of aerodynamic drag and minor dynamic loss	41
2.2.4. Evaluation of rotor generated power.....	42
2.2.5. Uncertainty of experimental research	44
2.3. Experimental research results	46
2.3.1. Extracted airflow characteristics	46
2.3.2. Aerodynamic drag and minor loss characteristics	54
2.3.3. Torque and generated power characteristics	57
2.4. Conclusions of the second chapter	62
3. THERMODYNAMIC MODEL OF TRIPLE-COMPONENT CONCEPT OF TURBINE VENTILATOR	63
3.1. Control volume of the turbine ventilator	64
3.2. Hypothetical components of the turbine ventilator.....	66
3.2.1. Thermodynamic model of the turbine.....	67
3.2.2. Thermodynamic model of the ejector	71
3.2.3. Thermodynamic model of the ventilator.....	77
3.3. Thermodynamic model covering the operation of the hypothetical components of the turbine ventilator	82
3.3.1. Result of the interaction of the hypothetical components of the turbine ventilator.....	82
3.3.2. Theoretical comparison of the efficiency of turbine ventilators	87
3.4. Assessment of increasing turbine ventilator functionality	89
3.4.1. Calculation for the potential to accumulate excess wind energy	93
3.4.2. Theoretical calculation results for increasing hybrid ventilation functionality.....	96
3.4.3. Possibilities to use accumulated wind energy in hybrid ventilation system.....	100
3.5. Conclusions of the third chapter	101
GENERAL CONCLUSIONS	103
REFERENCES	105
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF DISSERTATION	111
SUMMARY IN ENGLISH.....	113

ANNEXES ²	129
Annex A. Authors declaration of academic integrity	131
Annex B. The co-authors' agreements to present publications material in the doctoral dissertation.....	132
Annex C. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation.....	138

² The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Įvadas

Problemos formulavimas

Šiuolaikinių pastatų vėdinimo sistemose veikiantys elektriniai ventiliatoriai naudoja didelę dalį pastatams reikalingos energijos. Siekiant sumažinti energijos vartojimą būtina ieškoti naujų sprendimų, kurie užtikrintų aukštą vėdinimo sistemų efektyvumą ir reikiamą oro kokybę. Vienas iš galimų būdų – atsinaujinančią energiją naudojančių technologijų taikymas. Atsinaujinantys energijos ištekliai tampa neatsiejamu šiuolaikinių technologijų energijos šaltiniu, tačiau beveik visos jų formos turi esminę problemą – neužtikrina poreikius atitinkančio stabilaus energijos srauto. Dėl šios priežasties, daugelis tokių sistemų negali užtikrinti reikiamo vėdinimo funkcionalumo.

Šiuo metu plačiai paplitę vėjo energiją naudojančios stoginiai turbininiai ventiliatoriai (STV). Ankstesnių mokslinių tyrimų apžvalga rodo, jog trūksta tyrimų, universaliai aiškinančių srautinių oro procesų įtaką turbininių ventiliatorių efektyvumui bei nėra tokių įrenginių vienijančio teorinio veikimo modelio. Analizuojant vėdinimo funkcionalumą padidinančių hibridinių sistemų tyrimus pastebima, kad apsiribojama juos tobulinti integruojant elektrinį ventiliatorių, ar integruojant saulės elementus, tačiau nevertinamas turbininių ventiliatorių sezoninis veiksmingumas ir netiriamas vėjo energijos akumuliacijos potencialas, esant perteklinei vėjo energijai.

Darbo aktualumas

Oro srautų procesai turbininiuose ventiliatoriuose yra sudėtingi, todėl jų efektyvumo ir funkcionalumo vertinimui atliekami ilgai trunkantys kiekybiniai ir kokybiniai tyrimai. Šio darbo pirmine hipoteze teigiama, kad turbininiuose ventiliatoriuose vykstantys procesai savyje apjungia procesus vėjo turbinose, ežektoriuose bei ventiliatoriuose. Ji vystoma kuriant įrenginio veikimo termodinaminio modelio koncepciją, kuria galima įvertinti srautinių procesų sąveiką minėtuose trijuose komponentuose, ją taikyti turbininių ventiliatorių tobulinimui. Tokios koncepcijos pagrindu parengtas modelis darbe kryptingai testuojamas eksperimentiniais tyrimais.

Siekiant įrenginius kiekybiškai palyginti plačiame veikimo diapazone, šiame darbe vėjo energiją naudojančių ventiliatorių ištraukiamo oro charakteristikos nustatomos esant ne tik skirtingiems vėjo greičiams, bet ir aplinkos statinio slėgio sąlygoms. Be to, analizuojant turbininius ventiliatorius atliekami retai pasitaikantys generuojamos galios ir aerodinaminių charakteristikų bandymai.

Hibridinių vėdinimo sistemų tyrimų apžvalga rodo, jog ieškoma sprendimų, kaip padidinti vėdinimo funkcionalumą, kai nepakanka vėjo srauto turbininiam ventiliatoriui veikti nominaliu režimu. Tačiau trūksta mokslinių tyrimų apie perteklinės vėjo energijos akumuliacijos galimybes tokiose sistemose. Šiame darbe vertinamas energijos kaupimo potencialas ir jos panaudojimas vėdinimo funkcionalumui padidinti.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – vėjo energiją naudojančios stoginiai turbininiai ventiliatoriai, jų veikimas, efektyvumas, funkcionalumas.

Darbo tikslas

Parengti eksperimentiškai nustatomomis mechaninėmis ir aerodinaminėmis charakteristikomis paremtą turbininio ventiliatoriaus teorinį veikimo modelį.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Apžvelgtų mokslinių tyrimų pagrindu parengti ir įvykdyti eksperimentinių tyrimų programą, kuria struktūrizuojami STV veikimo režimai į atskirus srautinius procesus.
2. Kiekybiškai ir kokybiškai palyginti skirtingų STV eksperimentines sukimo momentų, dažnių, galių ir oro srautų charakteristikas, nustatyti jų empirines lygtis ir palyginti su teorinėmis lygtimis.
3. Atsižvelgiant į eksperimentinių tyrimų rezultatus, pasiūlyti STV konstrukciją ir tekėjimo procesus atspindinčią struktūrinio suskaidymo koncepciją, kuri būtų palanki procesų termodinaminio modelio formavimui.
4. Parengti pasirinktų STV komponentų integruojantį veikimo termodinaminį modelį ir jį pagrįstai susieti su eksperimentinių tyrimų rezultatais.
5. Įvertinti galimybes padidinti vėjo energijos panaudojimo efektyvumą STV, esant stochastiniam vėjo kitimui metų cikle.

Tyrimų metodika

Darbe pristatyti eksperimentiniai tyrimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto (Vilnius Tech) laboratorijoje ir Portugalijos Nacionalinėje civilinės inžinerijos laboratorijoje (NCIL). Tyrimai laboratorijose atlikti vėjo tuneliuose, atsižvelgiant į tarptautinius STV bandymo standartus „EN 13141-5“, „AS/NZS 4740:2000“ bei remiamasi mokslinėse publikacijose pateiktų eksperimentinių tyrimų idėjomis. Imituojant skirtingas įrenginių veikimo sąlygas, bandymų stenduose keičiami vėjo greičiai, statiniai slėgiai, STV rotoriaus apkrovos. Tyrimo rezultatams apdoroti ir palyginti taikoma sisteminė analizė, kuri apjungia darbe taikomus statistinius, bedimensinius, termodinامينius ir kitus metodus.

Rengiant termodinaminę STV veikimo modelio koncepciją taikoma termodinaminė analizė, kokybiškai ir kiekybiškai nustatytos procesų priklausomybės grindžiamos eksperimentų rezultatais. Skaičiuojant metinius rodiklius naudojami „Meteonorm“ programos vėjo greičio duomenys.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie mechanikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Eksperimentiniuose tyrimuose pritaikytas integralus bandymų metodas, leidžiantis įvertinti bandytų trijų skirtingų STV vėdinimo funkcionalumą, generuojamą galią ir aerodinaminį pasipriešinimą. Bandytiems įrenginiams nustatytos empirinės charakteristikų lygtys.
2. Taikant bedimensinę analizę, kiekybiškai ir kokybiškai palyginti dviejų skirtingų vėjo energiją naudojančių deflektorių bei trijų STV ištraukiamo oro srautai, esant skirtingoms vėjo greičio ir aplinkos statinio slėgio sąlygoms.
3. Susiejus eksperimentinių tyrimų rezultatus, darbe pristatyta vėjo energiją naudojančio STV ežektoriaus, turbinos ir stoginio ventiliatoriaus veikimą integruojanti koncepcija, kuri išreikšta integraliu oro srautų sąveikos termodinaminiu modeliu. Tokios koncepcijos pagrindu sukurtas modelis leidžia kokybiškai ir kiekybiškai įvertinti STV veikimo metu sąveikaujančių srautinių procesų poveikį įrenginio funkcionalumui, nustatyti efektyvumą bei teorinį tobulinimo potencialą.
4. Remiantis eksperimentinių tyrimų rezultatais ir statistiniais metinio vėjo greičio kitimo duomenimis – įvertintas teorinis STV ištraukiamo oro srauto, energijos akumuliacijos, funkcionalumo padidėjimo potencialas hibridinėje vėdinimo sistemoje.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Šiame darbe pateikta vėjo energiją naudojančio STV daugiakomponentė koncepcija, kurios išreiškimas termodinaminio modeliu pagrindu leidžia kokybiškai ir kiekybiškai identifikuoti atskirus STV veikiančius srautus, įvertinti jų poveikį įrenginio funkcionalumui, nustatyti efektyvumą bei teorinį tobulinimo potencialą. Eksperimentinių tyrimų rezultatai naudingi kuriant atsinaujinančią vėjo energiją naudojančias hibridinio vėdinimo sistemas bei vertinant tokių sistemų veiksmingumą akumuliuojant perteklinę vėjo energiją. Teorinio skaičiavimo rezultatai ir pristatyta metodika gali būti taikoma vėdinimo funkcionalumo padidėjimo vertinimui.

Ginamieji teiginiai

1. STV funkcionalumas labai priklauso nuo statinio slėgio sąlygų, todėl šių įrenginių pasirinkimas neturėtų apsiriboti charakteristikų vertinimu tik pagal vėjo greitį.

2. Trijų komponentų struktūrinio suskaidymo koncepcija išreikštas integruojantis termodinaminis STV modelis leidžia įvertinti vėjo energiją naudojančių STV oro srautų sąveiką, šių įrenginių tobulinimo galimybes.
3. Platus STV charakteristikų pažinimas leidžia įvertinti generuojamos perteklinės energijos akumuliacijos galimybes, padidinti kintančią vėjo energiją naudojančių hibridinių vėdinimo sistemų funkcionalumą.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbti 8 straipsniai: du – Clarivate Analytics Web of Science duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose, turinčiuose citavimo rodiklį (Rimdžius et al., 2021; Martinaitis et al., 2020); keturi – tarptautinių konferencijų leidiniuose, referuojamuose Clarivate Analytics duomenų bazėje Proceedings (Rimdžius et al., 2018; Streckienė et al., 2021; Streckienė et al., 2018; Januševičius et al., 2017), vienas – kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose (Rimdžius & Bielskus, 2018), vienas – konferencijų pranešimų medžiagoje (Sketerskis, Rimdžius, & Martinaitis, 2018). Europos patentų biure įregistruotas patentas (Martinaitis et al., 2021). Lietuvos Respublikos valstybiniame patentų biure įregistruoti du patentai (Martinaitis et al., 2021, Martinaitis et al., 2019).

Disertacijos tema perskaityti 3 pranešimai tarptautinėse konferencijose Lietuvoje ir Vokietijoje:

- Tarptautinėje konferencijoje Lietuvoje „*10th International Conference „Environmental Engineering“*“ 2017 m. Vilniuje;
- Du pranešimai tarptautinėje konferencijoje Vokietijoje „*The 3rd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE 2018)*“ 2018 m. Berlyne.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados. Taip pat yra trys priedai.

Darbo apimtis yra 129 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 76 numeruotos formulės, 57 paveikslai ir 6 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 73 literatūros šaltiniai.

Vėjo energiją naudojančių natūralaus vėdinimo sistemų tyrimų apžvalga

Natūralus vėdinimas yra vienas iš esminių faktorių projektuojant energiška efektyvius pastatus. Daugeliu atveju natūralus vėdinimas apima natūralias vėjo ir gravitacijos jėgas, kuriomis šviežias oras tiekiamas į pastato patalpas. Pagal vėdinimo būdą, natūralus vėdinimas gali būti suskirstytas į pasyvias ir aktyvias vėdinimo technologijas.

Šiame skyriuje apžvelgiamos pagrindinės natūralaus vėdinimo rūšys, jų privalumai, trūkumai, taikymo galimybės, mokslinių tyrimų kryptys. Detaliau pristatomi stoginiai turbininiai ventiliatoriai bei jų eksperimentiniai ir skaitiniai tyrimai. Remiantis sudaryta tyrimų suvestine, pateikiama temos problema bei formuluojami disertacijos uždaviniai.

Skyriaus tematika paskelbtos trys publikacijos (Rimdžius et al., 2018; Rimdžius & Bielskus, 2018; Sketerskis, Rimdžius, & Martinaitis, 2018).

1.1. Natūralaus vėdinimo technologinių sprendimų apžvalga

Jau daugelį amžių natūralus vėdinimas yra pagrindinis būdas pastatų vėdinimui ir iki šiol jis vis dar išlieka daugelio senos statybos pastatų pirminiu vėdinimo šaltiniu. McQuiston ir Parker teigimu šis vėdinimo būdas vyrauja gyvenamosios paskirties pastatuose (Faye C. McQuiston, Jerald D. Parker, 2005). Įprastai tokiuose pastatuose natūralus vėdinimas vyksta atveriant langus, orui tekant specialiai numatytomis angomis ir išorinių atitvarų nesandarumais. Visgi, natūralus vėdinimas turi esminių funkcionalumo problemų dėl šių pagrindinių priežasčių: nepastovios temperatūros pastato viduje ir išorėje, vėjo greičio kitimas. Tai ypač nepalanku laikotarpiams, kai susidaro kritinės temperatūros ir vėjo greičio sąlygos, vyksta dideli šių veiksnių svyravimai. Vienu atveju vėdinimas gali būti per didelis, kitu atveju per mažas, ar net sukelti tokias pasekmes kaip vėdinimo srauto tekėjimas į priešingą pusę (Welsh, 1994). Dėl šių priežasčių, natūraliu vėdinimu paremti technologiniai sprendimai, įprastai reikalauja papildomų mechaninių vėdinimo sistemų.

Kita vertus, didėjant modernizuotų ir šiuolaikinių pastatų sandarumui – vis dažniau susiduriama su pablogėjusios oro kokybės problema (Gill et al., 2021). Be to, didėja reikalavimai oro kokybei, šiuolaikinių pastatų vėdinimui suvartojama energija užima didelę dalį visos pastate suvartojamos energijos (Kitzberger et al., 2018; Piselli et al., 2020). Šios ir kitos priežastys veda prie atsinaujinusio susidomėjimo natūraliu vėdinimu bei naujų sprendimų paieškos (Khan, Su, & Riffat, 2008).

Natūralus vėdinimas vis dažniau įvardinamas kaip alternatyvus būdas mechaniniam vėdinimui ir vėsinimui. Natūralaus vėdinimo sprendimai tampa ypač aktualūs projektuojant energiškai efektyvius pastatus, sumažinant mechaninio vėdinimo poreikį. Nauji moksliniai tyrimai rodo, jog natūralaus vėdinimo technologijos turi didžiulį neišnaudotą potencialą pastatų vėdinimui ir tam turėtų būti skirta daugiau dėmesio lyginant su mechaniniu vėdinimu (Jones et al., 2016). Daugelis tyrėjų ieško būdų kaip įgyvendinti natūralaus vėdinimo sprendimus, kurie užtikrintų ne tik mažesnes energijos sąnaudas, bet ir išlaikytų reikiamą oro kokybę, arba ją pagerintų (Lukiantchuki et al., 2020). Izadyar atliktas tyrimas rodo, jog didžiausias natūralaus vėdinimo potencialas pastebimas aukštuose bei vidutinio aukštumo pastatuose (Izadyar et al., 2020).

Natūralus vėdinimas dažniausiai apibūdinamas kaip procesas, kurio metu šviežias oras yra tiekiamas į patalpas nenaudojant jokios mechaninės sistemos energijos. Natūralaus vėdinimo metu vyrauja du fundamentalūs principai: gravitacijos jėga ir vėjo varomas oro srautų judėjimas (Haw et al., 2012; Jomehzadeh et al., 2020; Park et al., 2017). Fizikine prasme tai yra oro slėgio skirtumo ir oro tankio skirtumo rezultatas. Šios skirtingos prigimtios jėgos

dažniausiai veikia vienu metu ir tam tikrais atvejais gali būti priešingų kryptių, arba veikdamos sinergijoje viena kitą sustiprinti.

Gravitacijos jėga susidaro dėl oro temperatūrų skirtumo tarp pastato vidaus ir išorės (Han et al., 2018). Kai pastato vidaus oro temperatūra yra didesnė už lauko oro temperatūrą, šiltas vidaus oras kyla aukštyn ir yra pakeičiamas kitu, šaltesniu ir tankesniu oro iš apačios, kuris įprastai infiltracijos būdu iš lauko patenka pro pastato angas. Natūralus vėdinimas dėl gravitacijos jėgos yra žymus tais laikotarpiais, kai yra mažas vėjo greitis bei didelis pastato vidaus ir išorės oro temperatūrų skirtumas (Yuan & Glicksman, 2008).

Vėjo varomas vėdinimas priklauso nuo vėjo greičio, krypties, pastato geometrijos, natūralaus vėdinimo įrenginių tipo ir kitų faktorių (Chu & Wang, 2010; van Hooff et al., 2011). Į pastato atitvaras pučiantis tiesioginis vėjo srautas sukuria padidėjusį slėgį. Tuo tarpu priešingoje pastato pusėje susidaro mažesnis slėgis. Šis, tarp skirtingų pastato pusių susidaręs slėgio skirtumas, sudaro sąlygas natūraliam vėdinimui (Wu et al., 2021). Kita vertus, vėjo srautui sąveikaujant su natūralaus vėdinimo įrenginiais, pastatų vėdinimas tiesiogiai priklauso nuo įrenginių veikimo principo. Vėjo srautas gali būti tiesiogiai išnaudojamas oro pasiurbimui iš vėdinimo kanalo ežekcijos būdu (Wills et al., 1959), arba vėjo srauto energija gali būti naudojama ventiliatoriams sukti.

Įprastai, natūralaus vėdinimo technologijos pagal savo veikimo principą klasifikuojamos į pasyvias ir aktyvias (M. Ismail & Abdul Rahman, 2010; J. Lien, 2002). Toliau esančiuose poskyriuose apžvelgiamos pagrindinės pasyvios ir aktyvios vėjo energiją naudojančios sistemos.

1.1.1. Pasyvios natūralaus vėdinimo technologijos

Įprastai laikoma, jog prie pasyvių vėjo varomo vėdinimo technologijų priskiriami sprendimai, kurie neturi judančių detalių. Dažnu atveju tai gali būti pastato architektūriniai sprendimai, papildomi statiniai ir įrenginiai montuojami ant pastato stogo ar sienų (Chan et al., 2013). Vienas paprasčiausių ir visiems puikiai pažįstamas pasyvioms vėdinimo technologijoms priskiriamas pastato architektūrinis sprendimas – langai. Tinkamai parinktos langų angų vietos bei jų dydžiai yra itin svarbūs faktoriai ne tik pastato natūraliam apšvietimui, bet ir natūraliam vėdinimui. Toliau, šiame poskyryje apžvelgiamos kelios populiarios pasyvios natūralaus vėdinimo technologijos.

Dažnu atveju kitas pasitaikantis natūralaus vėdinimo architektūrinis sprendimas – atriumai. Tai specifiniai, įprastai negyvenamosios paskirties pastatų architektūriniai sprendimai, kurie įrengiami pastato centrinėje ar kraštinėje dalyje. Konstrukciškai atriumai yra didelės skaidrių atitvarų erdvės su viršuje įrengtomis oro ištekimui angomis ir sujungti su pastato koridoriais, ar kitomis pastato patalpomis (1.1 pav.).

Atriumais sukurama natūralaus vėdinimo trauka tiesiogiai priklauso nuo besikeičiančių varomosios jėgos sąlygų. Istorinė patirtis ir atlikti tyrimai rodo, jog atriumai labiau efektyvūs dideliuose ir aukštuose pastatuose (Acred & Hunt, 2013; Moosavi et al., 2014).

1.1 pav. Natūralus vėdinimas pastato atriumu (Acred & Hunt, 2013)

Fig. 1.1. Natural ventilation in atrium building (Acred & Hunt, 2013)

Pagrindiniai faktoriai lemiantys natūralaus vėdinimo trauką yra gravitacijos efektas, priklausantis nuo temperatūros skirtumo tarp pastato vidaus ir išorės, bei lauke pučiamo vėjo greičio. Mokslinėje literatūroje minima, jog atriumai dažniausiai projektuojami atsižvelgiant į vyraujančius ir prognozuojamus temperatūros skirtumus tarp pastato vidaus ir išorės (Lomas & Ji, 2009). Pastarieji priklauso tiek nuo vidinių šilumos pritekių, tiek nuo išorinių saulės pritekių. Tuo tarpu vėjo srauto poveikis vertinamas kaip galima didelė papildoma varomoji natūralaus vėdinimo jėga, tačiau ji yra nenuspėjama. Dėl šios priežasties, vėdinimas yra nekontroliuojamas. Horan ir Finn atlikto tyrimu metu nustatyta, jog atriumų natūralaus vėdinimo trauka turi tiesinę priklausomybę nuo vėjo greičio (Horan & Finn, 2008).

Kitas galimas architektūrinis sprendimas, leidžiantis išnaudoti vėjo energiją pastato vėdinimui – sparno siena (angl. *wing wall*). Šis architektūrinis sprendimas leidžia pagerinti vėdinimą tais atvejais, kai pastato patalpos turi vėdinimo angas tik vienoje pusėje bei nėra galimybės sukurti skersvėjo pro skirtingas pastato sienas (Jomehzadeh et al., 2020).

Įprastai, šis vėdinimo būdas taikomas pasitelkiant langus, kurių orientacija sutampa su pučiamo vėjo kryptimi. Tačiau norint pagerinti efektyvumą, ties patalpos langais papildomai suformuojami išsikišusios konstrukcijos elementai (1.2 pav.), kurie pučiant vėjui, padidina teigiamo ir neigiamo slėgio zonas ties

langais ir tokiu būdu padidina oro trauką (Elwan et al., 2018). Pasak Mak, toks sprendimas patalpoje leidžia pasiekti vėdinimo srauto greitį, kuris gali siekti iki 40 % pučiamo vėjo greičio (Mak et al., 2007). Tuo tarpu be šių išsikišusios konstrukcijos elementų patalpoje galima pasiekti tik iki 15 % vėjo greičio. Nors sparno sienos yra gana efektyvus vėdinimo sprendimas, jų taikymas gana retas dėl riboto integravimo galimybių į pastatų architektūrinius sprendimus. Ypatingai dėl to, kad jie sumažina šviesios pateikimą į patalpą (Khan, Su, & Riffat, 2008).

1.2 pav. Sparno sienos veikimo principo schema (Elwan et al., 2018)

Fig. 1.2. Scheme of the operation principle of the wing wall (Elwan et al., 2018)

Siekiant kartu išnaudoti vėjo ir gravitacijos jėgas, prie pastatų galima įrengti – vėjo bokštą (angl. *wind tower*). Tai dažniausiai yra atskiras pastato statinys, suskirstytas į dvi atskiras sekcijas. Pučiantis vėjo srautas gali iškelti per tos sekcijos angą, kuri yra atsukta į vėjo pusę (1.3 pav. a). Ši sekcija yra vadinama teigiamo slėgio zona. Bokštu pratekėjęs oras atitinkamai pasiskirsto į žemesnio slėgio zonas. Oro srautas gali iškelti per kitą bokšto angą arba per pastato angas. Tokiu būdu vyksta oro srautų maišymasis ir sukuriama skersvėjis (Varela-Boyd & Moya, 2020).

Esminiai faktoriai tokio sprendimo veikimui yra ties bokšto angomis pučiamo vėjo srauto kampas ir užuovėjos anga bokšte, kuri gali sumažinti oro iškėlimo greitį. Visgi, atliktos studijos parodė, jog šiuo vėdinimo sprendimu labai sunku reguliuoti ištraukiamo oro srautą ir tokie statiniai netinka vietovėse, kur yra mažas vėjo greitis (Karakatsanis et al., 1986). Be to, tarp trūkumų įvardijamos problemos dėl dulkių kaupimosi bei statiniuose gali veisti vabzdžiai. Naujesnės studijos parodė, kad tokiems statiniams naudinga įrengti automatines sklendes, kurios reguliuotų bokšto angų dydį. Taip pat, bokštai gali būti patobulinti kartu naudojant orinius saulės kolektorius, kurie leistų padidinti gravitacijos sukuriamą trauką ir tokiu būdu vėdinimas vyktų esant ir mažiems vėjo greičiams (Nouanégué et al., 2008).

Panašiam veikimo principui į vėjo bokštus priskiriami dvigubi fasadai (Pourshab et al., 2020). Naudojant tokius sprendimus sukuriama skersvėjis, kurio

pagrindinė varomoji jėga yra vėjas bei gravitacija. Saulės spinduliuotė, šildydama oro srautą dvigubame fasade, sukuria gravitacijos efektą. Tuo tarpu vėjo srautas sukurdamas slėgių skirtumą priešingose fasadų pusėse šį efektą padidina (1.3 pav. b). Panašiai kaip ir vėjo bokštų atveju, nustatyta, kad vėjo greitis ir kryptis yra labai svarbūs faktoriai, lemiantys dvigubų fasadų natūralaus vėdinimo efektyvumą.

1.3 pav. Vėjo bokšto ir dvigubo fasado veikimo principų palyginimas: a) vėjo bokštas (Khan, Su, & Riffat, 2008); b) dvigubas fasadas (Pourshab et al., 2020)

Fig. 1.3. Comparison of the operation principle of wind tower and the double-skin facade: a) wind tower (Khan, Su, & Riffat, 2008); b) double-skin facade (Pourshab et al., 2020)

Kitas įrenginys turintis panašumų į anksčiau minėtas vėdinimo technologijas – vėjo gaudyklė (angl. *windcatcher*). Vėjo gaudyklės (1.4 pav.) yra ant pastato stogo montuojami įrenginiai, kurie tiekia šviežią orą į patalpas ir ištraukia užterštą orą, kartu veikiant vėjo slėgio ir gravitacijos jėgoms (Jomehzadeh et al., 2020). Vėjo gaudyklės pasižymi tuo, kad gali įtraukti vėjo srautą pastato stogo lygyje ir toliau nukreipti į pastato vidų bei tokiu būdu, tuo pačiu ištraukti orą iš užuovėjos zonų. Be to, tokio įrenginio privalumas – galimybė vėdinti kelių aukštų pastatus. Chong įvertino tokių įrenginių našumą ir nustatė, kad vėjo gaudyklėmis įtekančio oro greitis į patalpą yra panašus į pučiamo vėjo greitį (Chong et al., 2016).

1.4 pav. Vėjo gaudyklės veikimo principo schema (Monodraught, 2020)

Fig. 1.4 Scheme of the operation principle of the windcatcher (Monodraught, 2020)

Oro ištraukimo metu, vėdinimo trauka vėjo gaudyklėse susidaro dėl įrenginyje susidarančių gravitacijos bei vėjo srauto jėgų. Dėl šių jėgų pastato viduje ir išorėje susidaręs slėgio ir temperatūrų skirtumas verčia patalpos orą kilti aukštyn, ir ištekti per specialius įrenginio kanalus (Liu Li, 2007). Tokia sistema dažniausiai yra sudaryta iš keturių kanalų: šviežio oro įtekėjimo kanalo, šalinamo oro kanalo, į pastatą tiekiamo oro kanalo, iš pastato ištraukiamo oro kanalo. Šviežio oro įtekėjimo ir šalinimo oro kanalų kryptis gali kisti priklausomai nuo vėjo krypties. Ši savybė leidžia sumažinti priklausomybę nuo vėjo sąlygų ir nereikia keisti įrenginio krypties (Zaki et al., 2019). Elmualim atliktais skaitiniais tyrimais nustatyta, kad veikiant tik vėjo gaudyklei, susidaro gana maža trauka, tačiau atidarius langus, trauka padidėja ženkliai (Elmualim, 2006).

Kitas itin plačiai ant pastato stogo montuojamas įrenginys – deflektorius (1.5 pav.). Stoginiai deflektoriai pasižymi nesudėtinga konstrukcija ir yra itin dažna priemonė pagerinanti natūralų pastatų vėdinimą. Šie sprendimai skirti ne tik pagerinti natūralų vėdinimą, bet tuo pačiu apsaugo nuo priešingos krypties oro traukos, lietaus, paukščių, vabzdžių ir kitų nepageidaujamų veiksnių patekimo į pastatą (Wills et al., 1959). Deflektorių veikimas paremtas gravitacijos jėgomis bei ežekcija. Pastarasis reiškiny susidaro kai vėjo srautas statmena kryptimi prateka virš oro ištraukimo kanalo ir tokiu būdu šioje vietoje sudaro žemo slėgio zoną. Dėl šios priežasties, susidaro sąlygos oro pasiurbimui ežekcijos būdu.

Tokių įrenginių tyrimai rodo, kad jais siurbiamas oro kiekis priklauso nuo vėjo greičio ir krypties (Pfeiffer et al., 2008). Planuojant deflektorių įrengimą svarbu atsižvelgti, kad nebūtų kliudoma oro srauto tekėjimui. Kitu atveju labai sumažėja ištraukiamo oro trauka.

1.5 pav. Stoginio deflektoriaus veikimo principo schema (Pfeiffer et al., 2008)

Fig. 1.5. Scheme of the operation principle of the rooftop deflector (Pfeiffer et al., 2008)

2008 m. atliktas kompiuterinis modeliavimas rodo, jog vėjo srauto kryptis yra kritinis faktorius šių įrenginių efektyvumui (Pfeiffer et al., 2008). Tyrimai rodo, kad tokie stacionarūs įrenginiai turi ribotas vėjo energijos išnaudojimo galimybes. Tuo tarpu aktyvaus tipo įrenginiai vėjo potencialą turėtų išnaudoti geriau.

Prie pasyvių vėjo energiją naudojančių vėdinimo technologijų gali būti priskiriami ir reguliuojamos krypties deflektoriai (1.6 pav.). Khan *et al.* šiuos įrenginius klasifikuoja kaip kryptines vėjo varomo vėdinimo technologijas (Khan, Su, & Riffat, 2008).

1.6 pav. Reguliuojamos krypties deflektoriaus veikimo principas (Darco, 2020)

Fig. 1.6. Operation principle of the adjustable direction deflector (Darco, 2020)

Vienas didžiausių tokių įrenginių privalumų – apsaugoma nuo atgalinio ištraukiamo oro srauto tekėjimo. Pučiant vėjo srautui į įrenginį, jo aerodinaminė konstrukcija pasuka deflektoriaus gaubtą kryptimi, kuria sudaroma kliūtis vėjo srauto patekimui į įsiurbimo kanalą. Tuo tarpu vėjo srautas aptekėdamas deflektorių už jo sukuria žemo slėgio zoną ir dėl to įvyksta oro srauto pasiurbimas iš ištraukimo kanalo.

Kitas vėjo energiją naudojantis vėdinimo įrenginys – Japonijoje sukurtas įrenginys, pavadinimu „Wing Jetter“ (HASEC, 2007). Jo konstrukcija paremta aviacijoje taikomais sprendimais, todėl tam tikros įrenginio detalės primena sparnus (1.7 pav. a). Tokios konstrukcijos tikslas – apatinėje sparno dalyje orui suteikti pagreičio bei tokiu būdu sukurti neigiamą slėgį vėdinimo sistemos kanale. Įrenginio viršuje sumontuota mentė, kuri skirta jo orientavimui pagal vėjo kryptį.

Vėjo srautui pasiekus įrenginį, jis atsiskiria į dvi dalis. Viršutinėje dalyje susidaro pasipriešinimo jėga, todėl šioje dalyje veikia teigiamas slėgis. Tuo tarpu apatinėje dalyje susidaro keliamoji jėga ir veikia neigiamas slėgis. Kadangi apatinė dalis sujungta su vėdinimo sistemos kanalu, sukurtas neigiamas slėgis inicijuoja oro ištraukimą. Tokie įrenginiai pasižymi labai mažu triukšmo lygiu ir nesukuria pastato konstrukcijų vibracijų.

1.7 pav. „Wing Jetter“ ir Venturi tipo vėdinimo sistemų veikimo principų palyginimas:
a) „Wing Jetter“ (Khan, Su, & Riffat, 2008); b) Venturi (Sik et al., 2017)

Fig. 1.7. Comparison of the operation principle of Wing Jetter and Venturi-type ventilation systems: a) „Wing Jetter“ (Khan, Su, & Riffat, 2008); b) Venturi (Sik et al., 2017)

Panašiu veikimo principu pasižymi ir Venturi tipo vėdinimo įrenginys (1.7 pav. b). Pučiant vėjo srautui į įrenginio įtekėjimo angą, susidaro ežekcijos reiškiny ir tokiu būdu pasiurbiamas oro srautas iš ištraukimo angos (Han et al., 2018). Kaip ir „Wing jetter“ atveju, veikimo metu susidarius temperatūrų skirtumui tarp patalpos vidaus ir išorės, kartu veikia ir gravitacijos jėgos, kurios padidina ištraukiamą oro srautą.

1.1.2. Aktyvios natūralaus vėdinimo technologijos

Aktyvioms vėjo varomo vėdinimo technologijoms priskiriami sprendimai, kurie veikiami vėjo srauto ar papildomo energijos šaltinio, sukdamiesi, arba kitaip judėdami, atlieka mechaninį darbą (J. Lien, 2002). Mechaninio darbo metu, tokių įrenginių veikimas primena įprastas elektra varomas mechanines vėdinimo sistemas, tačiau tam naudojama tik atsinaujinanti vėjo arba saulės energija. Vienas dažniausiai sutinkamų aktyvių natūralaus vėdinimo technologinių įrenginių – stoginiai turbininiai ventiliatoriai. Šiais įrenginiais atliekamas aktyvus natūralus vėdinimas tiesiogiai priklauso nuo pučiamo vėjo srauto.

Tarp šių įrenginių egzistuoja hibridiniai turbininiai ventiliatoriai, su papildomais energijos šaltiniais. Be to, prie aktyvių vėdinimo technologijų gali būti priskiriamos vėjo gaudyklės, kuriose įrengti saulės elementais varomi ventiliatoriai. Dažnu atveju aktyviose technologijose naudojami papildomi energijos šaltiniai, siekiant padidinti natūralaus vėdinimo funkcionalumą.

1.2. Stoginių turbininių ventiliatorių tyrimų apžvalga

Tarp aktyvių vėjo energiją naudojančių vėdinimo technologijų plačiai paplitę stoginiai turbininiai ventiliatoriai (STV). Šio tipo įrenginiai pasižymi nesudėtingu įrengimu ir jų veikimui nėra svarbi vėjo kryptis. Tokių įrenginių konstrukcijos pagrindą sudaro rotorius, kuris veikia kaip turbina bei ortakis su įmontuota sukimosi ašimi. Vėjo srautui pučiant į STV, pradeda sukis įrenginio rotorius ir taip panaudota vėjo energija leidžia padidinti pastato vėdinimo intensyvumą.

Vėjo varomi STV dažnai kombinuojami kartu su natūralia vėdinimo sistema sandėliuose, cechuose, pramoniniuose bei gyvenamuosiuose pastatuose. Tokiu būdu, padidinamas ištraukiamas oro srautas, kai sudėtinga užtikrinti reikiamą vėdinimo angų kiekį. Dale ir Ackerman atlikta galimybių studija parodė, kad pastatą su įprasta natūralia vėdinimo sistema papildžius STV, oro apykaitą pastate galima padidinti apie 15 % (Dale & Ackerman, 1993). Vertinant įvairias vėjo energiją naudojančių vėdinimo sistemų technologijas nustatyta, kad STV yra geriausias pasirinkimas įvertinus jų dydį, kainą bei vėdinimo veiksmingumą. Nors šių įrenginių projektavimas atrodo paprastas, oro srautų procesai turbininiame

ventiliatoriuje yra sudėtingi, todėl tam plačiai taikomi eksperimentiniai tyrimai (S. T. J. Lien & Ahmed, 2010).

Rinkoje egzistuoja hibridiniai tokio tipo įrenginiai. Šiuo atveju dažniausiai pasitaiko STV su papildomai įmontuotu oro ištraukimo ventiliatoriumi. Įprastai, tokie įrenginiai kompleksiskai veikia su saulės elementais. Generuojama elektros energija gali būti naudojama papildomame oro ištraukimo ventiliatoriuje, kartu veikiant su vėjo varomu STV. Taip pat, saulės elementų generuojama elektros energija gali būti kaupiama akumuliatoriuose (1.8 pav.). Sukaupta energija naudojama papildomam oro ištraukimo ventiliatoriui, kai vėjo energijos neužtenka palaikyti reikiamam ištraukiamajam oro srautui. Lai atliko tyrimus su 500 mm rotoriaus skersmens turbininiu ventiliatoriumi, kuriame buvo įmontuotas 400 mm skersmens saulės elementų energija varomas vidinis ventiliatorius (Lai, 2006).

1.8 pav. Hibridinio turbininio ventiliatoriaus prototipo schema (Lai, 2006)

Fig. 1.8. Scheme of a prototype of the hybrid rooftop turbine ventilator (Lai, 2006)

Eksperimentų metu nustatyta, jog vėjo greičiui neviršijant 5 m/s, tokios konfigūracijos įrenginys pastebimai padidina vėdinimo srautą. Tačiau esant dideliame vėjo greičiui, tokia konstrukcija blogina vėdinimo efektyvumą, lyginant su įprastos konstrukcijos STV.

Shun ir Ahmed taip pat sukūrė hibridinį turbininio ventiliatoriaus su saulės elementais prototipą, tačiau jų tyrimo tikslas buvo maksimaliai padidinti įrenginiu siurbiama oro srautą (Shun & Ahmed, 2008). Šiuo atveju buvo pasirinkta saulės elementais varoma ventiliatorių įrengti virš turbininio ventiliatoriaus rotoriaus. Išvados minima, kad toks įrenginys padidina siurbiama oro srautą, net ir esant silpnai saulės spinduliutei. Lyginant su įprastu turbininiu ventiliatoriumi, didžiausias tokio hibridinio įrenginio privalumas pasiekiamas esant mažam vėjo greičiui ir didelei saulės spinduliutei. Panašius tyrimus su hibridiniais turbininiais ventiliatoriais atliko Ismail ir Rahman (M. Ismail & Abdul Rahman, 2010).

Shinde et al. STV nagrinėjo kaip vėdinimo įrenginį ir vėjo jėgainę (Shinde et al., 2016). Autoriai teigia, kad tokio įrenginio veiksmingumas priklauso nuo natūralios traukos ir rotoriaus sūkių. Sumažinus vėdinimo intensyvumą, įrenginį galima naudoti kaip elektros generatorių. Tyrimo metu buvo naudojamas 300 mm skersmens STV, kuris pasiekus 300 apsisukimų per minutę sukimosi dažnį, generavo 10 V įtampą ir 0,06 A srovės stiprį.

Apžvelgiant mokslinę literatūrą pastebima, jog nagrinėjant STV, labai dažnai pasitelkiami įvairūs kiekybiniai ir kokybiniai metodai. Kiekybiniai metodai taikomi laboratorijose, atliekant eksperimentinius tyrimus vėjo tuneliuose, arba atliekami bandymai realiomis sąlygomis. Matyti, jog pastarieji tyrimai sudaro didžiąją dalį visų atliekamų tyrimų. Prie kiekybinių metodų taip pat galima priskirti vis labiau populiarėjančius skaičiuojamosios fluidų dinamikos tyrimus, kuriais siekiama įvertinti turbininių ventiliatorių siurbiamo oro debitą, įrenginius veikiančias aerodinamines jėgas. Kita vertus, tyrimuose pasitelkiant kokybinius metodus vizualizuojami oro srauto tekėjimo procesai, atliekamos įžvalgos įrenginių tobulinimui (Mazran Ismail & Abdul Rahman, 2012). Toliau esančiuose poskyriuose plačiau pristatoma šiuo metu atliktų STV eksperimentinių ir skaitinių tyrimų apžvalga.

1.2.1. Eksperimentiniai tyrimai

West atliko eksperimentinį turbininių ventiliatorių tyrimą vėjo tunelyje ir siekė išsiaiškinti įrenginio menčių aukščio įtaką siurbiamam oro debitui (West, 2001). Bandymų metu buvo naudojami trys 300 mm skersmens STV, kurių menčių aukščiai atitinkamai siekė 170 mm, 250 mm bei 340 mm. Tyrimo išvadose teigiama, kad naudojant 50 % aukštesnes turbininio ventiliatoriaus mentes – siurbiamas oro debitas padidėjo 13,5 %. Tyrėjai taip pat atkreipė dėmesį, jog toks sprendimas turi privalumą įrenginius montuojant ant šlaitinių stogų, nes įrenginio rotorius tampa labiau pasiekiamas vėjo srautui.

Lai atliko turbininių ventiliatorių tyrimus vėjo tunelyje, kuriame vėjo greitis siekė nuo 10 m/s iki 30 m/s (Lai, 2003). Siekdamas geriau suprasti įrenginio efektyvumą lemiančius veiksnius, Lai STV tyrė trimis skirtingais etapais. Pirmojo etapo metu atliktas STV tyrimas sustabdžius rotorį, rotoriumi sukantis laisva eiga bei visa tai palyginta be turbininio ventiliatoriaus (atviras oro ištraukimo ortakis). Antrojo etapo metu buvo atliktas tos pačios konstrukcijos, bet skirtingų dydžių įrenginių tyrimas. Trečiojo etapo metu, tyrimas atliktas modifikavus STV, įrengiant papildomas mentes rotoriaus viduje (1.9 pav.).

Atlikto tyrimo metu nustatyta, jog egzistuoja tiesioginė priklausomybė tarp STV dydžio bei ištraukiamo oro srauto. Esant didesniam įrenginiui – ištraukiamas didesnis oro srautas. Vertinant skirtumus tarp STV veikimo įprastu režimu ir sustabdyto rotoriaus nustatyta, kad bandytų vėjo greičių diapazone, rotoriaus

sukimasis padidina ištraukiamą oro srautą ne mažiau kaip 3 kartus. Palyginus su paprastu ištraukimo ortakiu – pastarasis sukuria ne daug didesnę trauką už sustabdytą rotorių.

1.9 pav. Stoginis turbininis ventiliatorius su vidinėmis mentėmis (Lai, 2003)

Fig. 1.9. Rooftop turbine ventilator with inner vanes (Lai, 2003)

Lai atliktas eksperimentas įprastame STV įrengiant vidines mentes parodė, kad toks sprendimas leidžia padidinti ištraukiamo oro srautą, tačiau šis pokytis yra minimalus. Tyrimo išvadose rašoma, kad svarbiausi kriterijai parenkant vidines mentes yra jų medžiagų savybės ir forma.

Siekiant geriau suprasti kokie oro tekėjimo procesai vyksta vėjo srautui susiduriant su STV, Lai papildomai atliko oro srautų vizualizacijos tyrimą žymėtomis dujomis (1.10 pav.). Šiuo bandymu pastebėta, jog vėjo srauto dalis, kuri teka išilgai rotoriaus sukimosi krypties, atlieka rotoriaus sukimą bei už jo suformuoja aerodinaminį pėdsaką (angl. *wake region*). Tuo tarpu vėjo srauto dalis, kuri teka prieš rotoriaus tekėjimo kryptį, stabdo įrenginio veikimą bei sudaro sąlygas oro srauto atitrūkimui. Vertindamas oro srauto tekėjimą rotoriuje, Lai teigia, kad oro siurbimo metu oro srautas yra susukamas trimis kryptimis.

Remiantis šiuo tyrimu teigiama, jog tokia vertikalios sukimosi ašies įrenginyje didesnis efektyvumas pasiekiamas esant mažesniai vėjo greičiui. Mokslininkų teigimu pučiant stipriam vėjui, didelė dalis oro srauto atitrūksta nuo menčių, todėl jį tai turėtų būti atkreiptas dėmesys optimizuojant įrenginio veikimą plačiame oro greičių diapazone.

1.10 pav. Stoginis turbininis ventiliatorius veikiamas vėjo srauto (Lai, 2003)

Fig. 1.10. Rooftop turbine ventilator exposed to wind flow (Lai, 2003)

Revel ir Huynh tyrė skirtingų STV ir atviro oro ištraukimo kanalo skersmenų poveikį oro siurbimo debitui (Revel & Huynh, 2007). Eksperimentinių bandymų metu nustatyta, jog STV su 300 mm skersmens oro siurbimo kanalu siurbia didesnę debitą nei su 250 mm skersmens kanalu. Kita vertus, šio tyrimo metu nustatyta, jog atviras oro ištraukimo kanalas siurbė didesnę debitą nei šiame tyrime pasirinkti turbininiai ventiliatoriai. Autoriai teigia, kad atviras oro ištraukimo kanalas turėtų būti taikomas kaip atskaita atliekant turbininių ventiliatorių tobulinimą.

Kito eksperimentinio tyrimo autoriai nagrinėjo skirtingų konstrukcijų STV charakteristikas (Khan, Su, Riffat, et al., 2008). Tyrimo autorių bandymų stendas sukonstruotas remiantis Australijos/Naujosios Zelandijos standartu (AS/NZS 4740:2000, 2000). Tiriamieji turbininiai ventiliatoriai buvo įrengti patalpos modelio viršuje, o vėjo srautas reguliuojamas kintamų apsisukimų ventiliatoriumi. Už ventiliatoriaus numatytas metalinis tinklelis, kurio paskirtis užtikrinti išlygintą vėjo srautą prieš analizuojamąjį STV (1.11 pav.). Vėjo greičio matavimams šiame stende naudojami trikampiai termoanemometrai, o bandymų metu vėjo greitis apskaičiuojamas pagal šių matavimų vidurkį. Slėgio skirtumo matavimams mokslininkai naudojo „Furness Controls FCO318“ jutiklius, o STV sukimosi dažniui – optinį tachometrą.

Bandymų stendo veikimas vyksta tokiu būdu: įjungus elektrinį ventiliatorių sukuriamas dirbtinis vėjo srautas, dėl kurio prasideda STV sukimasis. Sukdamasis STV pastato modelyje ištraukia orą, todėl jo viduje sukuria neigiamą slėgį. Siekiant tiksliai nustatyti šio įrenginio ištraukiamą oro srautą atliekamas slėgių pastato viduje ir išorėje sulyginimas, todėl slėgių kompensavimui naudojamas papildomas ventiliatorius. Pastaruoju įrenginiu pučiamas oras visų pirma patenka

į balansavimo kamerą, kuri būtina oro srauto išlyginimui, prieš jam pratekant į oro debito matavimo prietaisą. Šiuo atveju oro srautas matuojamas pagal slėgių skirtumą tarp skirtingų matavimo prietaiso pusių.

1.11 pav. Khan et al. tyrimų metu naudoto eksperimentinio stendo principinė schema (Khan, Su, Riffat, et al., 2008)

Fig. 1.11. Principal scheme of Khan et al. experimental stand setup (Khan, Su, Riffat, et al., 2008)

Tyrimų metu stende buvo bandomi keturi skirtingos konstrukcijos ir skersmenų STV: 300 mm skersmens STV su vertikalios ašies kryptimi tiesiomis mentėmis, 300 mm skersmens STV su vertikalios ašies kryptimi lenktomis mentėmis bei du 250 mm skersmens STV pagaminti iš polikarbonato. Vienas iš pastarųjų dviejų – skaidrus, praleidžiantis saulės spindulius ir tinkamas naudoti apšvietimui dienos metu.

Tarpusavyje palyginus STV su tiesiomis ir lenktomis mentėmis nustatyta, kad STV su lenktomis mentėmis pasiekia apie 25 % didesnę siurbiamo oro srautą. Pasak autorių esminiai faktoriai lemiančius šių įrenginių efektyvumą yra STV skersmuo, menčių aukštis bei jų konstrukcija.

Publikacijos autoriai papildomai pateikia eksperimentiškai nustatytą ištraukiamo oro srauto priklausomybę nuo sukimosi dažnio ir šią priklausomybę palygina su išcentrinų ventiliatorių teorijoje taikomais skaičiavimais. Tyrime teigiama, jog teorinių skaičiavimų ir eksperimentinio tyrimo rezultatų skirtumas neviršija 1,5 %. Kartu su įrenginių charakteristikų tarpusavio palyginimu, šiame straipsnyje taip pat pateikiamas palyginimas su elektriniu ventiliatoriumi bei kitais natūralaus vėdinimo technologiniais sprendimais.

Bay ir Phuong nagrinėjamo tyrimo metu buvo siekiama sukurti sąlygas, kuriomis būtų galima imituoti pastatą su jo viršuje įrengtu STV arba įprastu atviru oro ištraukimo kanalu (Bay & Phuong, 2012). Eksperimentinis tyrimų stendas

buvo sukonstruotas taip, kad oro srautas apipūstų tik bandinį (1.12 pav.). Siekiant modelį padaryti realesniu, jo viduje buvo įrengti papildomi šilumos šaltiniai. Toks būdas leido sukurti sąlygas, kuriomis imituojamas viryklių, kompiuterių ar kitų šilumos šaltinių poveikis šiuolaikiniuose pastatuose.

1.12 pav. Eksperimentinio stendo schema su įrengtais šilumos šaltiniais (Bay & Phuong, 2012)

Fig. 1.12. Experimental stand setup with installed heat sources (Bay & Phuong, 2012)

Imituojant vėdinamą pastatą, modelio konstrukcine medžiaga buvo pasirinktas medžio plokščių karkasas, vienos iš sienų apačioje padaryta anga oro įtekėjimui, o oro ištekėjimo anga palikta modelio viršuje. Oro srauto sudarymui bandymų metu naudotas elektrinis ventiliatorius. Siekiant išlyginti oro srautą prieš apipučiamus vėdinimo įrenginius, eksperimentiniame tyrimų stende numatytos metalinės grotelės. Šiuo atveju vėjo srauto greitis reguliuojamas keičiant ventiliatoriaus apsisukimų skaičių arba keičiant grotelių kiekį. Tokia eksperimentinio stendo konstrukcija bandymuose leido sukurti iki 3,6 m/s vėjo greitį. Tuo tarpu įrenginio viduje įrengti šilumos šaltiniai sukurdavo 3 kW šilumos srautą, o temperatūros viduje ir išorėje skirtumas siekdavo iki 15 °C.

Vienas pagrindinių šio tyrimo metu siekiamų nustatyti rodiklių – iš pastato modelio ištraukiamo oro greitis. Autorių teigimu, oro ištraukimo greitis priklauso nuo dviejų dedamųjų: vėjo greičio ir dėl temperatūrų skirtumo susidarancio oro judėjimo greičio. Siekiant geriau suprasti minėtojo rodiklio kitimo priklausomybę, autoriai rezultatų interpretavimui taiko bedimensinius dydžius. Bedimensinis dydis įvertinantis vėjo ir šilumos poveikį ištraukimo greičiui apskaičiuojamas pagal šią lygtį:

$$v^* = \frac{v_e}{(u + v_b)}, \quad (1.1)$$

čia: v^* – bedimensinis greitis; v_e – oro ištraukimo greitis vėdinimo kanale, m/s; u – vėjo srauto greitis, m/s; v_b – oro srauto greitis susidarantis dėl temperatūrų skirtumo tarp aplinkos ir modelio viduje esančio oro, m/s. Šis dydis teoriškai apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$v_b = \sqrt{\frac{\Delta T g h}{T}}, \quad (1.2)$$

čia: h – įtekėjimo ir išteklėjimo angų aukščių skirtumas, m; T , ΔT – aplinkos oro temperatūra ir įtekančio į modelį ir ištekančio iš modelio oro srautų temperatūrų skirtumas, K.

Tyrimų metu nustatyta, kad dominuojant gravitacijos jėgoms, didžiausia ištraukiamo oro trauka susidaro įprastame atviraime ortakyje. Kita vertus, dominuojant vėjo sukuriamoms traukos jėgoms – geresni rezultatai pasiekiami turbininiais ventiliatoriais.

Rashid atliko STV tyrimus Australijos New South Wales universiteto Aerodinamikos laboratorijoje, kurioje įrenginys buvo bandomas 5–25 m/s vėjo greičių diapazone, o Reinoldso skaičius atitinkamai siekė $1,1 \cdot 10^5$ – $5,5 \cdot 10^5$ (Rashid & Ahmed, 2003). Šis tyrimas išsiskyrė iš kitų tuo, jog buvo matuojamos turbininius ventiliatorius veikiančios aerodinaminės jėgos x , y , z ašių kryptimis. Norėdami nustatyti turbininį ventiliatorių veikiančias jėgas mokslininkai naudojo daugiakryptį jėgos matavimo prietaisą „ATI Analog Force/Torque (F/T) Transducer“. Atlikdami šį mokslinį tyrimą autoriai pasirinko tokias penkias bandymų konfigūracijas:

1. Nuo turbininio ventiliatoriaus nuimamas rotorius. Tokiu būdu įrenginys tapo panašus į atvirą vėdinimo kanalą.
2. Rotorius uždėtas atgal, tačiau sudarant vėjo srautą, STV neleidžiama suktis, užblokuojant jo sukimosi ašį.
3. Rotoriui neleidžiama suktis bei užsandarinamos mentės.
4. STV mentės atidengiamos ir vėjo sraute įrenginys veikia įprastu režimu.
5. STV leidžiama suktis oro sraute, bet vėl uždengiamos mentės.

Matavimo duomenų analizei autoriai naudoja aerodinaminės jėgos koeficientus C_x , C_y , C_z . Šiuo atveju analizuojamas kiekvieno iš šių dydžių kitimas nuo Reinoldso skaičiaus.

1.13 pav. Turbininį ventiliatorių veikiančios aerodinaminės jėgos koeficiento C_x kitimas nuo Re skaičiaus (Rashid & Ahmed, 2003)

Fig. 1.13. Variation of the aerodynamic force coefficient C_x acting on the turbine ventilator versus Re number (Rashid & Ahmed, 2003)

Eksperimentinio tyrimo rezultatai parodė, jog esant mažiems Reinoldso skaičiams (nedidelis vėjo greitis) pasiekiami maži C_x koeficientai (1.13 pav.), o C_y koeficientai būna dideli. Tai rodo, jog bandytasis turbininis ventiliatorius buvo efektyvesnis esant mažiems vėjo greičiams. Vertindami C_z koeficiento kitimą autoriai pastebėjo, jog šis kyla didėjant vėjo greičiui, todėl esant dideliems vėjo greičiams įrenginys gali būti sugadintas. Mokslininkai atkreipė dėmesį, jog tobulinant šiuos įrenginius, reikėtų siekti sumažinti C_y koeficientų augimą didėjant vėjo greičiui.

1.2.2. Skaitiniai tyrimai

Plėtojant stoginių turbininių ventiliatorių tyrimus vis dažniau pasitelkiami skaitiniai tyrimai. Tai leidžia paspartinti tyrimus sumažinant eksperimentinių tyrimų poreikį laboratorijose (Farahani et al., 2010; S. T. J. Lien & Ahmed, 2010). Vienas iš dažniausiai pasitaikančių skaitinių tyrimų būdų – skaičiuojamoji fluidų dinamika (SFD). Kadangi STV veikimo metu susidaro oro turbulencija, uždaviniai tampa netiesiniai ir jų sprendimas tampa sudėtingas. Įprastai modeliai sprendžiami pasitelkiant Navje-Stokso lygčių sistemas, įtekėjimo ir ištekėjimo angose nurodomi pradiniai greičiai, slėgiai, fluidų savybės ir kita.

Havens analizavo STV kaip išcentrinį ventiliatorių su atgal lenktomis mentėmis ir tuo pačiu veikiančią kaip vėjo jėgainę (Havens, 2004). Šiuo atveju tam buvo pasirinktas skaitinis tyrimas su nesudėtingu matematiniu modeliu. Tyrimo metu buvo norima nustatyti koreliaciją tarp STV sukimosi dažnio, pučiamo vėjo greičio bei siurbiamo oro srauto. Atliktoje studijoje teigiama, kad ši koreliacija

priklauso nuo įrenginio galios ir sukimo momentų koeficientų. Autoriaus teigimu, turint šiuos koeficientus, vėjo greitį ir sistemos charakteristikos kreivę, teoriškai, STV ištraukiamas oro debitas gali būti nustatomas tiksliai. Visgi, tokiam matematiniam modeliui reikalingi eksperimentiniai galios ir sukimo momento duomenys šiame tyrime nebuvo pateikti ir mokslinėje literatūroje tokių tyrimų beveik nėra (Mazran Ismail & Abdul Rahman, 2012). Galimai, tam galėtų būti pritaikyti tik 2003 m. Rashid ir Ahmed atlikto eksperimento duomenys (Rashid & Ahmed, 2003).

Farahani et al. atliko oro srautų modeliavimą naudodami „Fluent“ programinę įrangą (Farahani et al., 2010). Taikant šią SFD modeliavimo priemonę buvo siekiama vizualizuoti oro srautus aplink STV ir jo viduje (1.14 pav.). Šiuo tyrimu taip pat buvo norima nustatyti aerodinaminių jėgų poveikį įrenginio veikimo metu. Modeliavimo metu pasirinkti „ $k-\epsilon$ “ ir Reinoldso įtempimų turbulenciniai modeliai.

1.14 pav. Skaičiuojamosios fluidų dinamikos modelio geometrija ir kraštinės sąlygos (Farahani et al., 2010)

Fig. 1.14. Geometry and specified domains of computational fluid dynamics model (Farahani et al., 2010)

Tyrimo išvadose rašoma, kad „ $k-\epsilon$ “ turbulencinis modelis leidžia pasiekti greitesnius rezultatus, tačiau lyginant su Reinoldso įtempimų turbulenciniu modeliu yra mažiau tikslus.

Lien ir Ahmed taikydami skaičiuojamųjų fluidų dinamikos metodus siekė nustatyti oro srautų elgseną STV rotorijoje (S. T. J. Lien & Ahmed, 2010). Atliktas skaitinis modeliavimas ir rezultatų pateikimas oro srautų vektoriais padėjo geriau suprasti vėjo ir siurbiamo oro srautų sąveiką trimatėje erdvėje (1.15 pav.).

1.15 pav. Trimatė oro srautų vizualizacija (S. T. J. Lien & Ahmed, 2010)

Fig. 1.15. Three dimensional path line of the flow (S. T. J. Lien & Ahmed, 2010)

Analizuojant modeliavimo rezultatus pastebėta, jog ištraukiamas oro srautas bei į rotorius patekęs vėjo srautas sukuriama kyla aukštyn ir susimaišo su antriniu, įrenginį aptekėjusiu srautu. Plėtodami šį tyrimą, autoriai atliko tyrimus keisdami turbininio ventiliatoriaus menčių aukščius atitinkamai į 98 mm, 147 mm ir 196 mm. Modeliavimo rezultatais nustatyta, kad menčių aukštį padidinus 50 % ir 100 % – ištraukiamo oro srautas atitinkamai padidėja 15 % ir 25 %.

Lien ir Ahmed atlikdami eksperimentinį tyrimą bei taikydami kompiuterinį modeliavimą siekė nustatyti stogo šlaito poveikį STV veiksmingumui (S. T. J. Lien & Ahmed, 2011). Modeliavimo rezultatai parodė, kad esant mažam vėjo greičiui, stogo šlaito nuolydis turi mažą poveikį STV veikimui. Tačiau esant dideliems vėjo greičiams, didėjantis stogo šlaito nuolydis mažina STV veikiančią vėjo srauto jėgą ir dėl šios priežasties ženkliai sumažėja rotorius sukimosi dažnis. Teigiama, jog didėjant stogo šlaito nuolydžiui, padidėja vėjo srauto trintis ir dėl to sumažėja STV pasiekianti jėga.

Tarp skaitinių tyrimų verta paminėti termodinaminius modelius, kurie sudaromi ežektorių srautinių procesų tyrimams. Kaip bus vėliau pristatyta, šio darbo kontekste, ežektorius įvardijamas kaip viena iš turbininio ventiliatoriaus sudedamųjų dalių. Nevertinant taikymo srities, ežektorių matematiniai ir termodinaminiai modeliai yra gana universalūs. Daugumoje publikacijų teigiama, kad pirmasis ežektoriaus teorinis modelis buvo pristatytas Keenan and Neumann moksliniuose darbuose (Keenan, J. H., Neumann, 1942; Keenan J, Neumann E, 1950). Tai vienmačio srauto modelis, kurio pagrindą sudaro masės, linijinio momento ir energijos tvermės dėsnių lygtys.

Daugeliu atveju tokiuose modeliuose ežektoriaus oro srautai nagrinėjami kaip vienmačiai ir laike nekintantys. Taip pat, siekiant modelį padaryti paprastesniu, dažnu atveju priimamos adiabatinės sąlygos. Dėl skirtingų srautų

trinties ir ne idealaus maišymosi sąlygų, susidaro izoentropinės sąlygos, kurios tokiuose modeliuose vertinamos taikant izoentropinius efektyvumo koeficientus (Antonio et al., 2012; Liu, J., Wang, L., Jia, L., Wang, 2018; Šarevski & Šarevski, 2012). Įprastai, nagrinėjant ežektorius šie koeficientai taikomi atskiroms įrenginio dalims: aktyvaus srauto tūtai, maišymo kamerai bei difuzoriui. Dalis tyrėjų, analizuodami procesus tokiuose įrenginiuose pateikia $T-s$ arba $h-s$ tipo (1.16 pav.) termodinamines diagramas (He et al., 2009; Sarevski, V.N., Sarevski, 2014; Šarevski & Šarevski, 2012).

1.16 pav. Ežektoriaus termodinaminis modelis $h-s$ diagramoje (Šarevski & Šarevski, 2012)

Fig. 1.16. Thermodynamic model of ejector in $h-s$ diagram (Šarevski & Šarevski, 2012)

Taikant tokio tipo diagramas nagrinėjami ne tik ežektoriuose vykstantys srautiniai procesai. Dažnu atveju tuo pačiu sprendžiami efektyvumo klausimai įvairiose ežektorių pritaikymo sistemose (F. Liu, 2014).

1.3. Stoginių turbininių ventiliatorių tyrimų suvestinė

Apžvelgus su stoginiais turbininiais ventiliatoriaus susijusius ankstesnius mokslinius tyrimus, juos galima sugrupuoti į atskiras kategorijas. Šiuo atveju moksliniai tyrimai grupuojami atsižvelgiant į jų tipą bei autorius. Sugrupuota apžvelgtų mokslinių tyrimų suvestinė pateikiama toliau esančioje 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Stoginių turbininių ventiliatorių tyrimų suvestinė

Table 1.1. Summary of rooftop turbine ventilators research

Mokslinių tyrimų tipas	Šaltiniai
STV ištraukiamo oro srauto kitimo priklausomybės nuo vėjo greičio	(Bay & Phuong, 2012; Dale & Ackerman, 1993; Khan, Su, Riffat, et al., 2008; Lai, 2003; Ravel, 1998; West, 2001)
Ištraukiamo oro srauto kitimo priklausomybė nuo vėjo krypties	(Dale & Ackerman, 1993)
Skirtingo dydžio STV charakteristikos	(Khan, Su, Riffat, et al., 2008; Lai, 2003; Revel & Huynh, 2007; West, 2001)
STV oro įtekėjimo angos skerspjuvio ploto įtaka	(Revel & Huynh, 2007)
STV menčių aukščio įtaka	(West, 2001)
STV su papildomu elektriniu ventiliatoriumi	(M. Ismail & Abdul Rahman, 2010; Lai, 2006; Shun & Ahmed, 2008)
STV su papildomu vidiniu ventiliatoriumi	(Lai, 2003)
STV su skirtingomis mentėmis	(Khan, Su, Riffat, et al., 2008)
Stogo nuolydžio įtaka STV veikimui	(S. T. J. Lien & Ahmed, 2011)
Modifikuotas STV galintis gaminti elektrą	(Shinde et al., 2016)
STV veikiančios aerodinaminės jėgos	(Farahani et al., 2010; Rashid & Ahmed, 2003)
Skaitinių tyrimų taikymas apskaičiuojant STV ištraukiamą oro srautą	(Farahani et al., 2010; Havens, 2004; S. T. J. Lien & Ahmed, 2010, 2011)
SFD metodo taikymas su skirtingais turbulencijos modeliais	(Farahani et al., 2010)

1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Apžvelgus vėjo energiją naudojančias natūralaus vėdinimo sistemas bei STV mokslinius tyrimus paaiškėjo:

1. Dažnais atvejais, tiriant vėjo energiją naudojančius stoginius turbininius ventiliatorius, eksperimentiškai nustatomos ištraukiamo oro charakteristikos, tačiau trūksta tyrimų, kuriuose būtų nagrinėjama oro srautų sąveika ir energijos transformavimo procesai įrenginio veikimo metu.
2. Trūksta tyrimų, kuriuose būtų eksperimentiškai nustatytos turbininių ventiliatorių aerodinaminės, mechaninės charakteristikos, analizuojamas įrenginių efektyvumas ir funkcionalumas hibridinėje vėdinimo sistemoje.
3. Didelėje dalyje tyrimų turbininiai ventiliatoriai analizuojami taikant skaitinius metodus, tačiau tokių įrenginių veikimas nėra aprašytas teoriniais modeliais.
4. Nepakankamai vertinamas turbininių ventiliatorių vėjo energijos akumuliacinio ir funkcionalumo padidinimo potencialas hibridinėse vėdinimo sistemose.

Apžvelgus tyrimus nustatyta, kad tikslinga atlikti eksperimentinius tyrimus, kuriais galima parengti turbininio ventiliatoriaus oro srautų sąveikos termodinaminį modelį bei įvertinti šio įrenginio vėjo energijos akumuliacinio potencialą. Tam reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Parengti ir įvykdyti vėjo energiją naudojančių STV eksperimentinių tyrimų programą, kuria struktūrizuojami hibridinės vėdinimo sistemos veikimo režimai bei nustatomos STV mechaninės ir aerodinaminės charakteristikos.
2. Kiekybiškai ir kokybiškai palyginti skirtingų STV eksperimentines sukimo momentų, dažnių, galių ir oro srautų charakteristikas, nustatyti jų empirines lygtis ir palyginti su teorinėmis lygtimis.
3. Atsižvelgiant į eksperimentinių tyrimų rezultatus, pasiūlyti STV konstrukciją ir tekėjimo procesus jame atspindinčią struktūrinio suskaidymo koncepciją, kuri būtų palanki procesų termodinaminio modelio formavimui.
4. Parengti pasirinktų STV komponentų integruojantį veikimo termodinaminį modelį ir jį pagrįstai susieti su eksperimentinių tyrimų rezultatais.
5. Įvertinti galimybes padidinti vėjo energijos panaudojimo efektyvumą STV, esant stochastiniam vėjo kitimui metų cikle.

Turbininių ventiliatorių mechaniniai ir aerodinaminiai tyrimai

Šiame skyriuje pateikta vėjo energiją naudojančių turbininių ventiliatorių eksperimentinių tyrimų programa, metodika bei tyrimų rezultatai. Šių tyrimų metu kiekybiškai palyginamos skirtingų vėjo energija naudojančių ventiliatorių ištraukiamo oro charakteristikos, esant skirtingoms vėjo greičio ir aplinkos statinio slėgio sąlygoms. Be to, analizuojant turbininius ventiliatorius, atliekami generuojamos galios bandymai bei tokių įrenginių aerodinaminių charakteristikų tyrimai. Eksperimentiniai tyrimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto ir Portugalijos Nacionalinėje civilinės inžinerijos laboratorijose, atsižvelgiant į tarptautinius bandymo standartus ir mokslinėje literatūroje randamus metodus.

Skyriaus tematika paskelbtos keturios publikacijos (Rimdžius et al., 2018; Rimdžius & Bielskus, 2018; Streckienė et al., 2018; Sketerskis et al., 2018).

2.1. Eksperimentinių tyrimų programa ir bandomi įrenginiai

Ankstesnių mokslinių tyrimų apžvalga rodo, jog trūksta tyrimų apie turbininiuose ventiliatoriuose vykstančius srautinius procesus bei nėra šiuos reiškinius vienijančio teorinio aprašo. STV veikimo metu įrenginys yra veikiamas vėjo

srauto, ištraukiamo oro srauto, vyksta šių srautų maišymosi procesai, sukasi įrenginio rotorius, veikia įvairios aerodinaminės jėgos bei vyksta kiti reiškiniai. Ši kompleksinė reiškinių visuma yra sudėtinga, todėl atskirų procesų poveikis negali būti aprašomas žinant tik pradinės vėjo srauto ir vėdinamos patalpos sąlygas. Šiuo atveju norint parengti turbininio ventiliatoriaus termodinaminį modelį, prieš tai reikalinga atskleisti atskirus STV veikiančius procesus. Šiame darbe tam pasitelkiami eksperimentiniai tyrimai, kurių metu palaipsniui eliminuojami tam tikri įprastinio veikimo faktoriai. Siekiant atskleisti ir eksperimentiškai patikrinti įvairialypę oro srautų sąveiką vėjo energiją naudojančiuose stoginiuose turbininiuose ventiliatoriuose – parengta speciali eksperimentinių tyrimų programa. Šios eksperimentinių tyrimų programos rezultatai toliau taikomi analizuojant atskirų srautinių procesų sąveikinius ryšius bei pagal tai formuojamas įrenginio veikimo termodinaminis modelis.

Eksperimentų metu atliekami mechaninių ir aerodinaminių charakteristikų matavimai, nustatoma skirtingų oro srautų įtaka veiksmingumui, efektyvumui ir funkcionalumui. Detaliems mechaninių, aerodinaminių ir hibridinės vėdinimo sistemos veikimo režimus imituojančiam tyrimui pasirinkti STV bandymai septyniais skirtingais veikimo režimais, o bandymo sąlygos keičiamos penkiais etapais. Siekiant atlikti kiekybinius ir kokybinius palyginimus, tyrimo metu bandomi trys skirtingi turbininiai ventiliatoriai, deflektorius ir atviras oro ištraukimo ortakis.

Pirmajam tyrimui pasirinktas bandymas naudojant tik atvirą oro ištraukimo ortakį. Šio bandymo tikslas nustatyti ištraukiamo oro srauto kitimą be STV bei šiuos rodiklius palyginti su kitais bandymais. Bandymo metu reguliuojamas vėjo greitis ir statinis slėgis vėdinamoje patalpoje. Antrojo tyrimu metu ant oro ištraukimo ortakio uždedamas STV ir jis tiriamas įprastinėmis veikimo sąlygomis. Bandymo sąlygos keičiamos analogiškai pirmajam bandymui. Trečiojo bandymo tikslas – sudaryti sąlygas vėjo srauto įsiurbimui į vėdinamą erdvę ir nustatyti įrenginių charakteristikas tokio veikimo režimo metu. Ketvirtojo bandymo metu bandytiems įrenginiams uždaromas oro siurbimo kanalas. Tyrimu siekiama nustatyti oro siurbimo rodiklį C_p ir ištraukiamo oro srauto poveikį įrenginio rotoriumi. Penktasis bandymas atliekamas sustabdžius STV rotorių. Tyrimo tikslas – įvertinti STV ištraukiamo srauto poveikį dėl rotoriaus sukimosi ir nustatyti maksimalų įrenginio sukuriamą sukimo momentą. Šeštojo bandymo apkraunamas STV rotorius bei siekiama nustatyti jo generuojamą galią ir poveikį ištraukiamo oro srautui. Septintasis bandymas atliekamas STV rotorių sukančiam elektriniu varikliu ir nepučiant vėjo srautui. Šiuo bandymu norima nustatyti STV rotoriaus veiksmingumą, veikiant įprasto ventiliatoriaus režimu.

Priklausomai nuo tiriamo STV veikimo režimo, bandymo sąlygos keičiamos reguliuojant vėjo srauto greitį, išjungiant vėjo srautą, uždarant oro siurbimo kanalą, reguliuojant statinį slėgį vėdinamoje patalpoje ar sukimo momento

matavimo prietaisų reguliuojant rotoriaus apkrovimą.

Pasirinkta eksperimentinių tyrimų programa leidžia eliminuoti atskirus STV realaus veikimo vykstančius procesus ar komponentus. Tokiu būdu gautais rezultatais galima kiekybiškai įvertinti atskirų procesų įtaką STV veikimui, analizuoti įrenginių tobulinimo galimybes. 2.1 lentelėje pateikiama eksperimentinių tyrimų programos suvestinė.

2.1 lentelė. Eksperimentinių tyrimų programos suvestinė

Table 2.1. Summary of the experimental research programme

Bandymo sąlygos	STV veikimo režimas						
	Be STV	Iprastas STV veikimas	Vėjo srauto išsiurbimas į vėdinamą patalpą	Uždarytas oro siurbimo kanalas	Sustabdytas STV rotorius	STV rotoriaus apkrovimas	STV rotoriaus sukimas elektriniu varikliu
1	2	3	4	5	6	7	8
Be vėjo srauto							+
Vėjo srauto greičio reguliavimas	+	+	+	+	+	+	
Uždarytas STV oro siurbimo kanalas				+			
Statinio slėgio reguliavimas vėdinamoje patalpoje	+	+	+		+	+	
STV rotoriaus apkrovos reguliavimas						+	
Matuojami rodikliai							
Ištraukiamas oro srautas $\dot{Q}_e$, m ³ /h	+	+	+		+	+	+
STV rotoriaus sukimosi dažnis ω , RPM		+	+	+		+	+
Vėjo srauto greitis u , m/s	+	+	+	+	+	+	

2.1 lentelės pabaiga

1	2	3	4	5	6	7	8
Statinis slėgis vėdinamoje patalpoje P_{sc} , Pa	+	+	+		+	+	+
Statinis slėgis vėjo tunelyje P_{sw} , Pa	+	+	+	+	+	+	
STV rotoriaus sukimo momentas τ , Nm					+	+	
Aerodinaminė STV traukos jėga F_d , N		+			+		

Lentelės matuojamų rodiklių sekcijoje matoma, jog šių tyrimų metu, priklausomai nuo bandymo tikslo, matuojami STV ištraukiamo oro srautai, STV rotorių sukimosi dažniai ir sukimo momentai, vėjo srauto greitis, statinis slėgis vėdinamoje patalpoje, statinis slėgis vėjo tunelyje bei STV veikianti aerodinaminė traukos jėga.

Tyrimų metu bandomi trys skirtingos konstrukcijos, tačiau vienodo veikimo principo turbininiai ventiliatoriai. Dviejų iš jų rotoriaus konstrukciją sudaro vertikaliaios ašies kryptimi lenktos mentės, o trečiojo įrenginio rotoriaus mentės vertikaliai tiesios. Įrenginių palyginimui papildomai buvo bandomas ir stoginis deflektorius. 2.1 paveiksle pateikiamos bandomų įrenginių nuotraukos, žymėjimai ir pagrindiniai matmenys.

Žymėjimas: STV1 Tipas: turbininis Matmenys: $h = 190$; $w = 190$; $d_i = 128$	Žymėjimas: STV2 Tipas: turbininis Matmenys: $h = 275$; $w = 245$; $d_i = 118$	Žymėjimas: STV3 Tipas: turbininis Matmenys: $h = 234$; $w = 240$; $d_i = 150$	Žymėjimas: D1 Tipas: statinis Matmenys: $h = 142$; $w = 255$; $d_i = 118$

2.1 pav. Bandomų įrenginių nuotraukos, žymėjimai ir pagrindiniai matmenys**Fig. 2.1.** Pictures of test devices, labels, and key dimensions

Žymėjimai 2.1 paveiksle: h – įrenginio aukštis, mm; w – įrenginio plotis, mm; d_i – ištraukiamo oro įtekėjimo angos skersmuo, mm. Bandymų metu, kartu su šiais

įrenginiais naudojami atviri oro ištraukimo ortakiai, kurių dydis parenkamas pagal bandomų įrenginių oro siurbimo angos skersmenį.

2.2. Eksperimentinių tyrimų metodika

Eksperimentinių tyrimų metodikos dalyje pristatomi tyrimo metu naudoti eksperimentiniai standai, matavimo metodai ir tyrimuose naudota matavimo įranga. Taip pat, šiame skyriuje pateikiama įrenginių charakteristikų skaičiavimo metodika ir šių tyrimų neapibrėžties vertinimas.

2.2.1. Eksperimentinių tyrimų standai

Eksperimentiniai tyrimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto laboratorijoje ir Portugalijos Nacionalinėje civilinės inžinerijos laboratorijoje. Tyrimai atlikti laboratorijų vėjo tuneliuose, o bandymų standai įrengti atsižvelgiant į tarptautinius STV bandymo standartus „EN 13141-5“ (EN 13141-5, 2004), „AS/NZS 4740:2000“ (AS/NZS 4740:2000, 2000) bei remiamasi mokslinėse publikacijose (Khan, Su, Riffat, et al., 2008; Lai, 2003) pateiktų eksperimentinių tyrimų idėjomis.

Šiuo atveju bandymams naudoti trijų skirtingų tipų standai. Pirmasis bandymų standas skirtas ištraukiamo oro srautų ir įrenginių generuojamos galios matavimui (2.2 pav.). Bandymams naudojamas modifikuotos konstrukcijos atviras vėjo tunelis su specialia, vėdinamą patalpą imituojančia kamera. Bandomasis STV įmontuojamas vėjo tunelyje bei ortakiu prijungiamas prie vėdinamą patalpą imituojančios kameros. Eksperimentų metu vėdinamą patalpą imituojančioje kameroje reikiamas slėgis palaikomas atskiru prijungtu reguliuojamos galios ventiliatoriumi.

Bandomasis turbininis ventiliatorius ortakiu prijungiamas prie oro srauto stabilizavimo kameros, kurios paskirtis imituoti vėdinamą patalpą ir palaikyti bandymui reikiamą statinį slėgio skirtumą tarp vidaus ir išorės. Slėgio matavimo taškai įrengti oro srauto stabilizavimo kameros sienelių vidinėje pusėje bei eksperimentinio tyrimų stendo viduje, kartu su „Pitot“ vamzdeliu. Siekiant padidinti matavimo tikslumą, oro srauto stabilizavimo kameroje įrengti matavimo taškai sujungti pjezometrinio žiedo principu.

Bandymų metu, skirtingų vėjo greičių užtikrinimui naudojami reguliuojamos galios vėjo tunelio ventiliatoriai. Dėl ribotos bandymų stendo ventiliatorių galios ir reguliavimo režimų, eksperimentų metu vėjo greičiai reguliuojami trimis pakopomis: 2,7 m/s, 5,6 m/s ir 9,2 m/s. Vėjo greičio matavimams naudojamas „Pitot“ vamzdelis.

2.2 pav. Nacionalinės civilinės inžinerijos laboratorijos eksperimentinių tyrimų stendas:
 a) stendo schema; b) bandomasis įrenginys vėjo tunelyje; c) bandymų stendo
 komponentai; d) vėjo tunelio ventiliatoriai

Fig. 2.2. Experimental stand of National Laboratory for Civil Engineering: a) stand
 scheme; b) test device inside a wind tunnel; c) components of experimental stand;
 d) ventilators of wind tunnel

Žymėjimai 2.2 paveiksle: 1 – bandymų laboratorijos patalpa; 2 – atviro tipo vėjo tunelis; 3 – oro srauto stabilizavimo kamera; 4 – statinį slėgį vėdinamoje patalpoje reguliuojantis ventiliatorius; 5 – oro srauto stabilizavimo tinklas; 6 – ištraukiamo oro srauto matavimo prietaisai; 7 – oro ištraukimo ortakis; 8 – bandomasis įrenginys; 9 – „Pitot“ vamzdelis pučiamo oro srauto greičiui matuoti; 10 – vėjo tunelio ventiliatoriai.

Siurbiamam oro srautui matuoti tyrimų stende įrengta „Venturi“ tipo tūta, kuri prijungta tarp vėjo tunelyje įrengto ortakio ir oro srauto stabilizavimo kameros. Pastaroji kamera yra prijungta prie reguliuojamo greičio ventiliatoriaus, kurio paskirtis kompensuoti slėgio nuostolius iki įtekėjimo į bandomo įrengimo pajungimo angą bei palaikyti reikiamą slėgį vėdinamą patalpą imituojančioje kameroje. Kitas svarbus rodiklis yra STV rotorius sukimosi dažnis (*angl.* RPM). Bandymų metu, turbininių ventiliatorių sukimosi dažnio matavimai atliekami optiniu tachometru „Extech RPM33“.

Antrasis bandymų stendas įrengtas Vilnius Tech laboratorijoje. Šio stendo konstrukciniai sprendimai panašūs į anksčiau minėtą NCIL tyrimu stendą, tačiau jame papildomai įrengtas reguliuojamo greičio elektrinis variklis, kuris skirtas turbininio ventiliatoriaus rotorius sukimui. Siekiant papildomu energijos šaltiniu sukurti bandomojo įrenginio sukimą, elektrinio variklio ašis metaliniu strypu sujungta su turbininio ventiliatoriaus rotorius viršutine dalimi. Šiuo atveju elektrinio variklio sukimosi dažnis reguliuojamas naudojant atvirojo kodo „Arduino“ valdiklį, kuriuo keičiami greičio regulatoriaus parametrai. 2.3 paveiksle pateikiama Vilnius Tech eksperimentinio tyrimų stendo schema ir nuotraukos.

2.3 pav. Vilnius Tech eksperimentinio stendo nuotraukos: a) pagrindiniai komponentai ir bandomasis įrenginys; b) greičio valdiklis ir reguliuojamas galios variklis

Fig. 2.3. Pictures of Vilnius Tech experimental stand: a) main components and test device; b) speed controller and adjustable power motor

Žymėjimai 2.3 paveiksle: 1 – Vilnius Tech laboratorijos atviro tipo vėjo tunelis; 2 – oro srauto stabilizavimo kamera; 3 – oro debito matavimo prietaisai;

4 – statinio slėgio reguliavimo kamera; 5 – „Arduino“ valdiklis ir greičio reguliatorius; 6 – reguliuojamos galios variklis; 7 – bandomasis įrenginys.

Trečiasis bandymų stendas skirtas įrenginių aerodinaminių charakteristikų matavimui (2.4 pav.). Aerodinaminių jėgų matavimai buvo atlikti specialios konstrukcijos ortodinamometru (Freitas et al., 2014), kuris buvo įrengtas po NCIL laboratorijos vėjo tuneliu. Ortodinamometras sudarytas iš metalinio lygiagretainio su dviem elastiniais mazgais apačioje ir dviem mazgais viršuje, kartu su specialiais laikikliais bandomiesiems modeliams. Bandymų metu turbininiai ventiliatoriai yra veikiami vėjo jėgų, kurių aerodinaminės traukos jėgos yra tiesiogiai perduodamos sujungtai viršutinei ortodinamometro profilio daliai.

2.4 pav. Aerodinaminių charakteristikų matavimo stendas: a) stendo schema;

b) ortodinamometro nuotrauka; c) bandomojo įrenginio nuotrauka

Fig. 2.4. Aerodynamic characteristics measurement stand setup: a) stand scheme;

b) picture of orthodynamic meter; c) picture of test device

Žymėjimai 2.4 paveiksle: 1 – reguliuojamo standumo mazgas; 2 – mazgas su nedideliu kampiniu standumu veikiant sukimo jėgoms apie skersinę ašį; 3, 4 – mazgai su nedideliu kampiniu standumu veikiant sukimo jėgoms išilginėse ir skersinėse ašyse; 5 – pirmasis statramstis; 6 – antrasis statramstis; 7 – ortodinamometro viršutinis profilis su bandinio fiksatoriumi; 8 – ortodinamometro pagrindas; 9 – atraminis LVDT jutiklio profilis; 10 – išilginis LVDT jutiklis; 11 – skersinis LVDT jutiklis; 12 – „Invar“ tipo laidas; 13 – vėjo tunelis; 14 – oro ištraukimo ortakis; 15 – bandomasis įrenginys; 16 – „Pitot“ vamzdelis vėjo greičio matavimui.

Tokio ortodinamometro konstrukcija leidžia kartu matuoti išilgines ir skersines aerodinaminių jėgų apkrovas. Išilginės aerodinaminės jėgos deformuoja lygiagretainį jo paties plokštumoje. Tuo tarpu skersinės aerodinaminės jėgos visą lygiagretainį lenkia iš jo pradinės padėties. Abu šie deformaciniai poslinkiai yra proporcingi aerodinaminėms jėgoms, kurios veikia turbininį ventiliatorių ir kartu montuojamą ištraukimo kanalą.

Visi lygiagretainio mazgai deformuojasi elastiškai, tačiau pagrindinis jų skirtumas yra kampinis standumas aplink tris ašis. 1 ir 2 mazgai, sutvirtinantys pagrindinę lygiagretainio kraštinę, yra pagaminti iš plieninės spyruoklės. 3 ir 4 mazgai pagaminti iš plieno lakštų ir pasižymi nedideliu kampiniu standumu veikiant sukimo jėgoms apie skersinę ašį. Priklausomai nuo bandymų sąlygų, 4 mazgo standumas gali būti reguliuojamas.

Bandymų metu deformacijų poslinkiai yra matuojami dviem „LVDT“ jutikliais, kurių parodymai yra tiesiogiai proporcingi aerodinaminės jėgoms. Šiuo atveju naudojami du „LVDT“ jutikliai „Solartron DF2.5“, kurių matavimo diapazonas siekia iki 5 mm. Išilginės jėgos matavimams skirtas „LVDT“ jutiklis įrengtas ant atraminio profilio, kuris sujungtas su ortodinamometro pagrindu ir neturi jokio poveikio deformuojantis lygiagretainiui. Skersinių jėgų „LVDT“ jutiklis įrengtas ant pirminio statramsčio. Ortodinamometro konstrukcinis pagrindas pagamintas iš plieno ir sustiprintas „L“ formos profiliais ir prisuktas prie betoninio grindinio.

Siekiant sumažinti temperatūrinį poveikį matavimo tikslumui, „LVDT“ jutikliai naudojami kartu su „Invar“ lydinio laidais. Matavimo stendo jutikliai prijungti prie „National Instruments NI 9215“ jėgimo modulio ir nuskaitomi „Labview Signal Express“ duomenų surinkimo sistema. Remiantis ankstesniais ortodinamometro tikslumo bandymais (Freitas et al., 2014), prietaiso matavimo paklaida siekia mažiau 0,7 %.

2.2.2. Ištraukiamo oro srauto įvertinimas

STV ištraukiamas oro srautas priklauso nuo vėjo greičio, įrenginio aerodinaminių charakteristikų, temperatūros skirtumo tarp vėdinamos patalpos ir atmosferos,

montavimo vietos, angų tipo, pastato sandarumo lygio bei kitų faktorių. Dėl šios priežasties tampa sudėtinga nustatyti STV ištraukiamo oro charakteristikas. Priklausomybė nuo visų šių parametrų apsunkina tokių įrenginių tyrimus, todėl STV tyrimams plačiai naudojami eksperimentiniai tyrimai. Įvertinus tai, kad šiuos faktorius galima suskirstyti į priklausančius nuo vėjo greičio ir slėgio – bandymų metu įrenginiai tiriami keičiant vėjo greitį bei statinio slėgio skirtumą tarp vėdinamos patalpos ir išorės.

Kadangi STV ištraukiamo oro srauto kitimas daugiausia priklauso nuo vėjo greičio ir statinio slėgio sąlygų, įrenginių kiekybiniam ir kokybiniam tyrimui pasirinkta bebedimensinės analizės metodika. Šiam tikslui taikoma Buckingham π teorema, kuri paremta masės, ilgio ir laiko fizikiniais dydžiais. Šią bebedimensės analizės metodiką 1932 m. savo tyrimuose pritaikė Savonius (Savonius, 1932). Vėlesniuose tyrimuose tai buvo pritaikyta Revel, Welsh moksliniuose darbuose (Revel & Huynh, 2007; Welsh, 1994).

Fundamentaliai, STV ištraukiamas oro srautas priklauso nuo vėjo greičio, oro tankio, statinio slėgio skirtumo tarp vėdinamos patalpos ir lauko oro, STV oro ištraukimo ortakio skersmens. Bendru atveju tokį procesą galima išreikšti funkcija $f(\dot{Q}_e, \rho, u, \Delta P_s, d_i)$. Įvertinus šiuos kintamuosius pagal masės, ilgio ir laiko fizikinius dydžius, remiantis Buckingham π teorema sudaromi du bebedimensiniai parametrai:

$$\pi_1 = \frac{\Delta P_s}{\rho u^2}; \quad (2.1)$$

$$\pi_2 = \frac{\dot{Q}_e}{u d_i^2}, \quad (2.2)$$

čia π_1 – pirmasis bebedimensinis parametras, vnt.; π_2 – antrasis bebedimensinis parametras, vnt.; $\dot{Q}_e$ – STV ištraukiamas oro srautas, m³/s; ρ – oro tankis, kg/m³; u – vėjo greitis, m/s; ΔP_s – vėdinamos patalpos ir lauko oro statinio slėgio skirtumas, Pa.

Remiantis šia teorema sudarytais bebedimensiniais parametrais, STV gali būti lyginami pagal vienodas statinių slėgių ir vėjo greičių vertes bei tuo pačiu atsižvelgiama į įrenginių ortakio pajungimo skersmens skirtumus. Pirmasis bebedimensinis π_1 parametras rodo statinio slėgio skirtumo ir dinaminio slėgio santykį. Tuo tarpu antrasis parametras π_2 taikomas ištraukiamo oro debito palyginimui su pučiamo vėjo srauto debitu.

Remiantis Buckingham teorema, pastaruosius bebedimensinius parametrus sieja funkcinis ryšys:

$$\frac{\dot{Q}_e}{u d_i^2} = f \left(\frac{\Delta P_s}{\rho u^2} \right). \quad (2.3)$$

Kitas tarptautiniuose bandymų standartuose (EN 13141-5, 2004) naudojamas rodiklis c_p . Šis rodiklis rodo įrenginių ištraukiamo oro potencialą pagal bandymų metu pasiekiamą slėgį įrenginio oro siurbimo kanale. Šiuo atveju tokie bandymai atliekami uždarius įrenginių oro siurbimo angą.

$$c_p = \frac{\Delta P_s}{P_{dw}}, \quad (2.4)$$

čia P_{dw} – vėjo srauto dinaminis slėgis, Pa. Nustatomas lygtimi:

$$P_{dw} = \frac{\rho u^2}{2}. \quad (2.5)$$

2.2.3. Aerodinaminės traukos ir pasipriešinimo charakteristikų įvertinimas

STV savo konstrukcija ir veikimu panašus į „Savonius“ tipo vėjo jėgainę, kurių mentės didžiąja dalimi veikiamos tik aerodinamine traukos jėga (angl. *drag force*). Šiuo atveju remiantis tokia įrenginių panašumo analogija, turbininiams ventiliatoriams atliekami aerodinaminės traukos charakteristikų tyrimai.

Vienas pagrindinių rodiklių rodančių aerodinaminę trauką – traukos koeficientas:

$$C_d = \frac{F_d}{P_{dw} \cdot A_{ve}}, \quad (2.6)$$

čia F_d – traukos jėga išilgai veikianti STV, N; A_{ve} – STV skerspjūvio plotas statmenas vėjo srautui, m².

Atliekant bandymus, traukos jėga veikianti STV nustatoma netiesiogiai. Šiuo atveju visų pirma matuojama traukos jėga veikianti tik oro ištraukimo ortakį. Šis bandymas atliekamas pašalinus iš sistemos STV. Atlikus šiuos matavimus, STV grąžinamas atgal ir atliekamas pilnutinės traukos matavimas su STV bei kartu prie jo prijungtu ortakiu. Tuomet, traukos jėga veikianti tik STV apskaičiuojama pagal šių dviejų bandymų skirtumą:

$$F_d = F_{dt} - F_{do}, \quad (2.7)$$

čia F_{dt} – pilnutinė traukos jėga išilgai veikianti STV bei prie jo prijungtą ortakį, N; F_{do} – traukos jėga išilgai veikianti oro ištraukimo ortakį, N.

Prie aerodinaminių charakteristikų taip pat priskiriamas įrenginių aerodinaminis pasipriešinimas ištraukiant oro srautą. Šių charakteristikų tyrimai atliekami eksperimentiškai, be vėjo srauto. Bandymų metu įrenginių oro ištraukimo ortakis sujungimas su oro pūtimo ventiliatoriumi. Tyrimo metu matuojamas į įrenginius tiekiamas oro debitas bei statinio slėgio oro ištraukimo ortakyje ir išorėje skirtumas. Bendru atveju aerodinaminis pasipriešinimas ištraukiant oro srautą nustatomas lygtimi:

$$\zeta = 1 + \frac{\Delta P_s}{P_d}, \quad (2.8)$$

čia ΔP_s – statinio slėgio įrenginio oro įtekėjimo kanale ir išorėje skirtumas, Pa; P_d – dinaminis slėgis įrenginio oro įtekėjimo kanale, Pa.

2.2.4. Rotoriumi generuojamos galios įvertinimas

Siekiant nustatyti nagrinėjamų STV energijos generavimo potencialą, kartu su ištraukiamo oro srauto rodiklių ir aerodinaminių charakteristikų tyrimais, šiame darbe taip pat atliekami įrenginių generuojamos galios bandymai. Analizuojant ankstesnius mokslinius darbus pastebėta, jog šiems įrenginiams tokie tyrimai iki šiol nebuvo atliekami.

Šiame darbe, STV generuojamas galios tyrimai atliekami rotoriumi mechanškai sukuriant pasipriešinimo apkrovą. Tam tikslui, STV rotoriaus viršutinė dalis sujungiama metaline ašimi su sukimo momento matavimo prietaisu („Lorenz DR1“). Kitoje sukimo momento prietaiso pusėje įmontuotas apkrovos reguliavimo mechanizmas, kurio apkrova nustatoma atsižvelgiant į bandomojo įrenginio dydį, vėjo greitį bei norimą įrenginių sukimosi dažnį. Šiuo atveju STV sukimosi dažnis matuojamas optiniu tachometru („Extech RPM33“). 2.5 paveiksle pateikiama STV rotoriaus sukimo momento matavimo stendo schema ir nuotrauka.

STV rotoriaus generuojama galia tiesiogiai priklauso nuo įrenginio sukimo momento ir rotoriaus sukimosi dažnio. Bendru atveju STV rotoriaus generuojama galia apskaičiuojama:

$$\dot{E}_{STV} = 2\pi \cdot \frac{\tau \cdot \omega}{60}, \quad (2.9)$$

čia $\dot{E}_{STV}$ – STV generuojama galia, W; τ – rotoriaus sukuriamas sukimo momentas, Nm; ω – rotoriaus sukimosi dažnis, RPM.

2.5 pav. Turbininio ventiliatoriaus rotoriaus sukimo momento matavimas stendas:

a) stendo schema b) stendo nuotrauka

Fig. 2.5. Turbine ventilator rotor torque measurement stand: a) stand scheme; b) stand picture

Žymėjimai 2.5 paveiksle: 1 – vėjo tunelis; 2 – oro ištraukimo ortakis prijungtas prie STV bei oro srauto matavimo įrenginio; 3 – bandomas STV; 4 – STV rotorių ir sukimo momento matavimo prietaisą jungianti metalinė ašis; 5 – sukimo momento matavimo prietaisas; 6 – apkrovos reguliavimo mechanizmas; 7 – sukimo momento matavimo prietaiso tvirtinimo laikiklis.

Remiantis vėjo jėgainių teorijos panašumu, rotoriaus sukimo momentas tiesiogiai priklauso nuo apkrovos metu kintančio sukimosi dažnio ir pučiamo vėjo greičio. Tokių įrenginių maksimalus sukimo momentas pasiekiamas įrenginius apkrovus iki visiško rotoriaus sustabdymo, o rotorui sukantis laisvai – sukimo momentas nesukuriamas, t. y. lygus 0. Įvertinus šiuos teorinius sukimo momento kitimo aspektus bei atsižvelgiant į anksčiau atliktų eksperimentinių tyrimų metu nustatytą tiesinę STV sukimosi dažnio priklausomybę nuo vėjo greičio, maksimali STV generuojama galia gali būti nustatoma remiantis šia funkine priklausomybe:

$$\dot{E}_{\max} = f\left(u, \frac{\omega_{\max}}{2}\right), \quad (2.10)$$

čia $\dot{E}_{\max}$ – maksimali STV generuojama galia, W; $\omega_{\max}$ – rotoriaus maksimalus sukimosi dažnis įprasto veikimo metu, RPM.

2.2.5. Eksperimentinių rezultatų neapibrėžtis

Atliekant eksperimentinius tyrimus bei skaičiuojant charakteringus rodiklius vertinamos tiesioginių ir netiesioginių matavimų paklaidos (Peters, 2001).

Tiesioginių matavimų metu vertinamos atsitiktinės paklaidos ir sistemingosios paklaidos. Tiesioginių matavimų atsitiktinės paklaidos nustatomas apskaičiuojant rezultatų aritmetinį vidurkį, standartinį vidurkio nuokrypį bei priimant literatūroje randamą Stjudento koeficientą (Čekanavičius & Murauskas, 2001):

$$\Delta x_{n,P} = t_{n,P} \cdot s, \quad (2.11)$$

čia $\Delta x_{n,P}$ – matuojamo dydžio atsitiktinė paklaida; $t_{n,P}$ – Stjudento koeficientas, esant pasiklivimo tikimybei $P = 0,95$; s – standartinis vidurkio nuokrypis.

Skaičiuojant atsitiktines paklaidas taip pat vertinamos atskaitymo paklaidos. Šiuo atveju didžiausia galima atskaitymo paklaida yra lygi pusei apvalinimo intervalo. Esant pasiklivimo tikimybei P , atskaitymo paklaida skaičiuojama:

$$\Delta x_{a,P} = P \cdot \frac{h}{2}, \quad (2.12)$$

čia h – apvalinimo intervalas.

Matavimo prietaisų sistemingosios paklaidos nusakomos tikslumo klase. Matavimo prietaiso sistemingosios paklaidos didžiausia vertė Δx_{rib} nustatoma žinant prietaiso tikslumo klasę δ_{rib} ir matavimo ribą x_{rib} :

$$\Delta x_{rib} = \frac{\delta_r \cdot x_{rib}}{100} \quad (2.13)$$

Esant pasirinktai pasiklivimo tikimybei P , prietaiso sistemingoji neapibrėžtis apskaičiuojama pagal lygtį:

$$\Delta x_{p,P} = \left(\frac{t_{\infty,P}}{3} \right) \Delta x_{rib}, \quad (2.14)$$

čia $t_{\infty,P}$ Stjudento koeficientas randamas iš lentelės. Pasiklivimo tikimybei esant $P = 0,95$, šis koeficientas lygus 2.

Galiausiai, tiesioginių matavimų suminė neapibrėžtis apskaičiuojama įvertinus atsitiktines ir sistemingąją paklaidas:

$$\Delta x_{s,P} = \sqrt{(\Delta x_{n,P})^2 + (\Delta x_{a,P})^2 + (\Delta x_{p,P})^2}. \quad (2.15)$$

2.2 lentelėje pateikiami eksperimentų metu matuojami parametrai, naudojami prietaisai, jų tikslumo klasė, minimalus atliekamų matavimų kiekis bei suminė tiesioginių matavimų neapibrėžtis.

2.2 lentelė. Eksperimentų metu matuojami parametrai, matavimo prietaisų tikslumo klasė ir suminė neapibrėžtis

Table 2.2. Experimentally measured parameters, accuracy of measurement devices and total uncertainty

Matuojamas parametras	Naudojamas matavimo prietaisas ir tikslumo klasė	Minimalus matavimų kiekis	Suminė neapibrėžtis
P	Slėgio skirtumo jutiklis „Ahborn FDA602S1K“. Tikslumas: $\pm 0,5\%$	30	$\pm 0,89$ Pa
v	Rotacinis anemometras „Ahborn FVA915S120“. Tikslumas: $\pm 0,1\%$	30	$\pm 0,061$ m/s
ω	Optinis tachometras „Extech RPM33“. Tikslumas: $\pm 0,05\%$	10	$\pm 2,3$ RPM
F	NCIL laboratorijos ortodinamometras. Tikslumas: $\pm 0,7\%$	30	$\pm 0,013$ N
τ	Sukimimo momento jutiklis „Lorenz DR1“. Tikslumas: $\pm 0,1\%$	10	$\pm 0,0039$ Nm
h, w, d	Slankmatis. Tikslumas: $\pm 0,0001$ m	10	$\pm 0,00024$

Netiesioginių matavimų rezultatų įvertinimui taikoma vidutinė kvadratinė paklaida:

$$\Delta y_{vid.kv.} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} S_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} S_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} S_{x_n}\right)^2}, \quad (2.16)$$

čia y – netiesiogiai skaičiuojamas dydis; $S_{x_1}, S_{x_2}, \dots, S_{x_n}$ – tiesiogiai matuojamųjų dydžių $x_1, x_2, \dots, x_n$ vidutinės kvadratinės paklaidos.

2.3 lentelėje pateikiami darbe taikomi netiesioginiai matavimai ir jų neapibrėžties skaičiavimo rezultatai. Šiuo atveju matavimų neapibrėžtis pateikta atsižvelgiant pagal bandymų metu pasiektą minimalų ir maksimalų vėjo greitį.

2.3 lentelė. Netiesioginių matavimų neapibrėžties vertinimo rezultatai

Table 2.3. Results of propagation of uncertainty

Netiesioginis matavimas	Neapibrėžtis esant minimaliam vėjo greičiui, %	Neapibrėžtis esant maksimaliam vėjo greičiui, %
$\dot{Q}_e$	15	1,22
π_1	20,1	2,54
π_2	17,5	1,35
C_p	20,1	2,54
C_d	35,5	6,39
ζ	24,1	1,6
$\dot{E}$	30,6	8,9

2.3. Eksperimentinių tyrimų rezultatai

Šiame poskyryje pristatomi eksperimentinių tyrimų rezultatai suskirstyti į ištraukiamo oro srauto, aerodinaminio pasipriešinimo, sukimo momento ir generuojamos galios charakteristikų grupes. Ištraukiamo oro srautų charakteristikų rezultatų dalyje lyginamos skirtingų įrenginių charakteristikos bei pateikiami rezultatai, kurie naudojami daugiakomponentės įrenginio veikimo koncepcijos kūrimui. Aerodinaminio pasipriešinimo rodiklių dalyje analizuojamas vėjo srauto poveikis įrenginių veikimui bei tuo pačiu pateikiamos aerodinaminio pasipriešinimo charakteristikos ištraukiant oro srautą. Sukimo momento ir generuojamos galios poskyryje pateikiami tik STV įrenginių rezultatai, kuriais vertinamas energijos generavimo potencialas.

2.3.1. Ištraukiamo oro srauto charakteristikos

Atlikus eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad STV ištraukiamas oro srautas turi funkcinę priklausomybę nuo vėjo greičio bei statinio slėgio skirtumo tarp vėdinamos patalpos ir išorės. Siekiant geriau suprasti kompleksinę vėjo greičio ir statinio slėgio funkcinę priklausomybę, 2.6 paveiksle pateiktas trimatis grafikas,

kuriame absoliučiomis vertėmis galima matyti STV2 ištraukiamo oro srauto kitimą dėl šių dviejų faktorių.

2.6 pav. STV2 ištraukiamo oro srauto kitimas esant skirtingoms vėjo greičio ir statinio slėgio sąlygoms: a) erdvinis grafikas; b) projekcija iš viršaus; c) projekcija iš šono

Fig. 2.6. Extracted airflow performance of RTV2 under variable wind speed and static pressure conditions: a) three-dimensional graph; b) top view; c) side view

Pateiktame grafike mėlynos spalvos taškai rodo eksperimentinių tyrimų duomenis, o spalvotas paviršius sudarytas remiantis šiais duomenimis. Viršutinėje paveikslo dalyje (a) pateikto erdvinio grafiko x ir y ašyse atitinkamai parodytas vėjo greičio kitimas bei statinio slėgio vėdinamoje patalpoje iš išorėje skirtumas. Įrenginiu ištraukiamas oro srautas pateiktas z ašyje, o jo vertės gali būti nustatomos pagal dešinėje pusėje pateiktą legendą.

Šio paveikslo apatinėje kairėje pusėje (b) parodytas grafikas rodo erdvinio grafiko projekciją iš viršaus. Grafiko rezultatai gali būti analizuojami pagal vėjo greičio, statinio slėgio skirtumo ašių skaitines vertes bei naudojantis ta pačia spalvota ištraukiamo oro srauto legenda. Paveikslo apatinėje dešinėje pusėje (c) pateiktas grafikas rodo erdvinio grafiko rezultatų projekciją statinio slėgio skirtumo ir ištraukiamo oro srauto ašims.

Analizuojant rezultatus matoma, jog priklausomai nuo bandymų sąlygų, STV2 ištraukiamas oro srautas buvo $-160 \text{ m}^3/\text{h} - 220 \text{ m}^3/\text{h}$ diapazone, statinio slėgio vėdinamoje patalpoje ir išorėje skirtumas $-39 \text{ Pa} - 41 \text{ Pa}$ diapazone, o vėjo srautas siekė nuo 0 m/s iki $9,2 \text{ m/s}$. Pateikti ištraukiamo oro srauto rezultatai akivaizdžiai rodo, jog vėjo greitis bei statinio slėgio skirtumas yra svarbūs faktoriai šių įrenginių funkcionalumui. Be to, esant nepalankioms statinio slėgio skirtumo ir pučiamo vėjo greičio sąlygoms, gali susidaryti situacija, kai vėjo srautas patenka į STV oro siurbimo kanalą ir dėl to sutrinka vėdinimo funkcionalumas.

Remiantis šio tyrimo eksperimentiniais duomenimis ir pritaikius „*Matlab*“ duomenų apdorojimo paketus nustatyta, kad apytiksliai STV2 ištraukiamo oro srauto apskaičiavimui galima taikyti tokio tipo empirinę lygtį:

$$\dot{Q}_e = a \cdot \text{sign}\left(b \cdot \Delta P_s + c \cdot u^2\right) \cdot \left(\log_{10} \left(1 + \frac{\left| b \cdot \Delta P_s + c \cdot u^2 \right|}{10^{c \cdot \log_{10}(1/(u+1))}} \right) \right), \quad (2.17)$$

čia $\dot{Q}_e$ – įrenginiu ištraukiamas oro srautas, m^3/h ; a, b, c – empiriniai koeficientai, nustatyti pagal eksperimentinių tyrimų duomenis. Tiriamojo STV2 atveju koeficientai $a = 148,8$; $b = 0,451$; $c = 0,081$; u – vėjo greitis, m/s ; ΔP_{sc} – statinio slėgio skirtumas tarp vėdinamos patalpos ir lauko oro, Pa ;

Pateikta empirinė lygtis galioja tik STV2 tipo įrenginiui, tuo tarpu kitiems įrenginiams gali skirtis empiriniai koeficientai ir lygties išraiška. Tokiu būdu nustatytos funkcinės priklausomybės palankios atliekant kiekybę analizę, kuomet nustatomos pasirinkto įrenginio absoliučiosios ištraukiamo oro srauto vertės pagal vėjo greičio ir statinio slėgio duomenis. Tačiau tokių tyrimų duomenys ir skaičiavimo rezultatų pateikimas apsunkina kokybinį skirtingų įrenginių

lyginimą. Kokybiniam skirtingų įrenginių palyginimui, šiuo atveju pasirinktas bedimensinė Buckingham π analizė nustatytų parametrų taikymas.

2.7 paveiksle pateiktas bedimensinę analizę iliustruojantis grafikas, kuriame bedimensinių parametrų vertėmis galima matyti visų bandytų įrenginių ištraukiamo oro srauto potencialą, esant skirtingiems statinio slėgio ir pučiamo vėjo greičio santykiams. Be to, remiantis šia teorema sudarytais bedimensiniais parametrais, įrenginiai lyginami atsižvelgiant į ortakio pajungimo skersmens skirtumus.

Kompleksiškai vertinant vėjo greičių ir statinio slėgio skirtumų kitimą matoma, kad geriausią ištraukiamo oro rezultatą pasiekia STV2 (rotoriaus mentės vertikalios ašies kryptimi tiesios). Palyginimui pasirinkus atvirą ortakį, STV2 ištraukiamas oro srautas gali būti iki 8 % didesnis. Priklausomai nuo vėjo greičio ir statinio slėgio sąlygų, visų kitų įrenginių ištraukiamo oro srauto veiksmingumas gali būti mažesnis iki 30 %.

Analizuojant STV1 (rotoriaus mentės lenktos vertikalios ašies kryptimi) tyrimų duomenis matoma, kad mažas šio įrenginio rotorius ir sąlyginai didelis siurbimo angos skerspjuvio plotas lemia tai, kad įrenginys veikia prasčiausiai iš visų bandytų STV. Tuo tarpu STV3 (rotoriaus mentės lenktos vertikalios ašies kryptimi), būdamas panašios konstrukcijos į STV1, rodo šiek tiek geresnį veiksmingumą dėl didesnių tarpų tarp rotoriaus menčių.

Vertinant bandyto deflektoriaus rezultatus pastebima, kad virš įrenginio įrengtas nuo lietaus apsaugantis stogelis mažina oro siurbimo rezultatą iki 20 % lyginant su atviru ortakiu. Atliekant eksperimentinius tyrimus pastebėta, kad nuo tam tikro siurbiamo oro greičio prasideda ištekančio oro srauto interferencija su apsaugine lietaus konstrukcija ir dėl to padidėjus aerodinaminiam pasipriešinimui – sumažėja ištraukiamo oro srauto efektyvumas.

Tyrimų metu sudarius sąlygas vėjo srauto įsiurbimui pastebėta, kad visi bandyti STV įrenginiai stipriai sumažina įsiurbiamo vėjo srauto kiekį lyginant su atviru ortakiu. Vertinant absoliučiuosius rodiklius, iki 55 % mažesnis įsiurbtas oro debitas nustatytas STV1 įrenginyje. STV2 ir STV3 įrenginiais įsiurbimas oro srautas sumažinamas iki 45 %. Tuo tarpu vertinant deflektoriaus atsparumą oro srauto įsiurbimui matoma, kad įrenginio konstrukcija lemia tai, kad įsiurbiamo oro srauto debitas gali būti mažesnis iki 25 % lyginant su atviro tipo ortakiu.

2.7 pav. Bandytų įrenginių ištraukiamo oro srautų bedimensinės analizės rezultatai
Fig. 2.7. The results of the extracted airflow dimensionless analysis of the tested devices

Žymėjimai 2.7 paveikslo legendoje: „-e“ ir „-r“ atitinkamai reiškia ištraukiamo ir įsiurbiamo oro srautų tekėjimo kryptį; R² – bandymų rezultatų determinacijos koeficientas. Atliekant bandymus vėjo tunelyje, vėjo greitis reguliuojamas trimis pastoviomis pakopomis, tuo tarpu statinio slėgio reguliavimas vėdinamoje patalpoje ribotas ir kiekvieno bandymo atveju skiriasi. Dėl šios priežasties, kiekvienam STV skiriasi x ašies kryptimi pateiktų duomenų vertės.

Siekiant susieti eksperimentinių tyrimų duomenis su toliau pristatoma daugiakomponente įrenginio veikimo koncepcija, 2.8 paveiksle pateikiamos bandytų STV ištraukiamo oro srauto ir sukimosi dažnio priklausomybės nuo vėjo greičio. Šiuo atveju rezultatai pateikiami esant įprasto veikimo ir sustabdyto veikimo režimams. Be to, visi kiti toliau pristatomi STV bandymų rezultatai, kuriuose pateikiamos absoliučiosios ištraukiamo oro srauto vertės, atlikti suvienodinus vėdinimą patalpą imituojančios kameros ir vėjo tunelio statinius slėgius.

2.8 pav. Įrenginių ištraukiami oro srautai esant įprastam ir sustabdytam rotoriaus veikimui

Fig. 2.8. Extracted airflow by devices under normal and stopped rotor conditions

Grafike pateiktos punktyrinės kreivės ir STV žymėjimas su priedašu „-b“ rodo sustabdytų STV rotorių rezultatus. Ištininės kreivės rodo įprasto STV veikimo rezultatus.

Kiekybiškai vertinant bandytų STV rezultatus matoma, kad įprasto veikimo metu, didžiausią ištraukiamą oro srautą pasiekia STV3 įrenginys. Nedaug mažesnis rezultatas pasiekiamas STV2 įrenginiu, o STV1 šis rezultatas mažesnis apie 30–40 %. Esant 9,2 m/s vėjo greičiui, vienodam statinio slėgio skirtumui tarp vėdinamos patalpos ir išorės, maksimalus STV1 ištraukiamas oro srautas siekė 116 m³/h, STV2 – 171 m³/h, o STV3 – 183 m³/h.

Šiuo atveju esant vienodam vėdinamos patalpos ir lauko oro statiniams slėgiams, bandytų STV ištraukiamo oro srauto apskaičiavimui gali būti taikoma antrojo laipsnio empirinė lygtis:

$$\dot{Q}_e = a \cdot u^2 + b \cdot u + c, \quad (2.18)$$

čia $\dot{Q}_e$ – STV ištraukiamas oro srautas, m³/h; u – vėjo greitis, m/s. Šiuo atveju empirinė lygtis galioja kai vėjo greitis yra didesnis už 0,5 m/s; a , b , c – empiriniai koeficientai, kurių vertės pateiktos žemiau esančioje 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Turbininių ventiliatorių ištraukiamo oro srauto empirinės lygties koeficientai
Table 2.4. Coefficients of the empirical equation of turbine ventilators extracted airflow

Įrenginio žymėjimas	Koeficientai		
	a	b	c
STV1	–0,453	17,75	–3,139
STV2	–0,198	20,34	–2,418
STV3	–0,251	22,78	–1,699

Vertinant skirtingų bandymo sąlygų rezultatus nustatyta, jog atlikus visišką įrenginių rotorių sustabdymą, oro siurbimas išlieka. Šiuo atveju pučiant vėjo srautui ir nesisukant įrenginių rotoriams, vėjo sukuriama ežekcija sudaro apie 50–65 % viso ištraukiamo oro srauto. Likusią dalį prideda vėjo įsukamas rotorius, veikiantis kaip elektra varomas ventiliatorius.

Toliau esančiame 2.9 paveiksle pateikiami pagal „EN 13141-5“ nustatyti bandytų įrenginių c_p rodikliai. Ištraukiamo oro potencialą charakterizuojantys rodikliai c_p leidžia kokybiškai palyginti įrenginių veiksmingumą, tačiau kiekybiškai nustatyti ištraukiamo oro debitą nėra galima.

Šiuo atveju mažesnės rodiklių vertės rodo didesnę įrenginio ištraukiamo oro potencialą. Pagal atliktų bandymų rezultatus nustatyta, kad rezultatai turi tiesioginį ryšį su bedimensinės Buckingham π analizės rezultatais. Didžiausią ištraukiamo oro srauto potencialą rodo STV2 įrenginys. Mažiausias potencialas nustatytas STV1 įrenginiui. Skirtumas tarp šių rezultatų siekia apie 55 %.

2.9 pav. Bandytų įrenginių c_p rodiklių palyginimas

Fig. 2.9. Comparison of tested devices c_p factors

2.9 paveiksle pateikti STV žymėjimai su priedu „-b“ rodo sustabdytų STV rotorijų rezultatus.

Lyginant STV įprasto ir sustabdyto rotoriaus veikimo c_p rodiklius matoma, kad rezultatų skirtumas yra panašus į anksčiau pateiktus rezultatus su absoliučiomis ištraukiamo oro srauto vertėmis (2.8 pav.). Šiuo atveju matoma kad skirtumas siekia nuo 50 % iki 70 %.

2.10 paveiksle pateikiama Vilnius Tech laboratorijoje bandyto STV1 ištraukiamo oro srauto rezultatų palyginimas ir analizė, esant įprastinio veikimo ir rotoriaus sukimo elektros variklio bandymų sąlygoms.

Vertinant STV1 bei kitų STV sukimosi dažnio rezultatus nustatyta, kad įrenginių rotoriaus sukimasis prasideda vėjo greičiui viršijus apie 2 m/s. Be to, nustatyta, kad įrenginių sukimosi dažnio priklausomybė nuo vėjo greičio yra tiesinė. Remiantis bandymų duomenimis, ši priklausomybė STV1 įrenginiui gali būti aprašoma empirine lygtimi:

$$\omega = 65,55 \cdot u - 79,94, \quad (2.19)$$

čia ω – STV rotoriaus sukimosi dažnis, RPM. Lygtis galioja kai $u > 2$ m/s.

Analizuojant skirtingų STV1 bandymų režimų rezultatus matoma, kad pasiekus vienodus sukimosi dažnius, didesnis ištraukiamas oro srautas susidaro, kai varomoji jėga yra vėjas.

2.10 pav. STV1 ištraukiamo oro srauto palyginimas tarp įprasto veikimo ir rotoriaus sukimo elektros varikliu

Fig. 2.10. Comparison of RTV1 extracted airflow between regular operation and rotor's rotation by an electric motor

Šiuo atveju rezultatams palyginti laisvai pasirinkus 300 sūkių per minutę atskaitą (žymima vertikalia brūkšnine linija) apskaičiuota, jog įprasto veikimo sąlygomis, STV1 gali ištraukti apie 67 % daugiau oro srauto nei veikdamas su elektros varikliu. Norint pasiekti vienodus ištraukiamojo oro srautus, įrenginį suktant varikliu reikalingas didesnis sukimosi dažnis nei suktant tik vėjo srautu.

2.3.2. Aerodinaminės traukos ir pasipriešinimo rodikliai

Šiame poskyryje pateikiamos STV aerodinaminės traukos charakteristikos bei visų bandytų įrenginių aerodinaminis pasipriešinimas ištraukiant oro srautą. Aerodinaminės traukos charakteristikos nagrinėjamos siekiant įvertinti vėjo poveikį STV veikimui bei atsižvelgiant į tai, kad mokslinėje literatūroje paskelbta nedaug tokio tipo tyrimų. Kadangi bandyti įrenginiai didžiąja dalimi veikia tik dėl aerodinaminės traukos jėgos, tyrime analizuojamos tik išilginės STV veikiančios jėgos.

Atliekant aerodinaminės traukos tyrimus vėjo tunelyje, Re skaičius svyravo nuo $2,4 \cdot 10^4$ iki $1,6 \cdot 10^5$. 2.11 paveiksle pateiktas STV veikiančių traukos jėgų palyginimo grafikas.

2.11 pav. Turbininius ventiliatorius veikiančių traukos jėgų palyginimas

Fig. 2.11. Comparison of drag forces acting turbine ventilators

2.11 paveiksle pateikti STV žymėjimai su priedais „-b“ rodo sustabdytų STV rotorų rezultatus. R^2 – bandymų rezultatų determinacijos koeficientas.

Remiantis eksperimentinių tyrimų rezultatais matoma, kad įrenginius veikiančios maksimalios vėjo srauto aerodinaminės traukos jėgos siekė iki 2,5 N. Be to, vertinant aerodinaminės traukos kitimą matoma, kad rezultatai turi tiesinę priklausomybę. Žvelgiant į įprasto veikimo ir sustabdyto rotoriaus rezultatus matoma, kad visais atvejais, sustabdžius rotorius aerodinaminė trauka sumažėja. 2.12 paveiksle pateikiami pagal šiuos duomenis apskaičiuoti aerodinaminės traukos koeficientai c_d .

2.12 pav. Bandytų įrenginių traukos koeficientų palyginimas

Fig. 2.12. Comparison of drag coefficients of tested devices

Aerodinaminės traukos koeficientų rezultatai rodo, kad įprasto veikimo metu didžiausia aerodinaminė trauka tenka STV1, o mažiausia trauka veikia STV2 įrenginį. Šiuo atveju aerodinaminės traukos koeficientai STV1, STV2, STV3 atitinkamai lygūs 1,8, 1,02 bei 1,45.

Analizuojant skirtingų bandymų sąlygų rezultatus matoma, kad sustabdžius STV rotorius, aerodinaminė trauka gali sumažėti iki 3 kartų. Didžiausias skirtumas pastebimas STV1 ir STV3 įrenginiuose, kurių rotoriaus konstrukcija sudaryta iš vertikalios ašies kryptimi lenktų menčių. Bandymų metu pastebėta, kad STV veikimo metu dėl rotorių sukimosi ir ištraukiamo oro srauto susidaro įrenginio konstrukciją veikianti išcentrinė jėga. Dėl šios priežasties padidėja aerodinaminės traukos jėga. Vertinant STV2 skirtingo veikimo rezultatus matoma, kad aerodinaminė traukos skirtumas siekia apie 16 %.

2.13 paveiksle pristatomi bandytų įrenginių aerodinaminio pasipriešinimo koeficientai esant skirtingoms veikimo sąlygoms. Analizuojant aerodinaminį pasipriešinimą ištraukiant oro srautą matoma, kad didžiausi slėgio nuostoliai susidaro STV3 įrenginyje, o mažiausi slėgio nuostoliai susidaro deflektoriuje. Vertinant tik STV rezultatus nustatyta, jog mažiausias aerodinaminis pasipriešinimas susidaro STV2 įrenginyje. Šiuo atveju aerodinaminio pasipriešinimo koeficientai STV1, STV2, STV3, D atitinkamai lygūs 2,42, 1,31, 2,65 bei 1,22.

2.13 pav. Bandytų įrenginių aerodinaminio pasipriešinimo koeficientų palyginimas
Fig. 2.13. Comparison of minor loss coefficients of tested rooftop ventilators

Analizuojant sustabdytų STV rotorijų rezultatus pastebima, kad visais atvejais tokios sąlygos padidina aerodinaminį pasipriešinimą. Sustabdžius STV rotorius, šis skirtumas siekia nuo 13 % iki 31 %. Šie rezultatai rodo, kad turėtų būti vengiamas sąlygos kuomet įrenginių rotoriai visiškai sustoja.

2.3.3. Sukimo momento ir generuojamos galios charakteristikos

Šioje rezultatų dalyje pateikiama STV eksperimentinių bandymų dalis susijusi su STV sukimo momento matavimais ir šio įrenginio generuojamos galios skaičiavimais. STV sukimosi ašyje įrengus sukimo momento matavimo prietaisą, bandymai atlikti esant trimis skirtingiems vėjo greičiams bei vienodiems statiniams slėgiams vėdinamoje patalpoje ir vėjo tunelyje. Bandymų metu sukimo momentas matuojamas sukuriant skirtingas apkrovas STV sukimosi ašiai. Be to, tuo pačiu metu, optiniu tachometru matuojami STV sukimosi dažniai.

2.14 paveiksle pateikiamas grafikas, rodantis bandytų STV sukimo momentų priklausomybes nuo sukimosi dažnio ir vėjo greičio.

2.14 pav. Turbininių ventiliatorių rotorių sukuriami sukimo momentai esant skirtingiems vėjo greičiams

Fig. 2.14. Torques of rotors of turbine ventilators under different wind speed

Žymėjimai 2.14 paveikslo grafike: [] – laužtiniuose skliaustuose nurodytas skaičius rodo vėjo greitį, m/s; R^2 – bandymų rezultatų determinacijos koeficientas.

Sukimo momento matavimo rezultatai rodo, kad STV sukuriamas sukimo momento kitimas nuo sukimosi dažnio yra tiesinis. Šiuo atveju didžiausios sukimo momento vertės pasiekiamos sustabdžius įrenginių rotorius. Vertinant atskirų įrenginių generuojamus sukimo momentus matoma, kad didžiausi sukimo momentai pasiekiami STV3 įrenginyje. Šiuo atveju esant maksimaliam 9,2 m/s vėjo greičiui ir sustabdytam rotorui, sukimo momentas siekia apie 0,055 Nm. Pagal kitų įrenginių duomenis matoma, kad esant toms pačioms bandymų sąlygoms, STV2 maksimalus sukimo momentas yra apie 0,04 Nm, o mažiausią rotorių turinčio STV1 – 0,032 Nm.

2.15 paveiksle pateikiami bandytų STV generuojamos galios skaičiavimo rezultatai, nustatyti pagal rotoriaus sukimosi dažnius ir atitinkamai nustatytas

sukimo momento vertes. Šiame grafike tuo pačiu pateikiamos ištraukiamo oro srauto kitimo kreivės, esant skirtingiems rotorų apkrovimams ir vėjo greičiams.

2.15 pav. Turbininių ventiliatorių generuojamos galios ir ištraukiamo oro srautų kitimas, esant skirtingiems vėjo greičiams

Fig. 2.15. Generated power and extracted airflow performance of turbine ventilators under different wind speed

Šiais bandymais nustatyta, kad esant 9,2 m/s vėjo greičiui, pasirinkti STV gali generuoti apie 0,6 W maksimalią galią, kai jų sukimosi dažnis sumažėja pusiau. Esant dideliame vėjo greičiui ir didesniai nei numatyta ištraukiamam oro srautui, šią perteklinę energiją įrenginyje galima akumuliuoti. Šiuo atveju siekiant maksimalios akumuliacijai suteikiamos galios, STV sukimosi dažnis turi būti sumažinamas apie 50 %. Visgi, kartu vertinant ištraukiamo oro srauto kitimą, matoma, kad bandytų įrenginių ištraukiamas oro srautas gali sumažėti apie 20 %. Kai kuriais atvejais, toks STV rotorius ašies apkrovimas nėra galimas, nes siurbiamas oro srautas tampa per mažas ir dėl to neužtikrinamas patalpos vėdinimo poreikis.

Remiantis ankstesnio grafiko rezultatais, 2.16 paveiksle sudarytas papildomas grafikas, rodantis bandytų STV maksimalios galios kitimą nuo vėjo

greičio. Grafike taip pat parodytas ištraukiamo oro srauto kitimas, esant šioms įrenginių veikimo sąlygoms.

2.16 pav. Turbininių ventiliatorių maksimalios generuojamos galios ir ištraukiamo oro srautų kitimas esant skirtingiems vėjo greičiams

Fig. 2.16. Variation of maximum generated power and extracted airflow of turbine ventilators under variable wind speed

Pagal grafike pateiktus rezultatus nustatyta, kad maksimalus STV generuojamos galios kitimas atitinka kubinę priklausomybę. Matyti, jog įrenginiui veikiant energijos akumuliacinio režimu, vėjo srauto greitis yra esminis faktorius. Šiuo atveju naudojant STV2 ir esant 9,2 m/s vėjo greičiui būtų galima generuoti apie 0,6 W galią, o ištraukiamas oro srautas siektų apie 120 m³/h.

Toliau pristatomi skirtingų STV maksimalios generuojamos galios ir ištraukiamo oro srautų efektyvumų rezultatai. Šie rodikliai atitinkamai nustatomi lygtimis:

$$\eta_E = \frac{\dot{E}_{STV}}{\dot{E}_w}; \quad (2.20)$$

$$\eta_Q = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_w}, \quad (2.21)$$

čia $\dot{E}_w$ – vėjo srauto galia tenkanti STV rotoriaus skerspjūvio plotui, W; $\dot{Q}_w$ – vėjo srautas tenkantis STV rotoriaus skerspjūvio plotui, m³/h. Pastarieji rodikliai apskaičiuojami lygtimis:

$$\dot{E}_w = \frac{\rho \cdot u^3 \cdot A_{ve}}{2}; \quad (2.22)$$

$$\dot{Q}_w = u \cdot A_{ve} \cdot 3600. \quad (2.23)$$

2.17 paveiksle pateikiami minėtųjų efektyvumo rodiklių skaičiavimo rezultatai.

2.17 pav. Turbininių ventiliatorių maksimalios generuojamos galios ir ištraukiamo oro srautų efektyvumų palyginimas, esant skirtingiems vėjo greičiams

Fig. 2.17. Comparison of maximum generated power and extracted airflow efficiencies of turbine ventilators under variable wind speed

Šiame ir ankstesniame grafike pateikti generuojamų galių skaičiavimo rezultatai rodo, kad STV bandymų rezultatai panašūs į „Savonius“ tipo vėjo jėgainių teorijoje pateikiamas teorines ribas (Twidell & Weir, 2015). STV rotoriumi generuojama galia priklauso nuo rotoriaus dydžio bei apkrovos, o nuo vėjo greičio kinta kubine priklausomybe. Vertinant STV maksimalios generuojamos galios ir oro siurbimo efektyvumus nustatyta, kad tokių įrenginių generuojamos galios efektyvumas siekia nuo 4 % iki 8 %, o siurbimo efektyvumas nuo 12 % iki 22 %. Lyginant bandytų STV vėjo energijos išnaudojimo efektyvumą, geriausias rezultatas pasiekiamas STV2 įrenginiu.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

Atlikus vėjo energiją naudojančių stoginių turbininių ventiliatorių eksperimentinius tyrimus nustatyta:

1. STV veiksmingumą labiausiai lemia vėjo greitis, statinio slėgio vėdinamoje patalpoje ir aplinkoje skirtumas, aerodinaminės įrenginių savybės. Pagal vėjo greičių ir statinio slėgio skirtumų kitimą, geriausią ištraukiamo oro rezultatą pasiekia įrenginys su vertikaliai tiesiomis mentėmis (STV2). Palyginimui pasirinkus atvirą ortakį, STV2 ištraukiamo oro srautas gali būti iki 8 % didesnis. Priklausomai nuo sąlygų, visų kitų įrenginių ištraukiamo oro srauto veiksmingumas gali būti mažesnis iki 30 %. Tyrimų metu pastebėta, kad visi bandyti įrenginiai stipriai sumažina įsiurbiamo vėjo srauto kiekį lyginant su atviru ortakiu. Šiuo atveju vertinant absoliučiuosius rodiklius iki 55 % mažesnis įsiurbtas oro kiekis nustatytas įrenginyje su vertikaliomis ašies kryptimi lenktomis mentėmis (STV1).

2. Sukimo momento matavimo ir galių skaičiavimo rezultatai rodo, kad STV charakteristikos panašios į teorines „Savonius“ tipo vėjo jėgainių charakteristikas. STV rotoriumi generuojama galia priklauso nuo rotoriaus dydžio bei apkrovos, o nuo vėjo greičio kinta kubine priklausomybe. Nustatyta, kad apkrovas rotorius, maksimali STV generuojama galia pasiekama rotoriaus sukimosi dažniui sumažėjus pusiau.

3. Vertinant STV maksimalios generuojamos galios ir oro siurbimo efektyvumus nustatyta, kad tokių įrenginių generuojamos galios efektyvumas siekia nuo 4 % iki 8 %, o siurbimo efektyvumas nuo 12 % iki 22 %. Lyginant bandytų STV vėjo energijos išnaudojimo efektyvumą, geriausias rezultatas pasiekiamas STV2 įrenginiu.

4. STV apytiksliai 50 % ištraukiamo oro srauto pasiurbama dėl ežekcijos reiškinių, o likusią 50 % dalį prideda STV rotoriaus sukimasis. Šiame darbe atlikti bandymai STV rotorius sukant papildomu energijos šaltiniu parodė, jog įrenginį sukant vienodu dažniu be vėjo srauto, ištraukiamo oro debitas yra mažesnis apie 30 % nei STV įprasto veikimo metu.

5. Analizuojant aerodinaminio pasipriešinimo rodiklius nustatyta, kad STV1, STV2, STV3 C_d rodikliai atitinkamai lygūs 1,8, 1,02 bei 1,45. Kita vertus, sustabdžius STV rotorius, aerodinaminė trauka gali sumažėti iki 3 kartų. Bandymų metu pastebėta, kad STV veikimo metu susidaro išcentrinė jėga, padidinanti aerodinaminės traukos jėgą.

Turbininio ventiliatoriaus trikomponentės koncepcijos termodinaminis modelis

Šiame skyriuje pristatomas stoginio turbininio ventiliatoriaus termodinaminis modelis laikantis hipotezės, jog įrenginyje vykstantys procesai savyje apjungia procesus vėjo turbinose, ežektoriuose bei ventiliatoriuose. Šiuo pagrindu formuojama trikomponentė koncepcija grindžiama sąsajomis su eksperimentinių tyrimų rezultatais. Įrenginyje vykstantys srautiniai procesai nagrinėjami pagal ežektorių tyrimuose taikomą h - s diagramų analogiją.

Tokios koncepcijos pagrindu sukurtas modelis, taikant apibrėžtą skaičių eksperimentinių charakteristikų, leidžia kokybiškai ir kiekybiškai įvertinti STV veikimo metu sąveikaujančių srautinių procesų poveikį įrenginio funkcionalumui, nustatyti efektyvumą bei teorinį tobulinimo potencialą.

Pristatomame termodinaminiam modelyje apsiribojama procesais, kai vėjo ir siurbiamo oro srautai yra tokios pat sudėties, laikomi praktiškai nesuspaudžiamais (angl. *subsonic flow*), tekėjimo greičiai yra iki garsiniai (angl. *subsonic*) bei jiems taikomos idealiosioms dujoms būdingos savybės. Be to, fluidų tekėjimas priimamas vienmatis ir nekintantis laike.

Skyriaus tematika paskelbtos keturios publikacijos (Rimdžius et al., 2021; Martinaitis et al., 2020; Streckienė et al., 2021; Streckienė et al., 2018).

3.1. Turbininio ventiliatoriaus kontrolinis tūris

STV termodinaminio modelio analizė pradedama nuo srautinių procesų masinių debitų bei būsenos parametrų įvertinimo ties įrenginio kontroliniu tūriu. Aiškinant bendruosius veikimo principus bei išvedant skaičiavimams reikalingas lygtis naudojamos abstrahuotos schemos, kurios nesusietos su konkrečiu įrenginiu. Šiuo atveju įvertinus STV veikimo ypatybes bei oro srautų tekėjimo pobūdį – įrenginys analizuojamas kaip atvira termodinaminė sistema.

3.1 paveiksle vaizduojama STV principinė schema kartu su vėdinama patalpa. Schemoje pavaizduotas skerspjūvis 0-0 rodo ištraukiamo oro įtekėjimo angą, skerspjūvis 1*-1* atitinka vėjo srauto ir STV menčių sąveikos ribą, o skerspjūvis 6-6 vaizduoja susimaišiusių vėjo ir ištraukiamo oro srautų ištekėjimą iš STV.

3.1 pav. Turbininio ventiliatoriaus kontrolinis tūris ir oro srautų būsenos parametrai

Fig. 3.1. Control volume of turbine ventilator and airflow state parameters

Remiantis 3.1 paveikslo schemoje pateiktomis kontrolinio tūrio ribomis matoma, kad į termodinaminę sistemą įeinantiems srautams priskiriamas vėjo srautas bei įrenginiu siurbiamas oras. Termodinaminiam modelyje priimama, jog STV mentes veikiantis vėjo srautas atitinka į 1*-1* skerspjūvį pučiamo oro debitą

$\dot{M}_w = u \cdot A_{ve}$. Tuo tarpu, siurbiamo oro debitas $\dot{M}_e$ tiesiogiai priklauso nuo pučiamo vėjo greičio ir įrenginio aerodinaminių savybių. Šiuo atveju iš patalpos ištraukiamo oro debitas nustatomas eksperimentiškai. Be to, atliekant šio tyrimo eksperimentus bei remiantis kitais tyrimais (Lai, 2003) vizualiai pastebėta, jog dalis į STV rotorijų pučiamo vėjo srauto atitrūksta. Todėl, vertinant kontrolinį turį paliekančius srautus, jiems priskiriamas atitrūkęs vėjo srautas $\dot{M}_{wl}$ bei STV rotoriaus vidumi pratekėjusio vėjo srauto ir ištraukiamo iš patalpos oro srauto mišinys $\dot{M}_{wi} + \dot{M}_e$.

Įvertinus įrenginio kontroliniame tūryje įtekančius ir ištekančius oro srautus sudaroma apibendrinanti masės tolydumo lygtis:

$$\dot{M}_w^+ + \dot{M}_e^+ = \dot{M}_{wl}^- + \dot{M}_{wi}^- + \dot{M}_e^- \quad (3.1)$$

Įprastai, analizuojant srautinius procesus vertinama jų vidinė energija (entalpija) bei srautų kinetinė ir gravitacinė potencinė energija. Pristatomame modelyje priimama prielaida, jog vėjo srautas iki sąveikos su STV teka neapribotame tūryje (atmosfera) bei nesusiduria su jokiais tekėjimą veikiančiomis kliūtimis. Tai atitinka idealizuotas sąlygas, kurios sudaromos bandant įrenginį vėjo tunelyje arba esant stabiliems atmosferos oro rodikliams. Įvertinus šią prielaidą priimama, kad iki priartėjant prie STV rotoriaus, vėjo srauto statinis slėgis lygus atmosferiniam slėgiui $P_{sw} = P_a$. Be to, visų analizuojamą įrenginį veikiančių oro srautų temperatūra yra vienoda visame tūryje. Todėl, atsižvelgiant į šias sąlygas ir prielaidas, termodinaminiame modelyje nevertinama srautų gravitacinė potencinė energija.

Kita vertus, kaip jau buvo minėta, vienas pagrindinių veiksnių įrenginio veikimui – pučiamo vėjo greitis u , dėl kurio judantis oras turi kinetinę energiją. Nagrinėjant srautinius procesus, pristatomame termodinaminiame modelyje patogiu taikyti pilnosios entalpijos bei pilnutinio slėgio būsenos parametrus, įvertinančius srauto vidinę ir kinetinę energiją. Šiuo atveju vėjo srautui taikomos šios pilnosios entalpijos ir pilnutinio slėgio skaičiavimo lygtys:

$$h_w = h_a + \frac{u^2}{2}; \quad (3.2)$$

$$P_{tw} = P_{sw} + P_{dw} = P_a + \frac{\rho_a \cdot u^2}{2}, \quad (3.3)$$

čia h_w , h_a – vėjo srauto pilnoji entalpija ir nejudančio atmosferos oro entalpija, (J/kg·K); P_{tw} , P_{dw} – vėjo srauto pilnutinis ir dinaminis slėgis, Pa.

STV sąveikaujant su vėjo srautu, vyksta energijos transformavimo procesas, kurio metu atliekamas techninis darbas $\dot{E}_{STV}$. Vėjo energijos atliekamas darbas naudojamas oro ištraukimui iš patalpos STV siurbimo kanalu (skerspjūvis 0–0). Termodinaminiam modelyje priimama, jog statinis slėgis vėdinamoje patalpoje lygus atmosferiniam slėgiui $P_{sc} = P_a$, o išsiurbto oro pritekėjimas netrukdomai vyksta pro patalpos angas. Be to, vėdinamos patalpos tūris yra didelis, todėl ištraukiamas oro srautas šioje erdvėje juda labai lėtai ir priimama prielaida, jog oro judėjimo greitis šioje patalpoje $v_c \approx 0$. Įvertinus šias prielaidas priimama, kad patalpoje esančio oro pilnoji entalpija atitinka nejudančio atmosferos oro entalpiją $h_0 = h_a$.

Orui tekant STV vidumi jis susiduria su aerodinaminėmis kliūtimis, vyksta trintis tarp oro ir įrenginio paviršiaus, todėl susidaro srauto slėgio nuostoliai. Šiuo atveju dėl trinties susidariusi disipacija modelyje vertinama energijos virtimu į šilumą $\dot{Q}_{STV}$, kuri palieka termodinaminę sistemą. Atsižvelgiant į tai, kad srautiniai procesai modelyje laikomi nekintančiais laike bei įvertinus atliekamą darbą ir susidarančius nuostolius – nagrinėjamai atvirai termodinaminei sistemai, pagal pirmąjį termodinamikos dėsnį sudaroma tokia energijos balanso lygtis:

$$\dot{M}_w^+ h_w + \dot{M}_e^+ h_0 = \dot{M}_{wi}^- h_1 + (\dot{M}_{wi}^- + \dot{M}_e^-) h_{ex} + \dot{E}_{STV} + \dot{Q}_{STV}. \quad (3.4)$$

Šioje lygtyje anksčiau nepaaiškinti dydžiai h_1 ir h_{ex} atitinkamai žymi į STV kontrolinį tūrį įtekančio vėjo srauto entalpiją bei įrenginį paliekančio oro srauto mišinio entalpiją.

3.2. Turbininio ventiliatoriaus menami komponentai

Toliau detaliau aptarkime STV vykstančius procesus. Vertinant įrenginio veikimo principą bei remiantis eksperimentiniais tyrimais – pastebimas STV konstrukcinis panašumas į kitus įrenginius ir juos siejantis struktūrinis ir sąveikinis ryšys. Norint geriau suprasti įrenginio veikimo ypatybes, 3.2 paveiksle pateikiami įrenginio skerspjūviai iš viršaus, kuriuose dekomponuojami atskiri menami STV komponentai. Įrenginyje sąveikaujančių oro srautų procesai vaizduojami STV suskaidant į menamus turbinos, ežektoriaus ir ventiliatoriaus komponentus.

3.2 pav. Turbininio ventiliatoriaus struktūrinis suskirstymas į menamus komponentus: a) turbina; b) ežektorius; c) ventiliatorius

Fig. 3.2. The turbine ventilator structural breakdown into hypothetical components: a) turbine; b) ejector, c) ventilator

Tolesniuose poskyriuose detaliau aptariamos šių komponentų ypatybės ir sąveikos ryšiai STV veikimo metu.

3.2.1. Turbinos termodinaminis modelis

Analizuojant vėjo srauto ir STV sąveiką pagal 3.2 paveiksle (a) pateiktą įrenginio schemą, visų pirma pastebimas panašumas į vėjo jėgainę (turbina). Šį panašumą galima sieti ir su tuo, jog 1932 m. Savonius atliko tyrimą su jo paties išrastu „S-rotoriaus“ tipo vėjo energija varomu ventiliatoriumi (Savonius, 1932). Šiuo atveju, skerspjūvyje vertinant įrenginio menčių geometriją bei išdėstymą, akivaizdu, kad įrenginio rotoriaus kairė pusė yra sukama vėjo srauto, todėl vertinant STV rotoriaus konstrukciją ir veikimo principą, jį priimama laikyti panašiu į „Savonius“ tipo vėjo jėgainę (3.3 pav.).

Remiantis šiuo įrenginių konstrukciniu panašumu, pristatomame termodinaminame modelyje taikomi kai kurie vėjo jėgainių galios skaičiavimo metodikos principai. Įvertinus STV rotoriaus skerspjūvio plotą statmeną vėjo srauto tekėjimo kryptiai (1° – 1° skerspjūvis), apskaičiuota teorinė (potenciali) vėjo srauto galia tenkanti STV nustatoma 2.22 lygtimi.

Detaliau analizuojant įrenginio konstrukcines ir aerodinamines savybes pastebima, kad STV rotorių galima padalinti į dvi menamas dalis. Pagal menčių geometriją, jų padėtį vėjo krypties atžvilgiu bei „Savonius“ tipo vėjo jėgainės būdingas ypatybes, įrenginio mentės suskirstomos į varomąsias bei grįžtančiąsias mentes (Sun et al., 2012).

3.3 pav. Turbininio ventiliatoriaus rotoriaus veikimo schema ir panašumas į „Savonius“ vėjo jėgainę: a) turbininio ventiliatoriaus rotorius; b) „Savonius“ vėjo jėgainės rotorius
Fig. 3.3. Operation scheme of turbine ventilator's rotor and similarity to Savonius wind turbine: a) rotor of turbine ventilator; b) rotor of Savonius wind turbine

Šiuo atveju viršutinėje 3.3 paveikslo (a) dalyje parodytos mentės yra varamosios, o žemiau esančios mentės – grįžtančiosios. Varamosios STV rotoriaus mentės sąveikaujančios su vėjo srautu, atlieka „Savonius“ tipo vėjo jėgainėms būdingą sukimo darbą $\dot{E}_t$. Šioje dalyje atidirbęs vėjo srautas $\dot{M}_{wl}$ toliau prateka į rotoriaus vidų ir dalyvauja kituose procesuose. Tuo tarpu, grįžtančiosios STV mentės atlieka priešingą efektą. Sąveikaudamos su vėjo srautu, jos stabdo STV rotoriaus sukimąsi. Be to, jų geometrinės savybės, dalį į STV rotorių pučiamo vėjo srauto $\dot{M}_{wl}$ nukreipia nuo savęs – t. y. įvyksta oro srauto aptekėjimas ir atsiskyrimas (angl. *wake*) nuo STV rotoriaus. Dėl to, šioje zonoje į STV vidų patenka daug mažesnis vėjo srautas.

Eksperimentiškai nustatyti atitrūkusio vėjo srauto dalį sudėtinga dėl sunkiai išmatuojamo oro srauto aplink STV. Pastarasis dydis priklauso nuo įrenginio geometrinės savybių, vėjo greičio bei rotoriaus sukimosi dažnio. Šiuo atveju neturint galimybių tiksliai nustatyti atitrūkusio srauto dalies, šis srautas vertinamas pastoviu dydžiu, priklausančiu nuo vėjo greičio ir nuo įrenginio geometrijos. Pateiktame termodinaminame modelyje, šiam srautui nustatyti taikomas atitrūkusio srauto dalies koeficientas k_{wl} . Remiantis šiuo koeficientu, nuo menčių atitrūkęs srautas apskaičiuojamas šia lygtimi:

$$\dot{M}_{wl} = k_{wl} \cdot \dot{M}_w. \quad (3.5)$$

Toliau detalčiau aptarkime STV menamos turbinos dalyje vykstančius termodinامينius procesus vėjo tekėjimo kryptimi. Šiuo atveju siekiant geriau

suprasti menamų komponentų poveikį įrenginio veikimui, 3.4 paveiksle pasirinkta STV vaizdavimo iš šono schema. 3.4 paveiksle pateiktos įrenginio schemos kairioji pusė, apribota skerspjūviais 1*–1* ir 1–1, vaizduoja menamos turbinos dalį. Termodinaminiam modelyje priimama, jog vėjo srauto pilnoji entalpija ties turbinos paviršiumi (skerspjūvyje 1*–1*) atitinka pilnąją vėjo entalpiją $h_{1*} = h_w$. Vėjui sukanč STV turbinos mentes atliekamas darbas $\dot{E}_t = \dot{M}_w \cdot (h_{1*} - h_1)$, todėl pratekėjus mentes mažėja vėjo srauto greitis bei tuo pačiu pilnoji entalpija ir pilnutinis slėgis.

3.4 pav. Turbininio ventiliatoriaus turbinos dalyje vykstantys termodinaminiai procesai
Fig. 3.4. Thermodynamic processes in the turbine part of a turbine ventilator

Pateiktos pirmojo termodinamikos dėsnio lygtys įvertina būsenos parametrus kontrolinio tūrio įėjime ir išėjime, tačiau neatsižvelgia į termodinaminės sistemos viduje vykstančius procesus. Energijos transformavimo metu, įrenginyje vyksta trinties ir disipacijos reiškiniai, kuriems įvertinti taikomas antrasis termodinamikos dėsnis. Siekiant akivaizdžiau parodyti sistemos viduje vykstančius procesus, negrįžtamumo reiškiniai pagal ATD įvertinami naudojant entropijos būsenos parametrus. Šiuo atveju analizuojant proceso negrįžtamumą modelyje skaičiuojamas entropijos pokytis nuo proceso pradžios iki pabaigos. Laikant oro srautą idealiomis dujomis, bendru atveju entropijos pokytis skaičiuojamas pagal šią lygtį:

$$s(T_2, P_2) - s(T_1, P_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1}, \quad (3.6)$$

čia T – absoliutinė temperatūra, K; P – absoliutinis slėgis, Pa; c_p – oro savitoji šiluma, J/(kgK); R – universalioji dujų konstanta; 1,2 – indeksai atitinkamai žymintys termodinaminio proceso pradžią ir pabaigą.

STV veikimo metu, oro srautų slėgiai labai artimi atmosferiniam slėgiui, todėl modelyje priimama $c_p = \text{const}$. Be to, įvertinus tai kad idealioms dujoms galioja temperatūros ir entalpijos ryšys $h = T \cdot c_p$, galima taikyti šią entropijos pokyčio skaičiavimo lygtį:

$$\Delta s = c_p \cdot \ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right) - \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \cdot R. \quad (3.7)$$

Srautų trintis ir ne idealiai atliekamas darbas lemia tai, kad STV vykstantys procesai yra ne izoentropiniai, todėl pagal išskirtus menamus komponentus, modelyje taikomi jiems būdingi izoentropinio efektyvumo koeficientai η . Tokių koeficientų naudojimas plačiai taikomas nagrinėjant ežektorių termodinaminius modelius. Šiuo atveju procesų komponentuose sukeliami negrįžtamumai įvertinami eksperimentinių tyrimų rezultatais arba pagal mokslinėje literatūroje nurodytus duomenis panašios konstrukcijos įrenginiams. Visais atvejais, žymėjimai su indeksu ' modelyje rodo idealų grįžtamąjį procesą, kuomet $\Delta s = 0$. Analizuojant STV turbinoje vykstančius procesus, galima sudaryti tokią procesų grįžtamumą įvertinančią išraišką:

$$\eta_t = \frac{(h_{1*} - h_1)}{(h_{1*}' - h_1')}. \quad (3.8)$$

Fizikine prasme ši išraiška reiškia, jog STV turbina veikiant idealiai ir vėjo srauto pilnutiniam slėgiui sumažėjus iki realaus proceso metu pasiekiamo slėgio P_1 – būtų galima gauti galią $\dot{E}_t' = \dot{M}_w \cdot (h_{1*}' - h_1')$, kuri būtų didesnė nei realaus veikimo atveju ($\dot{E}_t' > \dot{E}_t$).

Išmatavus turbinoje generuojamą galią bei žinant joms būdingą izoentropinį naudingumo koeficientą, pagal 3.8 lygtį nesunkiai apskaičiuojama idealaus veikimo teorinė galia ir vėjo srauto entalpija tokio proceso pabaigoje. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyti atidirbusio vėjo srauto slėgi STV viduje – sudėtinga. Tačiau įvertinus tai, kad idealaus proceso metu $\Delta s = 0$, pagal 3.9 lygtį galima apskaičiuoti vėjo srauto slėgį po turbinoje atlikto darbo:

$$P_1 = P_{1*} \cdot e^{\frac{c_p \cdot \ln\left(\frac{h_1'}{h_{1*}'}\right)}{R}}. \quad (3.9)$$

Kaip jau buvo minėta anksčiau, srautinių tekėjimo procesų analizei paranku naudoti entalpijos–entropijos diagramas, todėl 3.5 paveiksle pateikiama termodinaminį procesą STV turbinoje vaizduojanti diagrama.

3.5 pav. h - s diagrama vaizduojanti turbininio ventiliatoriaus turbinos dalyje vykstančius termodinامينius procesus

Fig. 3.5. h - s diagram of thermodynamic processes in the turbine part of a turbine ventilator

Paveiksle pavaizduotas taškas 1^* atitinka pradinį vėjo srauto būsenos parametrus. Taškas $1'$ atitinka vėjo srauto būsenos parametrų vertes esant idealiam grįžtamajam procesui. Raudona tiesė jungianti 1^* ir 1 taškus vaizduoja realų procesą STV turbinoje. Tuo tarpu, raudona punktyrinė tiesė jungianti 1^* ir $1'$ taškus rodo idealų grįžtamąjį procesą. Skaitiniai STV procesų rodikliai detalizuojame toliau esančiuose skyriuose.

3.2.2. Ežektorius termodinaminis modelis

Toliau aptarkime kituose įrenginiuose vykstančius procesus. Pagal STV viduje vykstančių procesų sąveiką toliau galima išskirti menamus ežektoriaus ir ventiliatoriaus komponentus. Tačiau prieš pradedant šių komponentų analizę, daugiau įvertinkime reiškinius, kurie vyksta STV oro siurbimo kanale.

Siurbimo metu, patalpoje esančiam srautui lėtai judant (dėl didelio patalpos tūrio) į oro ištraukimo kanalą, keičiasi tekėjimo skerspjūvio plotas, todėl šis siurbiamas oro srautas kanale pagreitėja iki greičio v_e . Priklausomai nuo siurbiamo oro srauto tekėjimo greičio, idealiu atveju siurbimo kanale esančio oro srauto pilnoji entalpija ir dinaminis slėgis nustatomas šiomis lygtimis:

$$h'_e = h_0 + \frac{v_e^2}{2}; \quad (3.10)$$

$$P'_{de} = \frac{\rho \cdot v_e^2}{2}. \quad (3.11)$$

Idealiu atveju pilnutinis siurbiamo oro srauto slėgis priklausytų tik nuo dinaminio slėgio pokyčio. Tačiau įrenginiui veikiant realiomis sąlygomis, ruože nuo siurbimo kanalo įtekėjimo angos iki ištekėjimo yra aerodinaminis pasipriešinimas. Šis reiškinys vertinamas kaip disipacija ir gali būti įvertintas kiekybiškai. Įvertinus aerodinaminio pasipriešinimo nuostolius, pilnutinis siurbiamo oro srauto slėgis bei pilnoji entalpija reikiamam srautui pasiekti atitinkamai lygūs:

$$P_{te} = P_a + \zeta \cdot P_{de} = P_a + \zeta \cdot \frac{\rho \cdot v_e^2}{2}; \quad (3.12)$$

$$h_e = h_0 + \zeta \cdot \frac{v_e^2}{2}. \quad (3.13)$$

Vertinant STV konstrukciją bei veikimo principą oro siurbimo metu, šiame darbe pristatytų eksperimentinių rezultatų dalyje nustatyta, jog įrenginys pasižymi ežektoriaus (3.2 pav. b) ir išcentrinio ventiliatoriaus (3.2 pav. c) savybėmis.

Ežektorius, veikimo prasme dažnai suprantamas kaip įrenginys, kuriame aukšto slėgio fluidas (įvardinamas kaip aktyvus srautas) naudojamas pasiurbti žemesnio slėgio fluidą (įvardinamas kaip pasyvus srautas). Dėl šlyties jėgų tarp judančio fluido ir aplinkinio nejudančio fluido, dalis aktyvaus fluido kinetinės energijos yra perduodama nejudančiam (pasyviam) fluidui, tokiu būdu sukuriant ežekcijos efektą. Nagrinėjamo įrenginio atveju tai atitinka į rotoriaus vidų patekusį vėjo srautą, kuris dėl savo tekėjimo greičio virš STV siurbimo kanalo sukuria žemo slėgio zoną ir iš jo pasiurbia patalpos orą.

Toliau esančiame 3.6 paveiksle pateikiama principinė schema rodanti STV panašumą į ežektorių. Šio paveikslo dešinėje pusėje parodyta ežektoriaus schema, kurios pagrindiniai komponentai yra tūta, sumaišymo kamera ir difuzorius. Remiantis šia analogija, tūtą atitinka STV rotoriaus kairioji pusė, nuo 1–1 iki 2–2 skerspjuvių, maišymosi daliai priskiriama centrinė zona, apribota 2–2, 3–3 bei 4–4 skerspjuviais, o difuzorius atitinka dešiniąją STV rotoriaus dalį nuo 4–4 iki 6–6 skerspjuvių.

Pagal siurbiamų srautų prigimtį, ežekcijos ir STV rotoriaus procesų sąveika panaši į lygiagrečiai sujungtų ventiliatorių veikimą. Anksčiau pristatomuose eksperimentiniuose tyrimuose nustatyta, kad STV apytiksliai pusę ištraukiamo

oro srauto pasiurbia dėl ežekcijos reiškinių ($\dot{M}_{ej}$), o likusią dalį prideda STV rotorius sukimasis ($\dot{M}_r$).

3.6 pav. Turbininio ventiliatoriaus termodinaminių srautų schema ir veikimo principo panašumas į ežektorį: a) turbininio ventiliatoriaus schema; b) ežektoriaus schema

Fig. 3.6. The scheme of thermodynamic flows of a turbine ventilator and similarity to ejector: a) scheme of turbine ventilator; b) scheme of ejector

Šiuo atveju atsižvelgiant į tokį oro srautų pasiskirstymą, modelyje įvedamas ežektuojamo oro srauto koeficientas k_{ej} , kuris priklauso tik nuo STV konstrukcinių ypatumų ir yra nustatomas eksperimentiškai. Kiekybiškai įvertinus ežektuojamo ir STV rotoriumi pasiurbiamų srautų pasiskirstymą, ežekcijos metu siurbiamo oro srauto vidutinis greitis įtekėjimo kanale nustatomas pagal šią lygtį:

$$v_{ej} = k_{ej} \cdot v_e. \quad (3.14)$$

Siurbiamam oro greičiui pasiekti reikalingas pilnutinio slėgio pokytis, remiantis 3.12 lygtimi:

$$\Delta P_{tej} = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot v_{ej}^2}{2}. \quad (3.15)$$

Toliau detaliau aptarkime STV ežektoriaus dalyje vykstančius termodinaminius procesus vėjo tekėjimo kryptimi. Šiame modelio priimama, jog vėjo srauto pilnoji entalpija ties ežektoriaus zona (skerspjūvis 1–1), atitinka pilnąją vėjo srauto entalpiją po atlikto darbo turbinoje h_1 . Vėjo srautas esantis STV rotorius viduje pasiurbdamas patalpos orą ežekcijos metu atlieka darbą:

$$\dot{E}_{ej} = \dot{M}_{wi} \cdot (h_1 - h_2). \quad (3.16)$$

Analogiškai turbinos veikimui, ežekcijos proceso metu vyksta oro srautų trintis, todėl šis procesas yra negrįžtamas. Šiuo atveju modelyje taikomas izoentropinio efektyvumo koeficientas, kuris parenkamas atsižvelgiant į mokslinėje literatūroje nurodytus duomenis panašios konstrukcijos ežektoriams. Analizuojant STV ežektoriuje vykstančius procesus, sudaroma tokia procesų grįžtamumą įvertinanti lygybė:

$$\eta_{ej} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_2')} \quad (3.17)$$

Toliau esančiame 3.7 paveiksle pateikiama termodinaminį ežekcijos procesą vaizduojanti entalpijos–entropijos diagrama.

3.7 pav. *h-s* diagrama vaizduojanti turbininio ventiliatoriaus ežektoriaus dalyje vykstančius termodinامينius procesus

Fig. 3.7. *h-s* diagram of thermodynamic processes in the ejector part of a turbine ventilator

Diagramoje pavaizduotas taškas 1 atitinka vėjo srauto pilnosios entalpijos vertę prieš ežekciją, taškas 2 rodo vėjo srauto būsenos parametrus po ežekcijos proceso metu perduotos energijos, o taškas 2' vaizduoja vėjo srauto būsenos parametrus esant idealiam grįžtamajam procesui. Pradiniai patalpos oro būsenos parametrai prieš siurbimą pavaizduoti tašku 0. Siekiant detalizuoti procesus, toliau pateiktas papildomas 3.8 paveikslas, kuriame vaizduojama tik aktyvaus vėjo srauto procesų seka.

3.8 pav. Ežektoriaus h - s diagramos detalizacija

Fig. 3.8. Detailing of ejector's h - s diagram

Čia atkreipiamas dėmesys, jog visose pristatomo termodinaminio modelio diagramose vaizduojami procesai pateikti proporcingai atsižvelgiant į STV siurbiamo oro debitą. Kadangi vėjo ir siurbiamo oro srautų debitai nevienodi – šie rezultatai kiekvieno įrenginio atveju skiriasi.

Remiantis pateiktais grafikai matoma, jog ežekcijos metu, aktyvaus vėjo srauto suteikta energija E_{ej} pasyviai patalpos oro srautui vaizduojama procesu 0–3. Modelyje, taip pat taikomas izoentropinis srauto suspaudimo koeficientas η_{ej} , kurio skaitinė vertė atvirkščiai proporcinga STV aerodinaminio pasipriešinimo koeficientui. Šiuo atveju esant idealiam oro suspaudimui (oro

siurbimo metu), reikiamam oro debitui palaikyti pakaktų tik dinaminio slėgio pokyčio ΔP_{dej} , tačiau realaus proceso metu, dėl STV susidarančių slėgio nuostolių, reikia užtikrinti slėgį ΔP_{tej} . Todėl, izoentropinis oro siurbimo koeficientas atitinkamai lygus:

$$\eta_{ejs} = \frac{\Delta P_{dej}}{\Delta P_{tej}} = \frac{\Delta P_{dej}}{\zeta \cdot \Delta P_{dej}} = \frac{1}{\zeta}. \quad (3.18)$$

3.7 paveikslo diagramoje pavaizduotas taškai 3' ir 3 atitinka oro siurbimui reikalingo dinaminio slėgio pokytį ΔP_{dej} , tačiau dėl susidarančių slėgio nuostolių, pasislinkęs į dešinę pusę taškas 3 rodo entropijos priaugį bei didesnę reikiamą pilnąją entalpiją. Atitinkamai, izoentropinį oro siurbimo koeficientą galima užrašyti šia lygtimi:

$$\eta_{ejs} = \frac{(h'_3 - h_0)}{(h_3 - h_0)}. \quad (3.19)$$

Fizikine prasme ši išraiška reiškia, jog ežekcijos metu idealiai siurbiant patalpos oro srautą, tam pačiam oro kiekiui ištraukti užtektų mažesnio energijos kiekio, todėl galioja sąlyga $\dot{E}_{ejs} > \dot{E}'_{ejs}$. Įvertinus ežekcijos proceso metu aktyvaus vėjo srauto suteiktą galią, modelyje galioja lygybė:

$$\dot{E}_{ejs} = \dot{E}_{ej} = \dot{M}_{ej} \cdot (h_3 - h_0). \quad (3.20)$$

Darbe atliktų eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad vėjo ir siurbiamo srauto masinių debitų santykis yra didesnis nuo 4 iki 6 kartų. Dėl šios priežasties, vaizduojant aktyvaus vėjo srauto ir ežektuojamo patalpos oro srauto entalpijos pokyčius, galima pastebėti atitinkamus galutinių entalpijos verčių pokyčius. Visais atvejais, diagramose pastebimas mažesnis vėjo srauto entalpijos pokytis lyginant su pasiurbto oro entalpijos pokyčiu.

Ežekcijos metu, STV siurbimo kanalu tekantis oro srautas toliau patenka į 2–2, 3–3 bei 4–4 skerspjūviais apribotą rotoriaus dalį. Šioje įrenginio dalyje vyksta skirtingų būsenos parametrų, vėjo ir siurbiamo oro fluidų maišymasis. Įvertinus masinių debitų skirtumus bei šių srautų entalpijos vertes, 3.7 paveikslo diagramoje šis maišymosi procesas vaizduojamas galutiniu tašku 4, bei proceso kryptį rodančiomis tiesėmis 2–4 ir 3–4. Proceso galutiniai entalpijos ir entropijos būsenų parametrai, pagal proporcijas atitinkamai apskaičiuojami šiomis lygtimis:

$$h_4 = \frac{\dot{M}_{wi} h_2 + \dot{M}_{ej} h_3}{\dot{M}_{wi} + \dot{M}_{ej}}; \quad (3.21)$$

$$s_4 = \frac{\dot{M}_{wi}s_2 + \dot{M}_{ej}s_3}{\dot{M}_{wi} + \dot{M}_{ej}}. \quad (3.22)$$

Šie maišymosi proceso būsenos parametrai toliau naudojami nagrinėjant kitus STV vykstančius procesus.

3.2.3. Ventiliatorius termodinaminis modelis

Kaip jau buvo minėta, eksperimentiškai nustatyta, jog STV oro siurbimas priklauso nuo ežektoriams ir ventiliatoriams būdingų procesų. Vertinant pastarojo veikimo ypatybes, STV turi esminių konstrukcinių panašumų į rinkoje egzistuojančius stoginius elektra varomus ventiliatorius. Veikimo prasme, tokie įrenginiai panašūs į išcentrinus ventiliatorius be mentes dengiančio išorinio korpuso, todėl ištraukiamas oras į aplinką išteka tarp menčių esančiais tarpais. Toliau esančiame 3.9 paveiksle pateikiama principinė schema rodanti STV panašumą į stoginį ventiliatorių.

3.9 pav. Menamo ventiliatoriaus komponento termodinaminių srautų schema bei panašumas į elektrinį stoginį ventiliatorių: a) menamo ventiliatoriaus schema; b) elektrinio stoginio ventiliatoriaus nuotrauka

Fig. 3.9. Thermodynamic flows scheme of the hypothetical ventilator and its similarity to an electric rooftop ventilator: a) scheme of the hypothetical ventilator; b) picture of an electric rooftop ventilator

Siekiant geriau atskleisti ežektoriaus ir ventiliatoriaus sąveikinį ryšį STV veikimo metu, visų pirma panagrinėkime ištraukiamo oro charakteristikų kitimą įrenginyje. Remiantis eksperimentinių tyrimų duomenimis, 3.10 paveiksle grafiškai pateikiama STV veikimą charakterizuojanti ištraukiamo srauto ir statinio slėgio priklausomybė.

3.10 pav. Turbininio ventiliatoriaus sukuriama debito ir statinio slėgio charakteristikų palyginimas su ežektoriumi

Fig. 3.10. Comparison of created flow and static pressure characteristics of a turbine ventilator with an ejector

Grafike pateikta kylanti brūkšninė kreivė vaizduoja įrenginio statinio slėgio priklausomybę nuo siurbimo kanalo skerspjūvyje 0–0 tekančio oro greičio. Literatūroje ši priklausomybė dažnai įvardinama tinklo charakteristika (angl *system curve*). Šiuo atveju pateiktos kreivės statinio slėgio nustatymui pakanka žinoti STV aerodinaminį pasipriešinimą ir siurbiamo oro greitį kanale:

$$P_{se} = \Delta P_{te} - P_{de} = \zeta \frac{\rho \cdot v_e^2}{2} - \frac{\rho \cdot v_e^2}{2} = \frac{\rho \cdot v_e^2}{2} (\zeta - 1). \quad (3.23)$$

Grafiko apatinė žemėjanti kreivė vaizduoja STV menamo ežektoriaus eksperimentiškai nustatytas charakteristikas. Pateikta charakteristika nustatoma eksperimentų būdu, mechanškai sustabdant STV rotorį. Kaip jau buvo minėta, eksperimentų metu pastebėta, jog sustabdžius STV rotorį ištraukiamo oro debitas sumažėja apie 2 kartus. Statinis slėgis nesiurbiant oro srauto (pagal ventiliatorių analogiją – veikiant tuščia eiga) atitinka maksimalų sukuriamą ežektoriaus statinį slėgį. Pastarasis rodiklis nustatomas eksperimentiškai, uždariant oro siurbimo kanalą (EN 13141-5, 2004).

Įvertinus STV tinklo charakteristiką bei nustatytą ežektoriaus debito ir statinio slėgio funkcinę priklausomybę, gaunamas šių kreivių susikirtimo taškas. Šis susikirtimo taškas atitinka STV veikimo parametrus (darbo tašką) tik dėl ežekcijos reiškinio.

Viršutinė žemėjanti kreivė rodo STV, veikiančio įprastu režimu, eksperimentiškai nustatytas debito ir slėgio charakteristikas. Analogiškai ežektoriaus atvejui, tinklo ir STV charakteristikų kreivių susikirtimo taškas rodo įrenginio darbo režimo parametrus. Abiem atvejais, vertinant ežektoriaus ir STV įprasto veikimo susikirtimo taškus, grafiškai galima nustatyti oro siurbimo procesui reikalingas galias. Iš susikirtimo taškų išvestos statmenos tiesės (juodos brūkšninės linijos) į abscisių ir ordinačių ašis riboja plotus, kurie atitinka teorines ežektoriaus ir STV generuojamas galias. Remiantis ventiliatorių skaičiavimo teorija, teorinė galia reikiamam oro srautui ištraukti iš patalpos nustatoma lygtimi:

$$\dot{E}_Q = \Delta P_{te} \cdot \dot{Q}_e = \frac{\xi \cdot \rho_a \cdot v_e^3 \cdot A_i}{2}, \quad (3.24)$$

čia ΔP_{te} – reikiamas pilnutinio slėgio skirtumas ištraukiant oro srautą; $\dot{Q}_e$ – ištraukiamo oro debitas, m^3/s .

Grafiškai ir pagal 3.24 lygtį akivaizdžiai matoma, jog dėl didėjančio oro greičio siurbimo kanale, sparčiai didėja statinis slėgis. Todėl, STV skerspjuvyje 0–0 padvigubėjus oro siurbimo debitui, įrenginys turi užtikrinti 8 kartus didesnę galią.

Eksperimentiškai nustatyti debito ir sukuriama slėgio charakteristikas STV veikiant tik dėl rotorius poveikio – sudėtinga. Šiuo atveju tyrime buvo atlikti bandymai STV rotorius sukančiam papildomai energijos šaltiniu be vėjo srauto ir palaikant įprasto veikimo metu atitinkantį sukimosi dažnį. Kaip jau buvo minėta ankstesniame skyriuje, eksperimentų rezultatai parodė, jog įrenginį sukančiam vienodu dažniu be vėjo srauto, ištraukiamo oro debitas yra mažesnis apie 30 % lyginant su įprastu STV veikimu.

Pristatytų skirtingų bandymų sąlygų rezultatai akivaizdžiai parodė, jog STV pasižymi ežektoriumi ir ventiliatoriumi būdingomis savybėmis. Siekiant įvertinti STV menamo ventiliatoriaus poveikį, modelyje priimama, jog ventiliatoriaus dedamoji atitinka skirtumą tarp STV charakteristikų įprasto veikimo metu ir eksperimentiškai nustatytų ežektoriaus charakteristikų. Remiantis šia prielaida, STV rotorius sukimas prideda likusią pilnutinio slėgio dalį:

$$\Delta P_{tr} = \Delta P_{te} - \Delta P_{tej} = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot v_e^2}{2} - \zeta \cdot \frac{\rho \cdot v_{ej}^2}{2} = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot v_e^2 \cdot (1 - k_{ej}^2)}{2}. \quad (3.25)$$

Detaliau nagrinėjant 3.10 paveiksle matomą ežektoriaus ir ventiliatoriaus tarpusavio sąveiką galima pastebėti ventiliatorių teorijoje pateiktą nuoseklaus ir lygiagretaus įrenginių jungimo panašumą. Šiuo atveju, pagal teorijoje pateiktą analogiją, ežektorius ir ventiliatorių galima vertinti kaip skirtingas veikimo charakteristikas turinčius įrenginius. Mokslinėje literatūroje nurodoma, jog esant nuosekliam įrenginių jungimui, rezultatyvi charakteristika atitinka šių atskirų

įrenginių statinių slėgių sumą. Tuo tarpu, įrenginius sujungus lygiagrečiai, bendra charakteristika nustatoma sudedant debitus. Remiantis šiais principais matoma, kad ežektoriaus ir ventiliatoriaus sąveika pasižymi abiemis jungimo būdams būdingomis savybėmis. Tačiau kiekybiškai vertinant statinio slėgio ir debito pokyčius, pastebimas didesnis lygiagrečiam jungimui būdingas poveikis.

Toliau detaliau aptarkime STV ventiliatoriaus dalyje vykstančius termodinامينius procesus vėjo tekėjimo kryptimi. Modelyje suskirstyti menami ventiliatorius ir turbina pagal savo konstrukciją yra tas pats įrenginys, todėl oro siurbimo metu vyksta tiesioginė šių įrenginių tarpusavio sąveika. Šis veikimo ryšys reiškia, kad turbinoje generuojama galia yra lygi ventiliatoriaus galiai $\dot{E}_r = \dot{E}_t$. 3.11 paveiksle pateikiama ventiliatoriaus termodinaminį suspaudimo procesą vaizduojanti entalpijos–entropijos diagrama.

3.11 pav. h - s diagrama vaizduojanti menamo ventiliatoriaus dalyje vykstantį termodinaminį suspaudimo procesą

Fig. 3.11. h - s diagram of thermodynamic compression process in the hypothetical ventilator

Diagramoje pavaizduotas taškas 5 atitinka ventiliatoriumi siurbiamo oro srauto būsenos parametrus, o taškas 5' vaizduoja šio srauto būsenos parametrus esant idealiam grįžtamajam procesui. Pradiniai patalpos oro būsenos parametrai

prieš siurbimą atitinka ežektoriaus nagrinėjamame atvejuje pavaizduotiems parametrams ir schemoje pavaizduoti tašku 0.

Ventiliatoriaus veikimo metu siurbiamam patalpos oro srautui suteikta energija $\dot{E}_r$ vaizduojama procesu 0–5. Šiam procesui, taip pat taikomas izoentropinis srauto suspaudimo koeficientas η_r . Kadangi STV ežektorių ir ventiliatorių sieja tarpusavio konstrukcinis ryšys, jų izoentropiniai srauto suspaudimo koeficientai laikomi vienodais. Todėl, STV ventiliatoriaus izoentropinio koeficiento skaitinė vertė atvirkščiai proporcinga STV aerodinaminio pasipriešinimo koeficientui:

$$\eta_r = \eta_{ejs} = \frac{1}{\zeta}. \quad (3.26)$$

3.11 paveikslo diagramoje pavaizduoti taškai 5' ir 5 atitinka oro siurbimui reikalingo dinaminio slėgio pokytį ΔP_r , tačiau dėl susidarančių slėgio nuostolių, pasislinkęs į dešinę pusę taškas 5 rodo entropijos priaugį bei didesnę suspaudimo procesui reikiamą pilnąją entalpiją. Atitinkamai, izoentropinį oro suspaudimo koeficientą galima užrašyti šia lygtimi:

$$\eta_r = \frac{(h'_5 - h_0)}{(h_5 - h_0)}. \quad (3.27)$$

Fizikine prasme ši išraiška reiškia, jog ventiliatoriui idealiai suspaudžiant patalpos oro srautą, tam pačiam oro kiekiui ištraukti užtektų mažesnės energijos kiekio, todėl galioja sąlyga $\dot{E}_r > \dot{E}'_r$. Įvertinus menamo ventiliatoriaus komponento suteiktą galią, modelyje galioja lygybė:

$$\dot{E}_r = \dot{M}_r \cdot (h_5 - h_0). \quad (3.28)$$

STV ventiliatoriumi siurbimas oro srautas tekėdamas kanalu toliau patenka į 4–4, 5–5 bei 6–6 skerspjūviais apribotą rotoriaus dalį. Šioje įrenginio dalyje vyksta skirtingų būsenos parametrų, vėjo, ežekcijos ir ventiliatoriumi siurbiamo oro maišymasis. Šiuo atveju priimama prielaida, jog STV veikimo metu visų pirma įvyksta ežekcijos ir vėjo srautų maišymasis, o po to šis mišinys maišosi su ventiliatoriaus pasiurbtu oru.

Įvertinus oro srautų masinių debitų skirtumus bei entalpijos vertes, 3.11 paveikslo diagramoje galutinis maišymosi procesas vaizduojamas tašku 6 bei šių procesų kryptį rodančiomis tiesėmis 4–6 ir 5–6. Proceso galutiniai entalpijos ir entropijos būsenų parametrai, pagal masinių debitų santykius atitinkamai apskaičiuojami šiomis lygtimis:

$$h_6 = \frac{(\dot{M}_{wi} + \dot{M}_{ej})h_4 + \dot{M}_r h_5}{\dot{M}_{wi} + \dot{M}_{ej} + \dot{M}_r}; \quad (3.29)$$

$$s_6 = \frac{(\dot{M}_{wi} + \dot{M}_{ej})s_4 + \dot{M}_r s_5}{\dot{M}_{wi} + \dot{M}_{ej} + \dot{M}_r}. \quad (3.30)$$

Modelyje šie maišymosi proceso būsenos parametrai pateikiami kaip galutinis STV procesas.

3.3. Menamų turbininio ventiliatoriaus komponentų veikimą integruojantis termodinaminis modelis

Šiame poskyryje pateikiamas integruojantis termodinaminis modelis, kuris yra sudarytas pagal anksčiau pristatytą trikomponentę STV koncepciją. Šiuo atveju, remiantis atskirų komponentų termodinaminiais modeliais, sudaromas bendras STV modelis bei pateikiami analitiniai tokio modelio taikymo pavyzdžiai. Taip pat, šiame skyriuje pateikiama metodika įrenginių teorinio efektyvumo vertinimui.

3.3.1. Turbininio ventiliatoriaus menamų komponentų tarpusavio sąveikos rezultatas

Detalūs STV eksperimentiniai tyrimai ir jų pagrindu sudaryti atskirų komponentų skaitiniai modeliai, atvėrė galimybę energijos ir oro srautų balansų pagrindu integruoti anksčiau pristatytus komponentus į vieningą sistemą. Remiantis anksčiau pristatyta atskirų STV komponentų koncepcija, šioje dalyje detalizuojamas sudarytas integralus STV termodinaminis modelis.

Kaip jau buvo minėta, termodinaminis modelis sudaromas remiantis prielaida, jog oro srautų sąveikos procesai vyksta nuosekliai. Siekiant geriau suprasti STV vykstančių procesų eigą, 3.12 paveiksle pateikiama integrali turbino, ežektoriaus ir ventiliatoriaus procesų principinė schema.

3.12 pav. Integrali turbininio ventiliatoriaus turbinos, ežektoriaus ir ventiliatoriaus termodinaminių srautų schema

Fig. 3.12. Integral scheme of thermodynamic flows of turbine ventilator's turbine, ejector and ventilator

Analizuojant pateiktą schemą, matoma kad STV veikimo metu vyksta šie termodinaminiai procesai:

1*–1 proceso metu vėjo srautas veikdamas įrenginio turbiną atlieka darbą, kuris yra tapatus STV ventiliatoriaus atliekamam darbui. Taip pat matoma, kad po sąveikos su rotoriumi, dalis vėjo srauto atitrūksta nuo rotoriaus.

1–2 proceso metu į STV rotoriaus vidų patekęs vėjo srautas toliau dalyvauja ežekcijos procese. Pasiurbdamas patalpos orą, vėjo srautas priskiriamas aktyviam srautui. Ežekcijos proceso metu, vėjo srauto energija naudojama oro ištraukimui iš patalpos.

0–3 procesas rodo patalpos oro siurbimą dėl vykstančios ežekcijos.

2–4 ir 3–4 procesai vaizduoja vėjo srauto ir ežekcijos metu pasiurbto oro srauto maišymąsi.

0–5 procesas rodo STV ventiliatoriaus atliekamą patalpos oro siurbimą.

4–6 ir 5–6 procesų metu įvyksta galutinis procesas, kurio metu maišosi ventiliatoriaus pasiurbtas oras su vėjo srauto ir ežekcija pasiurbto oro mišiniu.

Šių termodinaminių procesų vaizdavimas h -s diagramoje pateiktas 3.13 paveiksle.

Pagal pateiktą STV vykstančių procesų seką galima pastebėti, jog termodinaminio modelio sudarymui būtina žinoti vėjo srauto galią tenkančią STV rotoriumi. Tai galima nustatyti eksperimentiškai, tačiau esant kompleksiniams oro srautų procesams, toks būdas būtų sudėtingas dėl ribotų galimybių atskirti vėjo ir ištraukiamo oro srautus. Šiuo atveju modelyje pasitelkiama energijos balanso lygtis:

$$\dot{M}_w \cdot (h_{1*} - h_0) \cdot \eta_t \cdot \varepsilon_t = \dot{M}_r \cdot (h_5 - h_0), \quad (3.31)$$

čia ε_t – vėjo srauto energijos dalis tenkanti STV rotorui, vnt.

Pateikta balanso lygtis rodo menamų STV turbinos ir ventiliatoriaus funkcinę priklausomybę. Pagal lygties išraišką matoma, jog siurbiamam oro srautui suteikiama ventiliatoriaus galia taip pat tiesiogiai priklauso nuo turbinos izoentropinio naudingumo koeficiento. Pastarasis rodiklis šiame modelyje laikomas konstanta, kuri nustatoma eksperimentiškai arba imama iš mokslinės literatūros.

Kitas kintamasis būtinas termodinaminio modelio sudarymui – rotoriaus viduje esančio vėjo srauto galia tenkanti ežekcijai. Šiuo atveju modelyje taip pat pasitelkiama energijos balanso lygtis:

$$\dot{M}_w \cdot k_{wl} \cdot (h_{1*} - h_0) \cdot (1 - \eta_r \cdot \eta_t) \cdot \eta_{ej} \cdot \varepsilon_{ej} = \dot{M}_{ej} \cdot (h_3 - h_0), \quad (3.32)$$

čia ε_{ej} – vėjo srauto energijos dalis tenkanti STV ežektorui, vnt.

Pateikta balanso lygtis rodo menamo STV ežektoriaus aktyvaus ir pasyvaus srautų funkcinę priklausomybę. Pagal lygties išraišką matoma, jog ežekcijos metu siurbiamam oro srautui suteikiama galia taip pat tiesiogiai priklauso nuo ežektoriaus izoentropinio naudingumo koeficiento. Be to, įvertinama į rotoriaus vidų patenkanti likusi vėjo srauto dalis ir galia.

Pagal aukščiau pateiktas energijos balanso lygtis matoma, jog atlikus oro srautų siurbimą ežektoriumi ir ventiliatoriumu, modelio sprendimui taip pat būtina žinoti entalpijas šių procesų pabaigoje. Tam pasitelkiamos dar dvi energijos balanso lygtys. Pirmoji papildoma lygtis sudaroma menamų ežektoriaus ir ventiliatoriaus srautams suteiktų galių balansui, kuris išreikštas eksperimentiškai nustatytu STV siurbiamo oro srauto efektyvumu:

$$\dot{M}_r \cdot (h_5 - h_0) + \dot{M}_{ej} \cdot (h_3 - h_0) = \dot{M}_w \cdot (h_{1*} - h_0) \cdot \varepsilon_Q, \quad (3.33)$$

čia ε_Q – įrenginio oro ištraukimo efektyvumas. Apskaičiuojamas įvertinus santykį tarp teorinės oro ištraukimui reikalingos galis ir STV tenkančios vėjo srauto galios:

$$\varepsilon_Q = \frac{\dot{E}_Q}{\dot{E}_w} = \frac{\zeta \cdot \rho \cdot v_e^3 \cdot A_t}{\rho \cdot u^3 \cdot A_{ve}}, \quad (3.34)$$

čia $\dot{E}_Q$ – teorinė ventiliatoriaus galia oro srauto ištraukimui, W; $\dot{E}_w$ – teorinė vėjo galia tenkant STV rotorui, W.

Antroji papildoma energijos balanso lygtis apibrėžia menamą STV turbinos ir ežektoriaus teorinių galių pasiskirstymo balansą:

$$\dot{M}_r \cdot (h_5 - h_0) = k_{pr} \cdot \dot{M}_{ej} \cdot (h_3 - h_0), \quad (3.35)$$

čia k_{pr} – STV rotoriumi siurbiamo oro srauto ir ežektuojamo oro srauto santykis. Nustatoma pagal eksperimentinių tyrimų duomenis:

$$k_{pr} = \frac{\dot{E}_r}{\dot{E}_{ej}} = \frac{\dot{E}_Q - \dot{E}_{ej}}{\dot{E}_{ej}} = \frac{\dot{E}_Q}{\dot{E}_{ej}} - 1 = \frac{1}{k_{ej}^3} - 1, \quad (3.36)$$

čia $\dot{E}_r$ – STV rotoriumi siurbiamo oro srautui reikalinga galia, W; $\dot{E}_{ej}$ – STV ežekcijai reikalinga galia, W.

Remiantis pateiktomis energijos balanso lygtimis, modelio sprendimui sudaroma lygčių sistema:

$$\begin{cases} \dot{M}_w \cdot (h_{1*} - h_0) \cdot \eta_t \cdot \varepsilon_t = \dot{M}_r \cdot (h_5 - h_0) \\ \dot{M}_w \cdot k_{wl} \cdot (h_{1*} - h_0) \cdot (1 - \eta_r \cdot \eta_t) \cdot \eta_{ej} \cdot \varepsilon_{ej} = \dot{M}_{ej} \cdot (h_3 - h_0) \\ \dot{M}_r \cdot (h_5 - h_0) + \dot{M}_{ej} \cdot (h_3 - h_0) = \dot{M}_w \cdot (h_{1*} - h_0) \cdot \varepsilon_Q \\ \dot{M}_r \cdot (h_5 - h_0) = k_{pr} \cdot \dot{M}_{ej} \cdot (h_3 - h_0) \end{cases} \quad (3.37)$$

Atlikus šios lygčių sistemos sprendimą nustatyta, jog modeliui reikalingi parametrai gali būti apskaičiuojami šiomis formulėmis:

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_Q \cdot k_{pr}}{\left(\eta_t (1 + k_{pr}) \right)}; \quad (3.38)$$

$$\varepsilon_{ej} = \frac{\varepsilon_Q}{k_{wl} \cdot \eta_{ej} (1 + k_{pr} \cdot (1 - \varepsilon_Q))}; \quad (3.39)$$

$$h_3 = h_0 + \frac{\dot{M}_w \cdot \varepsilon_Q \cdot (h_w - h_0)}{\dot{M}_{ej} (1 + k_{pr})}; \quad (3.40)$$

$$h_5 = h_0 + \frac{\dot{M}_w \cdot \varepsilon_Q \cdot k_{pr} \cdot (h_w - h_0)}{\dot{M}_r (1 + k_{pr})}. \quad (3.41)$$

įrenginiu pratekantis oro srautas turi turėti pakankamai energijos išteklėjimui iš STV vidaus. Vertinant maksimalų vėjo srauto energijos panaudojimą remiamasi vėjo jėgainėse taikoma teorine Betzo kriterijaus riba. Termodinaminiam modelyje priimama, jog esant maksimaliam įrenginio efektyvumui, teoriškai vėjo srauto energija gali sumažėti ne daugiau 59,3 %. Šiuo atveju 3.13 paveiksle nubrėžta horizontali brūkšninė tiesė atitinka Betzo kriterijaus ribą, kuri rodo visų STV viduje susimaišiusių oro srautų teorinę būsenos parametų ribą.

Remiantis šio atvejo rezultatais nustatyta, jog iš įrenginio ištekančio oro srauto energija sumažėja 25,7 % (diagramoje žymima „Naudojama energija“), palyginus su pradine vėjo srauto energija. Tuo tarpu, įvertinus Betzo kriterijaus ribą, nepanaudotos energijos potencialas siekia 33,6 % (diagramoje žymima „Likutinis energijos potencialas“).

3.3.2. Teorinis turbininių ventiliatorių efektyvumo palyginimas

Pasitelkus pristatytą termodinaminį modelį, atliekamas bandytų STV rezultatų skaičiavimas. Šiuo atveju taikant modelį siekiama įvertinti skirtingų STV komponentų efektyvumo rodiklius. Atliekant analizę remiamasi eksperimentinių tyrimų duomenimis, o modeliui reikalingi izoentropiniai ir atitrūkusio vėjo srauto dalies koeficientai priimami lygūs anksčiau pristatytam skaitiniam atvejui. 3.1 lentelėje pateikiama modelio analizėje naudojamų kintamųjų suvestinė.

3.1 lentelė. Termodinaminio modelio analizėje naudojami kintamieji

Table 3.1. Variables used in the analysis of the thermodynamic model

Modelio kintamieji	Įrenginys		
	STV1	STV2	STV3
u , m/s	9,2	9,2	9,2
Q_e , m ³ /h	116	171	183
A , m ²	0,022	0,019	0,027
d_i , m	0,128	0,118	0,15
ζ	2,42	1,31	2,65
k_{ej}	0,59	0,43	0,65
k_{wt}	0,7	0,7	0,7
η_t	0,8	0,8	0,8
η_{ej}	0,8	0,8	0,8

Modeliavimo metu siekiama nustatyti kokia vėjo srauto energijos dalis tenka STV rotoriumi bei ežektoriumi. Šiuo atveju tam taikomi ir skaičiuojamieji rodikliai. Taip pat, parengtas termodinaminis modelis leidžia įvertinti bendrą vėjo srauto energijos naudojimo efektyvumą:

$$\varepsilon_w = \frac{h_{1*} - h_6}{h_{1*} - h_0}. \quad (3.42)$$

3.14 paveiksle pateikiamas skirtingų įrenginių efektyvumo rodiklių palyginimas.

3.14 pav. Bandytų turbininių ventiliatorių efektyvumo rodiklių palyginimas

Fig. 3.14. Comparison of tested turbine ventilators efficiency indicators

Pristatytas termodinaminis modelis atveria galimybę įvertinti STV komponentų įtaką įrenginyje vykstantiems procesams, jų veikimo tobulinimui ir bendrajam STV efektyvumui gerinti. Remiantis atliktų skaičiavimų duomenimis matoma, jog visais atvejais didesnė vėjo srauto energijos dalis tenka STV ventiliatoriui. Lyginant bandytus STV, geriausiai vėjo energiją išnaudoja STV2 įrenginio rotorius, o mažiausia dalis tenka STV1 rotoriumi. Taikant termodinaminį modelį apskaičiuota, jog STV1 rotorius sunaudoja 2,9 % vėjo energijos, atitinkamai STV2 ir STV3 šie rodikliai siekia 9,1 % ir 4,8 %.

Vertinant įrenginių ežektorių komponentus matoma, kad didžiausia aktyvaus vėjo srauto energija naudojama STV3 įrenginyje, o STV1 ir STV2 šie rodikliai yra panašūs. Šiuo atveju STV1, STV2, STV3 ežekcijai tenkanti vėjo srauto energijos dalis atitinkamai siekia 1,1 %, 1,2 % ir 2,7 %. Apskaičiavus nustatyta, jog bandytų STV vėjo energijos naudojimo pasiskirstymas yra skirtingas. Lyginant rezultatus tarpusavyje, matoma, kad tobulinant įrenginius vertėtų

atsižvelgti į STV1, STV3 rotorių konstrukciją. Tuo tarpu siekiant pagerinti STV2 efektyvumą, pastebimas ežektoriaus komponento tobulinimo potencialas.

Analizuojant bendrąjį vėjo srauto energijos naudojimo efektyvumą matoma, kad STV2 įrenginys rodo geriausią rezultatą, o STV1 – blogiausią. Šiuo atveju STV2 atitinka anksčiau pristatyto skaitinio atvejo rezultatą – 25,7 %, o STV1, STV3 atitinkamai siekia 18,1 % ir 21,2 %. Nustatyti rezultatai rodo, jog visų STV vėjo energijos naudojimas yra daugiau nei 2 kartus mažesnis už galimą teorinę Betzo kriterijaus ribą.

3.4. Turbininių ventiliatorių funkcionalumo padidinimo vertinimas

Remiantis eksperimentinių tyrimų rezultatais, šiame poskyryje atliekamas teorinis turbininių ventiliatorių funkcionalumo padidinimo vertinimas bei pateikiamos techninės galimybės šį įrenginį integruoti į hibridinę vėdinimo sistemą. Realiomis sąlygomis, vėjo greitis lauke pulsuoja, kinta stochastiškai, todėl ištraukiamas nepastovus oro srautas. Siekiant padidinti vėdinimo sistemos funkcionalumą, STV numatoma taikyti energijos akumuliavimui esant perteklinei vėjo energijai ir tokiu būdu ilgiau užtikrinti reikiamą oro kaitą.

3.15 pav. Metinis vėjo greičio kitimas Vilniuje
Fig. 3.15. Annual variation of wind speed in Vilnius

Atliekant metinio STV ištraukiamo oro skaičiavimus pasirenkamas Vilniaus mieste esantis hipotetinis pastatas, virš kurio stogo nekliudomai pučia vietovei būdingas vėjo srautas. Vilniaus miesto vėjo greičio kitimas priimamas pagal „Meteonorm“ programoje pateikiamas vėjo greičio vertes 10 m aukštyje.

Metinis vėjo greičio kitimas Vilniuje pateiktas 3.15 paveiksle. Skaičiavimams taikomas grafikas sudarytas 1 minutės intervalu. Pagal grafiko duomenis matoma, kad vėjo greitis mieste yra pulsuojantis. Vertinant pateiktus duomenis nustatyta, jog vėjo greitis mieste kinta diapazone nuo 0 m/s iki 15,3 m/s, o vidurkis yra apie 3,9 m/s (grafike pavaizduota raudona brūkšnine linija).

Skaičiuojant STV ištraukiamo oro srautą priimama, jog statinis slėgis vėdinamame pastate ir lauke yra lygūs, nėra gravitacijos jėgų, todėl tolesniems skaičiavimams taikoma 2.18 empirinė lygtis bei 2.4 lentelėje pateikti koeficientai. Remiantis šia empirine lygtimi bei metinio vėjo greičio kitimo grafiku, apskaičiuojamas metinis STV ištraukiamas oro srautas (3.16 pav.).

3.16 pav. Metinis turbininio ventiliatoriaus ištraukiamo oro srauto kitimas

Fig. 3.16. Annual variation of turbine ventilator's extracted airflow

Pateiktas grafikas rodo metinį ištraukiamo oro srauto kitimą esant įprastiniam STV veikimui ant pastato stogo. Apskaičiavus nustatyta, jog ištraukiamas oro srautas esant tokioms veikimo sąlygoms gali kisti nuo 0 m³/h iki 261 m³/h.

Bendras metinis ištraukiamas oro srautas siekia $6,45 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$, o vidurkis apie $74 \text{ m}^3/\text{h}$.

Atliekant tolesnius skaičiavimus priimama, jog STV projektuojamas pagal vidutinį metinį vietovės vėjo greitį $3,9 \text{ m/s}$ ir vidutinį ištraukiamo oro srautą $\bar{Q}_e = 74 \text{ m}^3/\text{h}$. Be to, hipotetiniam pastatui reikiamas oro kiekis vertinamas pagal ASHRAE standartą. Priimama, jog pastatas bus sandėliavimo paskirties, todėl atsižvelgiant į tai taikomas minimalus oro debitas vėdinimui yra $0,3 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$. Įvertinus šiuos kriterijus, STV projektuojamas patalpai kurios grindų plotas yra $68,5 \text{ m}^2$.

Toliau pateikiamas vėjo energijos akumuliacinio potencialas hibridinės vėdinimo sistemos funkcionalumo padidinimui. Analizuojant vėjo energijos akumuliacinio potencialą visų pirma sudaroma vėjo greičio kumuliacinė kreivė (3.17 pav.).

3.17 pav. Vilniaus miesto vėjo greičio kumuliacinė kreivė

Fig. 3.17. Cumulative curve of wind speed in Vilnius

Pateikta kumuliacinė kreivė papildomai suskirstyta pagal 3 ribines sąlygas. Pirmoji ribinė sąlyga rodo vėjo greitį bei kumuliacinę trukmę kuomet nesisuka STV rotorius. Šiuo atveju STV rotorius pradeda sukis esant minimaliam eksperimentiškai nustatytam 2 m/s vėjo greičiui. Pagal sudarytą kumuliacinę kreivę matoma, kad STV rotorius per metus nesisuktų apie 23 % laiko (2000 val.). Esant šioms sąlygoms ištraukiamas oro srautas priklausytų tik nuo ežekcijos, tačiau dėl mažo vėjo greičio šis kiekis yra neženklaus.

Diapazone nuo 2 m/s iki $3,9 \text{ m/s}$ STV ištraukiamas oro srautas būtų mažesnis nei numatytas projektinis $74 \text{ m}^3/\text{h}$. Tokios sąlygos per metus sudaro apie 34 % (2950 val.). Esant didesniai nei projektiniam vėjo greičiui, STV ištraukiamas oro

srautas viršytų hipotetiniam pastatui reikalingą oro srautą. Šiuose skaičiavimuose, tokios sąlygos vertinamos kaip perteklinės vėjo energijos akumuliacinio potencialas. Apkraunant STV rotorių ir priklausomai nuo pasirinkto energijos kaupimo būdo, ši perteklinė energija galėtų būti transformuojama į mechaninę ar elektrocheminę energiją. Tokios vėjo greičio sąlygos gali būti papildomai suskirstytos į dalinį rotoriaus apkrovimą bei optimalų rotoriaus apkrovimą.

Dalinio apkrovimo sąlygos susidaro tuomet, kai STV rotorius gali ištraukti projekcinį oro srautą bei generuoti perteklinę energiją. Tokio apkrovimo metu, rotoriaus sukimosi dažnis yra ribojamas atsižvelgiant į projekcinį oro srautą. Remiantis 2.16 paveiksle pateiktais eksperimentų rezultatais nustatyta, kad dalinis apkrovimas galimas iki 5,5 m/s vėjo greičio. Pasiekus šią ribą, STV veikimas tampa funkcionaliai optimalus – STV gali ištraukti projekcinį oro debitą bei tuo pačiu rotoriumi generuoti maksimalią galią (esant 5,5 m/s vėjo greičiui). Tokios vėjo sąlygos per metus sudaro apie 22 % laiko (1900 val.).

Kai vėjo greitis yra didesnis nei 5,5 m/s, STV siekiama išnaudoti maksimaliam energijos generavimui ir kaupimui. Esant tokiam veikimo režimui, STV ištraukiamas oro srautas tampa didesnis net ir optimaliai apkrovus rotorių. Šios sąlygos sudaro apie 22 % laiko (1920 val.).

3.18 paveiksle pateikiama vėjo greičio histograma ir STV veikimo režimus apibūdinančios ribos įrenginiui veikiant hibridinėje vėdinimo sistemoje.

3.18 pav. Vėjo greičio histograma ir galimi turbininio ventiliatoriaus veikimo režimai hibridinėje vėdinimo sistemoje

Fig. 3.18. Histogram of wind speed and feasible turbine ventilator's operation regimes in hybrid ventilation system

3.4.1. Perteklinės vėjo energijos akumuliacinio potencialo skaičiavimas

Kiekybinis perteklinės vėjo energijos akumuliacinio potencialo nustatymas apima STV2 įrenginio eksperimentų empirines lygtis bei nustatytas fizikines priklausomybes. Siekiant apskaičiuoti akumuliacinio potencialą, visų pirma reikalinga įrenginio rotoriaus maksimalaus sukimosi dažnio priklausomybė nuo vėjo greičio. Eksperimentiškai nustatyta, jog ši priklausomybė yra tiesinė:

$$\omega_{\max} = a_{\omega} \cdot u + b_{\omega}, \quad (3.43)$$

čia a_{ω} , b_{ω} empiriniai koeficientai, nustatyti pagal eksperimentinių tyrimų duomenis ir STV2 atveju atitinkamai lygūs 57,15 ir 27,24. Šiuo atveju empirinė lygtis galioja kai $u > 2$ m/s.

Kita skaičiavimams reikalinga empirinė lygtis – STV ištraukiamas oro srautas veikiant tik ežekcijai. Ši empirinė lygtis nustatoma eksperimentų metu visiškai sustabdžius STV rotorių:

$$\dot{Q}_{eb} = a_b \cdot u^2 + b_b \cdot u + c_b, \quad (3.44)$$

čia a_b , b_b , c_b empiriniai koeficientai, nustatyti pagal eksperimentinių tyrimų duomenis ir STV2 atveju atitinkamai lygūs -0,172, 10,18 ir -1,45. Šiuo atveju empirinė lygtis galioja kai $u > 2$ m/s.

Kadangi energijos akumuliacinis gali būti atliekamas esant daliniam ir maksimaliam STV rotoriaus apkrovimui – skaičiavimai atskirai suskirstomi į dvi dalis.

Skaičiuojant STV rotoriumi generuojamą galią veikiant dalinio apkrovimo režimu reikalinga žinoti galimą sukimosi dažnį rotoriaus apkrovimo metu. Pastarasis rodiklis turi būti apskaičiuojamas taip, kad apkrovos metu nesumažėtų ištraukiamas oro kiekis. Eksperimentiškai nustatyta, jog apkraunant rotorių, ištraukiamas oro srautas nuo $\dot{Q}_e$ iki $\dot{Q}_{eb}$ ribos mažėja tiesiškai (2.15 pav. rezultatai). Remiantis šia fizikine priklausomybe, galima sudaryti lygybę, leidžiančią apskaičiuoti apkrauto rotoriaus sukimosi dažnį, kuris reikalingas projektiniam oro srautui siurbti:

$$\omega_r = \omega_{\max} \frac{\dot{Q}_{er} - \dot{Q}_b}{\dot{Q}_e - \dot{Q}_b}. \quad (3.45)$$

Žinant reikiamą sukimosi dažnį rotoriaus apkrovimo metu, toliau galima atlikti generuojamos galios skaičiavimus. Remiantis eksperimentinių tyrimų duomenis nustatyta, jog STV maksimalus sukimo momentas nuo vėjo greičio kinta kvadratu, todėl galima taikyti lygtį:

$$\tau_{\max} = a_{\tau} \cdot u^2 + b_{\tau} \cdot u + c_{\tau}, \quad (3.46)$$

čia a_{τ} , b_{τ} , c_{τ} empiriniai koeficientai, nustatyti pagal eksperimentinių tyrimų duomenis ir STV2 atveju atitinkamai lygūs $4,79 \cdot 10^{-4}$, $2,74 \cdot 10^{-5}$ ir $-7,63 \cdot 10^{-4}$. Pateikta empirinė lygtis galioja kai $u > 2$ m/s.

Įvertinus eksperimentiškai nustatytą tiesinę priklausomybę tarp sukimo momento ir sukimosi dažnio, sudaroma sukimo momento skaičiavimo lygtis esant daliniam rotorius apkrovimui:

$$\tau_r = \tau_{\max} - \tau_{\max} \frac{\omega_r}{\omega_{\max}} = \tau_{\max} \left(1 - \frac{\omega_r}{\omega_{\max}} \right). \quad (3.47)$$

Pritaikius 2.10 lygtį, STV generuojama galia dalinio apkrovimo metu apskaičiuojama:

$$\dot{E}_{STV} = \frac{\pi}{30} \cdot \tau_{\max} \left(1 - \frac{\omega_r}{\omega_{\max}} \right) \cdot \omega_r. \quad (3.48)$$

Ištačius ω_r išraišką:

$$\dot{E}_{STV} = \frac{\pi}{30} \cdot \tau_{\max} \cdot \omega_{\max} \cdot \frac{\dot{Q}_{er} - \dot{Q}_b}{\dot{Q}_e - \dot{Q}_b} \cdot \left(1 - \frac{\dot{Q}_{er} - \dot{Q}_b}{\dot{Q}_e - \dot{Q}_b} \right). \quad (3.49)$$

Esant didesniai nei 5,5 m/s vėjo greičiui, rotorius gali būti apkraunamas optimaliai ir tokiu būdu generuoti maksimalią galią. Eksperimentiškai ir skaičiavimo rezultatais nustatyta, jog maksimali generuojama galia pasiekama tuomet, kai rotorius sukimosi dažnis ir maksimalus sukimo momentas sumažėja per pus. Atsižvelgiant į tai, vėjo greičiui viršijus 5,5 m/s, maksimali generuojama galia apskaičiuojama lygtimi:

$$\dot{E}_{STV} = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{\tau_{\max} \cdot \omega_{\max}}{4}. \quad (3.50)$$

Verta paminėti, jog esant tokiam veikimo režimui, STV ištraukiamas oro srautas viršys projekcinį oro debitą. Ištačius $\dot{Q}_e$, $\omega_{\max}$, $\tau_{\max}$ empirines lygtis galime apskaičiuoti generuojamas galias dalinio ir maksimalaus STV rotorius apkrovimo metu. Toliau esančiame 3.19 paveiksle pateikiamas metinis STV2 generuojamos galios kitimas, kuomet įrenginys tuo pačiu metu atlieka vėdinimą.

3.19 pav. Metinis STV2 generuojamos galios kitimas

Fig. 3.19. Annual variation of RTV2 generated power

Grafike pateikti rezultatai padalinti į dalinio apkrovimo rezultatus (raudonos kreivės) ir maksimalaus apkrovimo rezultatus (mėlynos kreivės). Apskaičiavus nustatyta, jog dalinio apkrovimo metu STV2 gali generuoti iki 0,11 W, o maksimalaus apkrovimo atveju iki 2,6 W. Atkreipiamas dėmesys, jog šiame tyrime naudotas STV yra nedidelis, be to, dažnai pastatuose tokių įrenginių įrengiama daugiau nei vienas. Esant kitokioms sąlygoms, galima tikėtis ženkliai didesnių generuojamų galių bei tuo pačiu didesnio akumuliuojamo energijos kiekio.

Metinis STV2 akumuliuotos energijos potencialas pateikiamas 3.20 paveiksle. Apskaičiavus perteklinės vėjo energijos akumuliacinio potencialą nustatyta, jog STV2 per metus iš viso galėtų akumuliuoti apie 828 Wh energijos. STV2 veikdamas dalinio apkrovimo metu (vėjo greitis 3,9–5,5 m/s) sugeneruotų 92 Wh energijos. Veikdamas maksimalaus apkrovimo metu (vėjo greitis 3,9–5,5 m/s) STV2 rotoriumi būtų galima generuoti 736 Wh energijos.

3.20 pav. Metinis STV2 akumuliuotos energijos potencialas

Fig. 3.20. Annual RTV2 accumulated energy potential

3.4.2. Hibridinio vėdinimo funkcionalumo padidinimo teorinio skaičiavimo rezultatai

Prieš pristatant funkcionalumo padidinimo skaičiavimus reikalinga įvertinti STV įprasto veikimo rezultatus. 3.21 paveiksle pateikiamas STV2 vidutinis ištraukiamo oro srauto kitimas metų laikotarpyje.

3.21 pav. Vidutinis ištraukiamo oro srauto pasiskirstymas esant įprastam STV2 veikimui

Fig. 3.21. Average extracted airflow distribution under regular RTV2 operation

Pagal pateiktus skaičiavimų rezultatus matoma, jog vėjo greičiui esant 0–3,9 m/s diapazone, įrenginys veikdamas įprastu režimu vidutiniškai gali ištraukti apie 42,3 m³/h oro srauto. Įvertinus skirtumą tarp projekcinio oro srauto nustatyta, kad šiuo laikotarpiu vidutiniškai trūksta apie 43 % (31,7 m³/h) oro srauto. Bendru atveju šios įrenginio veikimo sąlygos per metus sudaro apie 57 % laiko.

Likusią 43 % laiko dalį STV veikia užtikrindamas projekcinį oro srautą, tačiau tuo pačiu yra laikotarpių kuomet susidaro ištraukiamo oro srauto perteklius. Apskaičiavus matoma, kad šiuo laikotarpiu STV vidutiniškai ištraukia apie 113,4 m³/h oro srauto. Lyginant su projekciniu oro srautu matoma, kad susidaro apie 53 % (39,7 m³/h) perteklius.

Remiantis šiais vidutinio ištraukiamo oro srauto skaičiavimo rezultatais galima teigti, jog tiriamasis STV turi potencialo funkcionalumo didinimui. Šiuo atveju pristatant teorinius funkcionalumo padidinimo rezultatus priimama, jog visa STV rotoriumi generuojama galia bus perduodama į elektros akumuliatorių. Akumuluota elektros energija bus naudojama laikotarpiu kuomet ištraukiamas oro srautas bus mažesnis nei projekcinis. Skaičiavimuose numatyta, kad akumuluota energija elektros varikliu bus perduodama STV rotoriumi ir tokiu būdu bus padidinamas ištraukiamas oro srautas.

Apskaičiavus nustatyta, jog siekiant ištraukti projekcinį oro debitą, STV2 įtekėjimo angoje oro greitis turi būti $v_e=1,88$ m/s. Be to, priimama, jog elektros varikliui sukant STV rotorius, ištraukiamo oro srautui panaudojama tik dalis gautos energijos. Tai priimama atsižvelgiant į kintantį sistemos veikimo darbo tašką ir tuo pačiu kintantį rotoriumi suteiktos energijos naudojimo efektyvumą. Šiuo atveju tokio elektra varomo STV efektyvumas priimamas vidutinis ir jo vertė nustatoma remiantis 2.17 paveiksle pateiktais skaičiavimo rezultatais. Analizuojamu atveju elektra varomo STV2 vidutinis efektyvumas laikomas $\eta_r = 0,07$. 3.24 lygčiai pritaikius efektyvumo koeficientą, reikiama galia projekciniam oro srauto ištraukimui apskaičiuojama:

$$\dot{E}_{Qr} = \frac{\dot{Q}_{er} \cdot \Delta P_{te}}{\eta_r} = \frac{\dot{Q}_{er} \cdot \xi \cdot \rho_a \cdot v_e^2}{2 \cdot \eta_r}. \quad (3.51)$$

Šia lygtimi apskaičiuota, jog STV2 rotorius sukant elektros varikliu, projekciniam oro debitui ištraukti reikalinga apie 0,82 W elektros galia. Toliau esančiame 3.22 paveiksle pateikiami skaičiavimo rezultatai kuomet STV rotoriumi atliekamas energijos akumuliavimas.

3.22 pav. Vidutinis ištraukiamo oro srauto pasiskirstymas naudojant akumuliuotą energiją

Fig. 3.22. Average extracted airflow distribution while using accumulated energy

Atliekant šiuos skaičiavimus priimama, jog šioje teorinėje hibridinio vėdinimo sistemoje bus panaudotas visas 3.19 paveiksle nustatytas metinis akumuliuotos energijos potencialas. Analizuojant šios sistemos skaičiavimų rezultatus matoma, jog energijos akumuliacijos metu vidutinis ištraukiamo oro srauto pasiskirstymas skiriasi nuo įprasto STV veikimo. Vėjo greičiui esant 3,9–5,5 m/s diapazone, įrenginys veikdamas dalinio apkrovimo metu ištraukia projekcinį 74 m³/h oro srautą. Esant didesniai nei projekciniam vėjo greičiui, atliekamas elektros generavimas su maksimaliu STV rotoriaus apkrovimu. STV2 veikiant šiomis sąlygomis, vidutinis ištraukiamas oro srautas būtų apie 98,7 m³/h. Lyginant su projekciniu oro srautu matoma, kad susidaro apie 33 % (24,7 m³/h) perteklius. Tuo tarpu palyginus su įprastomis STV veikimo sąlygomis, šis perteklius yra apie 20 % mažesnis bei jo trukmė apie 19 % trumpesnė.

Likusią 57 % laiko dalį STV veikia kombinuotai. Vėjo greičiui nesiekiant 3,9 m/s ištraukiamas oro srautas būtų padidinamas naudojant sukauptą elektros energiją, kuria sukamas STV rotorius. Skaičiavimų metu nustatyta, jog esant tokioms veikimo sąlygoms, šiuo laikotarpiu STV vidutinis ištraukiamas oro srautas galėtų padidėti apie 36 % (15,4 m³/h).

3.23 paveiksle pateikiami skaičiavimo rezultatai rodantys metinio ištraukiamo oro srauto poreikio užtikrinimą.

3.23 pav. Metinio ištraukiamo oro srauto poreikio užtikrinimo palyginimas
Fig. 3.23. Comparison of annual extracted airflow demand fulfillment

Pateiktas grafikas suskirstytas į du stulpelius. Pirmasis stulpelis rodo metinio ištraukiamo oro užtikrinimą esant įprastam STV veikimui, o antrasis STV naudojant akumuliuotą energiją. Vertinant skaičiavimų duomenis nustatyta, kad 0–3,9 m/s vėjo greičio diapazone, STV2 veikdamas tik nuo vėjo srauto gali užtikrinti 31,9 % viso reikalingo metinio oro srauto. Tuo tarpu, esant didesniam nei 3,9 m/s projektiniam vėjo greičiui, abiem veikimo režimais šiuo laikotarpiu užtikrinama 44,2 % viso reikalingo metinio oro srauto. Sudėjus šiuos rezultatus matoma, kad STV veikdamas tik nuo vėjo srauto gali užtikrinti 76,1 % metinio poreikio.

Akumuliuotą energiją naudojant STV2 rotorius sukimui metinį vėdinimo funkcionalumą būtų galima padidinti apie 11,6 %. Bendru atveju tokia hibridinio vėdinimo sistema leistų užtikrinti apie 87,7 % metinio poreikio. Kita vertus, net ir šiuo atveju, STV2 veikdamas tokiu režimu tam tikrais laikotarpiais ištraukia didesnę oro srautą nei reikalinga. Dėl šios priežasties, galimas dar didesnis STV funkcionalumo didinimas taikant šį įrenginį didesnio ploto patalpose, ar ieškant kitų sprendimų leidžiančių efektyviau paskirstyti ištraukiamą oro srautą.

3.4.3. Akumuluotos vėjo energijos naudojimo galimybės hibridinėje vėdinimo sistemoje

Vertinant mokslines publikacijas ir rinkoje egzistuojančias hibridinio vėdinimo sistemas matoma, kad dažniausiai pasirenkami sprendimai su saulės elementais, arba tiesioginiu STV taikymu elektros generavimui. Šiame skyriuje pristatomas STV taikymo hibridinėje vėdinimo sistemoje pavyzdys akumuliavimui pasitelkiant suspaustą orą. Šiuo atveju nagrinėjamas patentuotas išradimas, kurio veikimas paremtas integruojant oro talpyklą (Martinaitis et al., 2019). Toliau esančiame 3.24 paveiksle pateikiama tokio išradimo principinio veikimo schema.

3.24 pav. Turbininio ventiliatoriaus funkcionalumo tobulinimo pavyzdys taikant oro talpyklą (Martinaitis et al., 2019)

Fig. 3.24. An example of turbine ventilator functionality development with integrated air storage (Martinaitis et al., 2019)

Žymėjimai scheme: 1 – izobarinė oro talpykla; 2 – stoginis turbininis ventiliatorius (STV); 3 – velenas; 4 – sąsija jungianti STV ir sankabą, 4 – sankaba; 5 – reversinis kompresorius; 6 – vėdinama patalpa; 7 – pastato oro įtekėjimo angos; 8 – izobarinės oro talpyklos svarmuo.

Vėjo srautui sukant STV, pastate vyksta oro ištraukimas, o šviežias oras patenka pro pastate esančias angas (atviri langai, durys, angos ir kt.). Susidarius sąlygoms, kuomet turbininis ventiliatorius sukasi greičiau ir traukia didesnę oro debitą nei reikia patalpoje – sankaba sujungiamas turbininis ventiliatoriaus ir reversinio kompresoriaus ašis. Tokiu būdu turbininio ventiliatoriaus sukimo energija perduodama kompresoriui. Reversinis kompresorius šiuo atveju siurbia

orą iš patalpos (ar kitos aplinkos) ir kurdamas padidintą oro slėgimą tiekia šį orą į izobarinę oro talpyklą.

Izobarinės oro talpyklos atveju, kai kompresorius slekia orą į talpyklą, talpykla keičia savo tūrį, o oras tiekiamas tol, kol talpykla pasiekia nustatytą ribinį tūrį. Tokiu būdu, slegiant orą į talpyklą sukaupiama potencinė energija.

Susidarius sąlygoms, kai vėjas dėl sumažėjusio greičio nepakankamai ar visiškai nesuka stoginio STV, o pastate išlieka vėdinimo poreikis, kompresorius pradeda išleidinėti suslėgtą orą iš oro talpyklos. Oras išleidžiamas iš talpyklos suka kompresoriaus ašį, kuri per sankabą sujungta su STV. Tokiu būdu iš talpyklos išleidžiamas oras suka STV ir atliekamas pastato vėdinimas.

Pristatytas išradimas su izobarine talpykla leidžia užtikrinti STV veikimą esant nepakankamoms vėjo greičio sąlygoms. Šiam techniniam sprendimui nereikia išorinės energijos bei elektros akumuliatorių, konstrukcija paprasta, sprendimas nesudėtingai įgyvendinamas. Šiuo atveju vietoj izobarinės talpyklos gali būti taikoma ir izochorinė talpykla. Tokios sistemos veiksmingumą lemtų kompresorius techninės galimybės kurti slėgį esant tam tikriems STV sukimo parametrams.

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. Parengus STV menamus turbinos, ežektoriaus ir ventiliatoriaus komponentus integruojantį veikimo termodinaminį modelį, jį susiejus su eksperimentiniais tyrimais bei priėmus modeliui reikalingas prielaidas ir izoentropinio efektyvumo koeficientus, nustatyta, kad vėjo srautas rotoriaus sukimui sunaudoja nuo 2,9 % iki 9,1 % savo teorinės galios. Šiuo atveju efektyviausiai vėjo energija išnaudojama STV2 rotoriuje (mentės vertikaliai tiesios), o blogiausiai STV1 rotoriuje (mentės lenktos vertikaliomis ašimis kryptimi). Tyrimai, rodo kad rotoriaus geometrinės savybės lemia tai, kad dalis pučiamo vėjo srauto atsiskiria nuo jo ir į STV vidų patekęs mažesnis vėjo srautas toliau dalyvauja ežekcijos procese.

2. Vertinant maksimalų vėjo srauto energijos panaudojimą pagal Betzo kriterijaus ribą, termodinaminiu modeliu nustatyta, kad analizuojamų STV atveju teorinis maksimalus siurbiamo oro srautas gali būti didesnis daugiau nei 2 kartus. Šiuo atveju bendras vėjo energijos vėjo srauto energijos naudojimo efektyvumas STV1, STV2 bei STV3 atitinkamai siekia 18,1 %, 25,7 % bei 21,2 %.

3. Analizei pasirinkus 68,5 m² ploto hipotetinį sandėliavimo paskirties pastatą Vilniaus mieste, STV2 per metus iš viso galėtų akumuluoti apie 828 Wh perteklinės vėjo energijos. Esant įprastam STV2 veikimui, įrenginys užtikrintų 76,1 % metinio vėdinimo poreikio. STV2 pritaikius elektros energijos akumuliavimui ir ją naudojant įrenginio nepakankamo veikimo metu, teoriškai

metinį vėdinimo funkcionalumą galima padidinti apie 11,6 %. Tokia hibridinė sistema leistų užtikrinti apie 87,7 % metinio vėdinimo poreikio.

4. Siekiant padidinti STV funkcionalumą, įrenginys gali būti naudojamas hibridinio vėdinimo sistemoje. Hibridiniam vėdinimui pasirinkus patentuotą sprendimą su oro talpykla galima užtikrinti STV veikimą esant nepakankamoms vėjo greičio sąlygoms. Tokiu būdu būtų išvengiamas elektros akumuliatorių ir išorinių energijos šaltinių poreikis.

Bendrosios išvados

1. Eksperimentiškai nustatyta, jog STV ištraukiamas oro srautas ženkliai priklauso nuo vėjo greičio, statinio slėgio vėdinamoje patalpoje ir išorėje skirtumo, aerodinaminių STV savybių. Kompleksiškai vertinant vėjo greičių ir patalpos statinio slėgio kitimą, geriausią ištraukiamo oro rezultatą pasiekia STV su vertikalios ašies kryptimi tiesiomis mentėmis (STV2). Tyrimų metu sudarius sąlygas vėjo srauto įsiurbimui pastebėta, kad bandyti įrenginiai sumažina įsiurbiamo vėjo srauto kiekį nuo 25 % iki 55 % lyginant su atviru ortakiu. Vertinant STV maksimalios generuojamos galios ir oro siurbimo efektyvumus nustatyta, kad tokių įrenginių generuojamos galios efektyvumas siekia nuo 4 % iki 8 %, o siurbimo efektyvumas nuo 12 % iki 22 %.

2. Remiantis eksperimentinių tyrimų rezultatais ir STV veikimo principu nustatyta, kad STV sieja struktūrinis ir sąveikinis ryšys su kitais aerodinaminiais įrenginiais. STV sąveikaujančių oro srautų procesų analizei ir įrenginio efektyvumo tyrimams gali būti taikoma trikomponentė įrenginio veikimo koncepcija, kuri išreiškta termodinaminiu modeliu. Toks trikomponentis STV susideda iš menamų turbinos, ežektoriaus ir ventiliatoriaus komponentų.

3. Parengtas STV menamus turbinos, ežektoriaus ir ventiliatoriaus komponentus integruojantis termodinaminis modelis šių tyrimų apimtyje leidžia įvertinti STV sąveikaujančių srautinių procesų poveikį įrenginio funkcionalumui, efektyvumui bei tobulinimo potencialui. Modelį susiejus su eksperimentiniais

tyrimais bei priėmus reikalingas prielaidas nustatyta, kad analizuojamų STV atveju vėjo srautas rotorius sukimui sunaudoja nuo 2,9 % iki 9,1 % savo teorinės galios. Termodinaminiu modeliu nustatyta, kad teorinis maksimalus siurbiamas oro srautas gali būti bent dvigubai didesnis.

4. Remiantis įvairialypiais STV eksperimentiniais tyrimais ir statistiniais metinio vėjo greičio kitimo duomenimis parengtas STV termodinaminis modelis leido įvertinti STV ištraukiamo oro srautą bei energijos akumuliacijos potencialą hibridinėje vėdinimo sistemoje, atskleisti galimybę padidinti kintančią vėjo energiją naudojančių hibridinių vėdinimo sistemų funkcionalumą. Analizei pasirinkus Vilniuje įrengtą STV2 hibridinio vėdinimo sistemą nustatyta, kad toks sprendimas teoriškai galėtų padidinti metinį vėdinimo funkcionalumą apie 11,6 %.

Literatūra ir šaltiniai

- Acred, A., & Hunt, G. R. (2013). Passive Ventilation in Multi-Storey Atrium Buildings: a First-Order Design Guide. *34th Annual AIVC Conference, September 2013*.
- Antonio, Y. M., Périlhon, C., Descombes, G., & Chacoux, C. (2012). Thermodynamic modelling of an ejector with compressible flow by a one-dimensional approach. *Entropy*, 14(4), 599–613. <https://doi.org/10.3390/e14040599>
- AS/NZS 4740:2000. (2000). *Australian/New Zealand Standard. Natural ventilators-Classification and performance* (p. 46).
- Bay, N. T., & Phuong, H. (2012). *Performance Testing and Comparison of A Turbine Ventilator , A Vent Column , and Their Combination Under Thermal Buoyancy and Wind Effects. Volume 6* : (2003), 86–95.
- Čekanavičius, V., & Murauskas, G. (2001). *Statistika ir jos taikymai*.
- Chan, S. C., Che-Ani, A. I., & Nik Ibrahim, N. L. (2013). Passive designs in sustaining natural ventilation in school office buildings in Seremban, Malaysia. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2(2), 172–182. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2014.01.002>
- Chong, W. T., Wang, X. H., Wong, K. H., Mojumder, J. C., Poh, S. C., Saw, L. H., & Lai, S. H. (2016). Performance assessment of a hybrid solar-wind-rain eco-roof system for buildings. *Energy and Buildings*, 127, 1028–1042. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.065>
- Chu, C. R., & Wang, Y. W. (2010). The loss factors of building openings for wind-driven ventilation. *Building and Environment*, 45(10), 2273–2279.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.010>

Dale, J. D., & Ackerman, M. Y. (1993). *Evaluation of the performance of attic turbine ventilators*.

Darco. (2020). *Rotowent dragon*. <https://plumbing4home.com/>

Elmualim, A. A. (2006). Effect of damper and heat source on wind catcher natural ventilation performance. *Energy and Buildings*, 38(8), 939–948. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.11.004>

Elwan, M., Rizk, A., & El-Morsi, M. (2018). A Review on Wind - Driven Cross - Ventilation Techniques Inside Single Rooms. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 6(October), 75 of 93.

EN 13141-5. (2004). *EN 13141-5. Ventilation for buildings - Performance testing of components/products for residential ventilation - Part 5: Cows and roof outlet terminal devices*.

Farahani, A. S., Adam, N. M., & Ariffin, M. K. A. (2010). *Simulation of Airflow and Aerodynamic Forces Acting on a Rotating Turbine Ventilator* Department of Mechanical and Manufacturing Engineering , University Putra Malaysia , 3(1), 159–170.

Faye C. McQuiston, Jerald D. Parker, J. D. S. (2005). *Heating, Ventilating and Air Conditioning: analysis and design* (6th edition). John Wiley and Sons.

Freitas, A. W., Morais, P. G., & Centre, S. I. (2014). *Orthodynamometer for measurement of longitudinal and transverse loads in wind tunnel testing*. July, 2213–2220.

Gill, B., Schr, F., Bauer, A., & Simon, M. (2021). *Energy Research & Social Science When energy efficiency goes out the window : How highly insulated buildings contribute to energy-intensive ventilation practices in Germany*. 72(April 2020). <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101888>

Han, D. H., Kim, S., Choi, J. H., Kim, Y. S., Chung, H. S., Jeong, H., Watjanatepin, N., Ruangpattanawiwat, C., & Choi, S. H. (2018). Experimental study on thermal buoyancy-induced natural ventilation. *Energy and Buildings*, 177, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.046>

HASEC. (2007). *Wing Jetter System: An Epoch-making Ventilator Achieved by Application of Wing Theory*.

Havens, P. (2004). A combined fan and wind turbine model for attic turbine ventilators. *Energy Efficient and Healthy Buildings, ARE318-E*.

Haw, L. C., Saadatian, O., Sulaiman, M. Y., Mat, S., & Sopian, K. (2012). Empirical study of a wind-induced natural ventilation tower under hot and humid climatic conditions. *Energy & Buildings*, 52, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.05.016>

He, S., Li, Y., & Wang, R. Z. (2009). Progress of mathematical modeling on ejectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1760–1780. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.032>

Horan, J. M., & Finn, D. P. (2008). Sensitivity of air change rates in a naturally ventilated atrium space subject to variations in external wind speed and direction. *Energy and Buildings*, 40(8), 1577–1585. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.013>

- Ismail, M., & Abdul Rahman, A. M. (2010). Comparison of different hybrid turbine ventilator (HTV) application strategies to improve the indoor thermal comfort. *International Journal of Environmental Research*, 4(2), 297–308. <https://doi.org/10.22059/ijer.2010.22>
- Ismail, Mazran, & Abdul Rahman, A. M. (2012). Rooftop Turbine Ventilator: A Review and Update. *Journal of Sustainable Development*, 5(5), 121–131. <https://doi.org/10.5539/jsd.v5n5p121>
- Izadyar, N., Miller, W., Rismanchi, B., & Garcia-Hansen, V. (2020). Impacts of façade openings' geometry on natural ventilation and occupants' perception: A review. *Building and Environment*, 170(October 2019), 106613. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106613>
- Jomehzadeh, F., Hussien, H. M., Calautit, J. K., Nejat, P., & Ferwati, M. S. (2020). Natural ventilation by windcatcher (Badgir): A review on the impacts of geometry, microclimate and macroclimate. *Energy and Buildings*, 226, 110396. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110396>
- Jones, B. M., Cook, M. J., Fitzgerald, S. D., & Iddon, C. R. (2016). A review of ventilation opening area terminology. *Energy and Buildings*, 118, 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.053>
- Karakatsanis, C., Bahadori, M. N., & Vickery, B. J. (1986). *Evaluation of pressure coefficients and estimation of air flow rates in buildings employing wind towers*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-033177-5.50152-6>
- Keenan, J. H., Neumann, E. P. (1942). A simple air ejector. *ASME Journal of Applied Mechanics*, A75 A81.
- Keenan J, Neumann E, L. F. (1950). An investigation of ejector design by analysis and experiment. *Journal of Applied Mechanics*, 17, 299.
- Khan, N., Su, Y., & Riffat, S. B. (2008). A review on wind driven ventilation techniques. *Energy and Buildings*, 40(8), 1586–1604. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.015>
- Khan, N., Su, Y. Y., Riffat, S. B., & Biggs, C. (2008). Performance testing and comparison of turbine ventilators. *Renewable Energy*, 33(11), 2441–2447. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.01.016>
- Kitzberger, T., Kotik, J., Schmöllerl, M., & Pröll, T. (2018). Energy savings through implementation of a multi-state Time Control Program (TCP) in demand-controlled ventilation of commercial buildings. *Energy and Buildings*, 164, 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.058>
- Lai, C. M. (2003). Experiments on the ventilation efficiency of turbine ventilators used for building and factory ventilation. *Energy and Buildings*, 35(9), 927–932. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00024-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00024-0)
- Lai, C. M. (2006). Prototype development of the rooftop turbine ventilator powered by hybrid wind and photovoltaic energy. *Energy and Buildings*, 38(3), 174–180. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.004>
- Lien, J. (2002). Wind Driven Ventilation for Enhanced Indoor Air Quality. *Intechopen.Com*. <https://doi.org/10.5772/1030>

- Lien, S. T. J., & Ahmed, N. A. (2010). Numerical simulation of rooftop ventilator flow. *Building and Environment*, 45(8), 1808–1815. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.009>
- Lien, S. T. J., & Ahmed, N. A. (2011). Effect of inclined roof on the airflow associated with a wind driven turbine ventilator. *Energy and Buildings*, 43(2–3), 358–365. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.027>
- Liu, J., Wang, L., Jia, L., Wang, X. (2018). Thermodynamic modeling and sensitivity analysis of ejector in refrigeration system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 126.
- Liu, F. (2014). Review on Ejector Efficiencies in Various Ejector Systems. *15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, 1533, 1–10.
- Liu, Fang, & Groll, E. A. (2013). Study of ejector efficiencies in refrigeration cycles. *Applied Thermal Engineering*, 52(2), 360–370. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.12.001>
- Liu Li, C. M. M. (2007). The assessment of the performance of a windcatcher system using computational fluid dynamics. *Building and Environment*, 42, 1135–1141.
- Lomas, K. J., & Ji, Y. (2009). Resilience of naturally ventilated buildings to climate change: Advanced natural ventilation and hospital wards. *Energy and Buildings*, 41(6), 629–653. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.01.001>
- Lukiantchuki, M. A., Prata Shimomura, A., Marques da Silva, F., & Caram, R. M. (2020). Wind tunnel and CFD analysis of wind-induced natural ventilation in sheds roof building: impact of alignment and distance between sheds. *International Journal of Ventilation*, 19(2), 141–162. <https://doi.org/10.1080/14733315.2019.1615219>
- Mak, C. M., Niu, J. L., Lee, C. T., & Chan, K. F. (2007). A numerical simulation of wing walls using computational fluid dynamics. *Energy and Buildings*, 39(9), 995–1002. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.10.012>
- Monodraught. (2020). *Windcatcher: Harnessing the environment for building ventilation*. <https://www.monodraught.com/products/natural-ventilation/windcatcher-classic>
- Moosavi, L., Mahyuddin, N., Ab Ghafar, N., & Azzam Ismail, M. (2014). Thermal performance of atria: An overview of natural ventilation effective designs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 654–670. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.035>
- Nouanégué, H. F., Alandji, L. R., & Bilgen, E. (2008). Numerical study of solar-wind tower systems for ventilation of dwellings. *Renewable Energy*, 33(3), 434–443. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.001>
- Park, J., Sun, X., Choi, J. Il, & Rhee, G. H. (2017). Effect of wind and buoyancy interaction on single-sided ventilation in a building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 171(July), 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.10.016>
- Peters, C. A. (2001). Statistics for Analysis of Experimental Data. In *Environmental Engineering Processes Laboratory Manual*, Princeton University. <https://doi.org/10.1145/2901739.2901780>
- Pfeiffer, A., Dorer, V., & Weber, A. (2008). Modelling of cowl performance in building

- simulation tools using experimental data and computational fluid dynamics. *Building and Environment*, 43(8), 1361–1372. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.038>
- Piselli, C., Prabhakar, M., de Gracia, A., Saffari, M., Pisello, A. L., & Cabeza, L. F. (2020). Optimal control of natural ventilation as passive cooling strategy for improving the energy performance of building envelope with PCM integration. *Renewable Energy*, 162, 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.043>
- Pourshab, N., Tehrani, M. D., Toghraie, D., & Rostami, S. (2020). Application of double glazed façades with horizontal and vertical louvers to increase natural air flow in office buildings. *Energy*, 200, 117486. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117486>
- Rashid, D. M. H., & Ahmed, N. A. (2003). Study of aerodynamic forces on a rotating wind driven ventilator. *Wind Engineering*, 27(1), 63–72. <https://doi.org/10.1260/030952403321833770>
- Ravel, A. (1998). *Testing of Hurricane Ventilators Vs. Spherical Vane Ventilators.pdf*.
- Revel, a, & Huynh, B. P. (2007). *Characterising Roof Ventilators. December 2004*, 1–4.
- Sarevski, V.N., Sarevski, M. N. (2014). Preliminary study of a novel R718 refrigeration cycle with single stage centrifugal compressor and two-phase ejector. *International Journal of Refrigeration*, 40, 435–449.
- Šarevski, V. N., & Šarevski, M. N. (2012). Energy efficiency of the thermocompression refrigerating and heat pump systems. *International Journal of Refrigeration*, 35(4), 1067–1079. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.12.002>
- Savonius, O. (1932). Undersökning av Sughuvar och Rotor-Ventilatorer. *Sartryck Ur Teknisk Tidskrift, Mekanik* 9.
- Shinde, R., Lavhale, V., Nair, A., Pawar, S., & Mahajan, R. (2016). *Generation of Electric Power using Turbo Ventilators*. 6(6), 89–93.
- Shun, S., & Ahmed, N. A. (2008). Utilizing wind and solar energy as power sources for a hybrid building ventilation device. *Renewable Energy*, 33(6), 1392–1397. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.07.017>
- Sik, Y., Hun, D., Chung, H., Jeong, H., & Choi, S. (2017). Experimental study on Venturi-type natural ventilator. *Energy & Buildings*, 139, 232–241. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.016>
- Sun, X., Luo, D., Huang, D., & Wu, G. (2012). Numerical study on coupling effects among multiple Savonius turbines. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 4(5). <https://doi.org/10.1063/1.4754438>
- Twidell, J. W., & Weir, A. D. (2015). *Renewable Energy Resources*. <https://doi.org/doi:10.4324/9781315766416>
- van Hooff, T., Blocken, B., Aanen, L., & Bronsema, B. (2011). A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: Wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations. *Building and Environment*, 46(9), 1797–1807. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.02.009>
- Varela-Boydo, C. A., & Moya, S. L. (2020). Inlet extensions for wind towers to improve natural ventilation in buildings. *Sustainable Cities and Society*, 53(November 2019),

101933. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101933>

Welsh, P. (1994). The testing and rating of terminals used on ventilation systems. *15th AIVC Conference*, 371–380.

West, S. (2001). Improving the sustainable development of building stock by the implementation of energy efficient, climate control technologies. *Building and Environment*, 36(3), 281–289. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00007-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00007-X)

Wills, D. R., Dance, E. W. G., & Blench, G. T. (1959). *Formes et performance d'aspiraterus statiques pour conduits d'extraction naturelle de gaz brûlé*. Station expérimentale du Conseil du Gaz à Londres.

Wu, W., Min, J., & Malkawi, A. (2021). Simplified direct forcing approach for dynamic modeling of building natural ventilation. *Building and Environment*, 188(June 2020), 107509. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107509>

Yuan, J., & Glicksman, L. R. (2008). Multiple steady states in combined buoyancy and wind driven natural ventilation: The conditions for multiple solutions and the critical point for initial conditions. *Building and Environment*, 43(1), 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.035>

Zaki, A., Richards, P., & Sharma, R. (2019). Analysis of airflow inside a two-sided wind catcher building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 190(August 2018), 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.04.007>

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Rimdžius, D., Bielskus, J., Streckienė, G., Motuzienė, V., & Martinaitis, V. (2021). Operation analysis of the developed building ventilation system using turbofans and mechanical wind energy storage. *Building and Environment* (Clarivate Analytics Web of Science), 196. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107703>

Martinaitis, V., Rimdžius, D., Bielskus, J., Streckienė, G., & Motuzienė, V. (2020). Preliminary comparison of the performance of thermodynamic models of the subsonic ejector and turbofan. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering* (Clarivate Analytics Web of Science), 66 (5), 325–336. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2019.6379>

Rimdžius, D., & Bielskus, J. (2018). Turboventiliatorių, veikiančių be vėjo srauto, eksperimentinis tyrimas. *Mokslas – Lietuvos Ateitis: Aplinkos Inžinerija*, 10, 1–5. <https://doi.org/10.3846/mla.2018.3262>

Straipsniai kituose leidiniuose

Streckienė, G., Bielskus, J., Rimdžius, D., Martinaitis, V., & Motuzienė, V. (2021). Experimental Analysis of an Air Storage Tank in Wind Driven Ventilation System. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123102003>

Rimdžius, D., Bielskus, J., Martinaitis, V., Motuzienė, V., & Streckienė, G. (2018). Experimental Evaluation of Turbine Ventilators Performance under Different Test Conditions. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186407003>

Streckienė, G., Motuzienė, V., Rimdžius, D., Martinaitis, V., & Bielskus, J. (2018). Simulation of Annual Functionality of Roof Turbine Ventilator. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186407002>

Sketerskis, M., Rimdžius, D., & Martinaitis, V. (2018). Turboventiliatoriaus efektyvumo gerinimo tyrimas. *21-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminė konferencija*. <https://doi.org/10.3846/pinzs.2018.07>

Januševičius, K., Bielskus, J., Martinaitis, V., Streckienė, G., & Rimdžius, D. (2017). Expressing the building energy systems thermodynamic seasonal efficiency. *10th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2017, April, 27–28*. <https://doi.org/10.3846/enviro.2017.271>

Patentai

Martinaitis V., Bielskus J., Motuzienė V., Streckienė G., & Rimdžius D. (2021a). Device with a roof turbofan for extracting the air from a building having an air tank with a turbofan thereof and method of building ventilation with such device. *European patent No. 0673422 B1*. European Patent Office.

Martinaitis V., Bielskus J., Motuzienė V., Streckienė G., & Rimdžius D. (2021b). Įrenginys orui iš pastato traukti su stoginiu turboventiliatoriumi, turintis oro kaupyklą su kaupyklos turboventiliatoriumi ir pastato vėdinimo būdas naudojant tokį įrenginį. *Patento numeris 6800*. Lietuvos Respublikos valstybinis patentų biuras.

Martinaitis V., Rimdžius D., Bielskus J., Streckienė G., & Motuzienė V. (2019). Įrenginys orui iš pastato traukti su turboventiliatoriumi, turintis oro talpyklą ir pastato vėdinimo būdas naudojant tokį įrenginį. *Patento numeris 6613*. Lietuvos Respublikos valstybinis patentų biuras.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

Electric ventilators used in modern buildings ventilation systems account for a large portion of the overall energy required for buildings. Reducing energy consumption requires looking for new solutions to ensure a high degree of ventilation system efficiency and the required quality of air. One possible option is using technology based on renewable energy. Renewable energy resources are becoming an intrinsic source of energy for modern technologies, yet nearly all of their forms have one essential flaw: they fail to provide a stable flow of energy to satisfy the needs. For this reason, many such systems are unable to guarantee the desired ventilation functionality.

Widespread method right now is wind-driven roof turbine ventilators (RTV). Review of prior research shows that there is a pronounced shortage of studies to offer a universal interpretation of the impact of airflow processes on the efficiency of turbine ventilators, as well as an absence of a universal model of operation of such devices. Analysis of studies of hybrid systems that increase the functionality of ventilation reveals that any efforts to improve said systems are limited to the addition of an electric ventilator or solar panels, without giving any regard to the effectiveness of turbine ventilators based on the season or looking into the potential for accumulating excess wind energy.

Relevance of the thesis

The airflow processes inside turbine ventilators are complex, as a result, the quantitative and qualitative studies employed to measure their effectiveness and functionality involve a significant amount of time costs. The primary hypothesis of this thesis is that the processes taking place in turbine ventilators as such combine processes that occur inside wind turbines, ejectors and ventilators. It is elaborated further by building the concept of a thermodynamic model of operation of the device, to be used to measure the interaction of flow-based processes within said three components and apply it to improve turbine ventilators. The model built on the basis of this concept is tested through experimental research in a focused manner within the scope of this thesis.

To be able to make a quantitative comparison of devices within a broad range of operation, for the purposes of this thesis the characteristics of air extracted by wind-driven ventilators are determined not only for different wind speeds, but for varying conditions of the static environmental pressure as well. Furthermore, analysis of turbine ventilators involves tests of generated power and aerodynamic properties, a rarity in its own right.

An overview of hybrid ventilation systems points to efforts to find solutions to improve the functionality of ventilation when the wind flow is insufficient for the turbine ventilator to operate under nominal load. However, there is a shortage of research into the possibilities to accumulate excess wind energy in such systems. This thesis attempts to evaluate the potential of energy storage and usage to increase the functionality of ventilation.

The object of research

The object of this research is wind-driven roof turbine ventilators, their operation, effectiveness, and functionality.

The aim of the thesis

The aim of this thesis is to prepare a theoretical model of turbine ventilator operation based on experimentally determined mechanical and aerodynamic characteristics.

The tasks of the thesis

In order to achieve the aim of the thesis, the following objectives should be met:

1. Prepare and execute, based on the studies reviewed, an experimental research programme to structure the operating modes of the RTV into separate flow processes.
2. Carry out a quantitative and qualitative comparison of the experimental torque, rotation frequency, power, and airflow characteristics of different RTVs, determine their empiric equations and compare them with theoretical equations.
3. Propose, based on the results of experimental research, structural breakdown concept reflecting the RTV construction and flow processes to facilitate the development of a thermodynamic model of processes.
4. Design a thermodynamic model of the chosen RTV components and establish a valid link between the model and the results of experimental research.

5. Evaluate the possibilities to improve the efficiency of the use of wind energy by the RTV based on stochastic wind variation during the year-cycle.

Research methodology

The experimental research presented herein was done at the laboratory of Vilnius Gediminas Technical University (Vilnius Tech) and Portugal's National Laboratory of Civil Engineering of (LNEC). The lab tests were carried out in wind tunnels based on the international RTV test standards EN 13141-5, AS/NZS 4740:2000 as well as experimental research ideas featured in scientific publications. Wind speeds, static pressures, RTV rotor loads were varied under different simulated conditions of operation. The results of the study were processed and compared using a systemic analysis that combines the statistical, dimensionless, thermodynamic, and other methods employed in the study.

The preparation of the thermodynamic concept of the model of RTV operation relied on thermodynamic analysis, and the process dependencies identified under a qualitative and quantitative method were grounded on experiment results. Calculation of annual indicators used wind speed data from the Meteonorm application.

Scientific novelty of the thesis

Over the course of writing this thesis, the following results new to mechanical engineering were obtained:

1. The experimental research applied an integral test method that allowed assessing the ventilation functionality, aerodynamic drag and power generated by three different RTVs tested. Empiric equations of characteristics were formulated for the devices tested.
2. The extracted airflows of two different wind energy deflectors and three RTVs under different wind speeds and static environmental pressure conditions were compared from a quantitative and qualitative standpoint, using a dimensionless analysis.
3. Having established a link between the results of experimental research, the thesis showcases the concept that integrates the operation of the wind-driven RTV ejector, turbine, and roof ventilator expressed as an integral thermodynamic model of airflow interaction. The model developed under this concept allows making a quantitative and qualitative assessment of the impact of the flow processes that interact while the RTV is in operation on the device's functionality, determining the efficiency and a theoretical potential for improvement.
4. Based on the experimental research results and the statistical data of annual wind speed variation, the theoretical potential of increasing the RTV extracted airflow, energy accumulation, and functionality in a hybrid ventilation system was appraised.

Practical value of the research findings

This work presents a multi-component concept of a wind driven RTV expressed as a thermodynamic model, which allows making a qualitative and quantitative assessment of the

different flows affecting the RTV, evaluating their impact on the functionality of the device, identifying the efficiency and a theoretical potential for improvement. The results of the experimental research benefit the development of ventilation systems based on renewable wind energy and assessment of the effectiveness of such systems for the purposes of accumulating excess wind energy. The results of theoretical calculations and the approaches presented herein can be used to evaluate an increase in the functionality of ventilation.

Defended statements

1. The RTV functionality is heavily dependant on the static pressure conditions – that is why the choice of such devices should not be limited to just assessing their characteristics based on wind speed.
2. The integral thermodynamic RTV model expressed as a concept of structural breakdown of three components allows assessing the airflow interactions in wind driven RTVs as well as the possibilities to improve such devices.
3. A broad awareness of RTV characteristics allows assessing the possibilities to accumulate excess energy generated and increase the functionality of hybrid ventilation systems that use variable wind energy

Approval of the research findings

A total of 8 articles have been published on the subject of this dissertation: two of them in publications peer-reviewed in the Clarivate Analytics Web of Science databases with a citation index (Rimdžius et al., 2021; Martinaitis et al., 2020); four, in conference publications peer-reviewed in the Clarivate Analytics Proceedings database (Rimdžius et al., 2018; Streckienė et al., 2021; Streckienė et al., 2018; Januševičius et al., 2017); one, in publications of other international databases (Rimdžius & Bielskus, 2018); one, in conference report materials (Sketerskis, Rimdžius, & Martinaitis, 2018). One patent has been registered with the European Patent Bureau (Martinaitis et al., 2021). Another two patents have been registered with the State Patent Bureau of the Republic of Lithuania (Martinaitis et al., 2021, Martinaitis et al., 2019).

Three reports on the subject of this dissertation have been delivered at international conferences in Lithuania and in Germany:

- The 10th International Conference ‘*Environmental Engineering*’ in Vilnius (Lithuania) in 2017;
- *The 3rd International Conference on Power and Renewable Energy* (ICPRE 2018) in Berlin (Germany) in 2018 (two reports).

The structure of the dissertation

The thesis consists of the introduction, three chapters, general conclusions and three appendices.

The volume of the thesis is 129 pages excluding appendices. 76 numbered equations, 57 figures and 6 tables were used in the text. 73 literature sources were used when writing the thesis.

1. Review of the wind driven natural ventilation systems research

Natural ventilation is a key factor when it comes to designing energy-efficient buildings. The process of natural ventilation is governed by two fundamental principles: the force of gravity and the wind driven movement of airflows (Haw et al., 2012; Jomehzadeh et al., 2020; Park et al., 2017). These forces of a different nature usually act at the same time and in some cases may travel in the opposite directions, or may act in synergy, boosting each other up. Wind driven ventilation depends on the wind speed, direction, the geometry of the building, the type of natural ventilation devices, and other factors (Chu & Wang, 2010; van Hooff et al., 2011).

As a general rule, based on the principle of their operation, natural ventilation technologies may be categorised as passive and active (M. Ismail & Abdul Rahman, 2010; J. Lien, 2002). Passive technologies often constitute the architectural solutions of the building, additional roof or wall-mounted structures and devices (Chan et al., 2013). These could be the atria, the wing wall, the wind tower, the double skin facade, the wind catcher, the deflector, the wing jetter, the Venturi-type natural ventilator, and so on (Acared & Hunt, 2013; Elwan et al., 2018; Han et al., 2018; HASEC, 2007; Liu Li, 2007; Pfeiffer et al., 2008; Varela-Boydo & Moya, 2020). Active wind driven ventilation technologies are solutions that under the effect of the wind flow or an additional source of energy, rotate or otherwise move to perform mechanical work (J. Lien, 2002). One of the most frequently occurring pieces of active natural ventilation hardware is the roof turbine ventilator. The active natural ventilation that these devices perform directly depends on the wind flow. These devices also include hybrid turbine ventilators that have additional sources of energy and a built-in air extraction ventilator.

Even though turbine ventilators may seem easy to design, the airflow processes that take place inside the turbine ventilator are complex, requiring a wide application of experimental research (S. T. J. Lien & Ahmed, 2010). An overview of scientific literature shows that RTV analysis often involves experimental research performed in wind tunnels. As often as not, the objective is to measure the variation of the air suction flow rate depending on the wind speed (Bay & Phuong, 2012; Dale & Ackerman, 1993; Khan, Su, Riffat, et al., 2008; Lai, 2003; Ravel, 1998; West, 2001). Research also aims to determine the dependence of the extracted airflow variation on the direction of wind (Dale & Ackerman, 1993), looks into devices of varying sizes (West, 2001), analyses the impact of the cross-section area of the RTVs air inflow opening (Revel & Huynh, 2007), the significance of the type and height of the blades (Khan, Su, & Riffat, 2008; West, 2001), the effect of the roof slope (S. T. J. Lien & Ahmed, 2011), and the aerodynamic forces that affect the device (Farahani et al., 2010; Rashid & Ahmed, 2003). Studies of hybrid turbine ventilators involve testing devices with an extra electric ventilator devices that are capable of generating electricity (Shinde et al., 2016). Studies of computational fluid dynamics are usually employed to test different turbulence models and measure the extracted airflow (Farahani et al., 2010; Havens, 2004; S. T. J. Lien & Ahmed, 2010, 2011).

Review of research endeavours has highlighted an absence of studies to address the interaction of airflows and the processes of energy transformation while the device is in operation. There is also a shortage of research to experimentally establish the aerody-

namic, mechanical characteristics of turbine ventilators, analyse the efficiency and functionality of devices within a hybrid ventilation system. In a large volume of studies, RTVs are approached with numeric methods, yet the operation of these devices has never been described with theoretical models. Besides, not enough attention is being given to the potential of increasing the wind energy accumulation capacity and functionality of turbine ventilators in hybrid ventilation systems.

An overview of studies has showed that there is reason to carry out experimental research aimed at expressing the multi-component concept of the RTV as an integral thermodynamic model of airflow interaction and evaluating the potential of this device to accumulate wind energy to boost the functionality of the hybrid ventilation system.

2. Mechanical and aerodynamic research of turbine ventilators

When the RTV is in operation, the device is affected by the wind flow, the extracted airflow; plus, processes of these flows mixing are taking place, the rotor is spinning, and various aerodynamic forces and other phenomena come into play. This whole of occurrences is quite intricate; that is why developing a thermodynamic model of the turbine ventilator has to be preceded by a disclosure of the different individual processes affecting the RTV. For the purposes of this thesis, it is done with experimental research that gradually eliminates certain common factors. To reveal and experimentally check the multifaceted interaction of airflows in wind driven roof turbine ventilators, a special experimental research programme has been developed. The results of this experimental research programme are furthermore used to analyse the interactions of individual flow processes and to formulate the thermodynamic model of the device's operation on that basis.

Experimental research aims to measure the mechanical and aerodynamic characteristics, determine the impact different airflows have on the efficiency, effectiveness, and functionality. During research, RTVs are subjected to tests under different modes of operation: without the RTV; in the normal mode of RTV operation; with wind flow suction into the ventilated room; with the air extraction channel closed; with the RTV rotor blocked; with the RTV rotor under load; with the RTV rotor rotating driven by an electric motor. Depending on the mode of operation, test conditions are then varied as follows: operation in the absence of a wind flow; with the wind flow adjusted; with the RTV's air extraction channel closed; with the static pressure inside the ventilated room adjusted; with the tension of the RTV's rotor adjusted.

The research involves testing three turbine ventilators that have different constructions but the same principle of operation. The rotor construction in two of the ventilators consists of vertically arched blades, while the rotor of the third ventilator is made of vertically straight blades. For the purposes of comparing these devices with natural ventilation systems, an additional roof deflector has been selected. Figure S2.1 shows photographs, labels, and key measurements of the test devices.

Label: RTV1 Type: turbine Dimensions: $h = 190$; $w = 190$; $d_i = 128$	Label: RTV2 Type: turbine Dimensions: $h = 275$; $w = 245$; $d_i = 118$	Label: RTV3 Type: turbine Dimensions: $h = 234$; $w = 240$; $d_i = 150$	Label: D1 Type: static Dimensions: $h = 142$; $w = 255$; $d_i = 118$

Fig. S2.1. Pictures of test devices, labels, and key dimensions

Explanation of dimensions: h – the height of the device, mm; w – the width of the device, mm; d_i – the diameter of the extracted airflow opening, mm.

In this case, the tests were done on three different types of stands. The main test stand was used to measure the extracted airflow and the power generated by the devices. A modified open-return wind tunnel with a special chamber to simulate the ventilated room was used for test purposes. Figure S2.2 shows the scheme of the experimental test stand at the LNEC.

Fig. S2.2. LNEC experimental stand scheme

Explanation of figure S2.2: 1 – the test lab room; 2 – the open-return wind tunnel; 3 – the airflow stabilisation chamber; 4 – the ventilator that adjusts the static pressure in the ventilated room; 5 – the airflow stabilisation net; 6 – the extracted airflow meter; 7 – the air extraction duct; 8 – the test device; 9 – the Pitot tube for measuring the airflow speed; 10 – wind tunnel ventilators.

The test RTV is connected via the air duct to the airflow stabilisation chamber, its purpose being to simulate the ventilated room and to maintain the difference in static pressure between the inside and the outside at a level required for the test. For the purposes of the tests, wind speeds are adjusted in three stages: 2.7 m/s, 5.6 m/s, and 9.2 m/s. The test stand is equipped with a Venturi-type meter to measure the extracted airflow. The function of the airflow stabilisation chamber is to compensate pressure losses and maintain the required pressure in the chamber that simulates the ventilated room. The rotation frequency of the turbine ventilators is measured during the tests with an Extech RPM33 optical tachometer.

Since the variation of the extracted airflow in the RTV mainly depends on the wind speed and the static pressure conditions, a dimensionless analysis approach has been chosen for these tests, with the Buckingham π theorem applied for that purpose. The RTV extracted airflow fundamentally depends on the wind speed, air density, the difference in static pressure between the ventilated room and the outside air, the diameter of the RTV extracted air duct. As a general rule, this process can be expressed as the function $f(\dot{Q}_e, \rho, u, \Delta P_s, d_i)$. After these variables have been measured against the values of mass, length, and time, the Buckingham π theorem is then applied to establish 2 non-dimensional parameters:

$$\pi_1 = \frac{\Delta P_s}{\rho u^2}; \quad (S2.1)$$

$$\pi_2 = \frac{\dot{Q}_e}{u d_i^2}, \quad (S2.2)$$

here π_1 – the first non-dimensional parameter.; π_2 – the second non-dimensional parameter; $\dot{Q}_e$ – the RTV extracted airflow, m³/s; ρ – density of air, kg/m³; u – the wind speed, m/s; ΔP_s – the difference in static pressure between the ventilated room and the outside air, Pa.

In terms of construction and function, the RTV resembles the Savonius-type wind power plant, its blades largely affected by drag force. This analogy provides the foundation for the tests of RTV aerodynamic drag characteristics that were carried out for the purposes of this thesis. To estimate the energy generation potential of the subject RTVs, in addition to extracted airflow indicator and aerodynamic characteristic tests, this thesis also involved tests of the amount of power that the devices generate. The tests of the power generated by the RTV are carried out with the rotor mechanically generating load. For that purpose, the upper section of the RTV rotor is connected, via a metal axis, to the torque sensor (Lorenz DR1).

Figure S2.3 shows the results of the dimensionless analysis of all devices tested.

Fig. S2.3. The results of the extracted airflow dimensionless analysis of the tested devices

Explanation of figure S2.3: -e and -r are the direction of the extracted and intake airflow, respectively; R^2 is the coefficient of determination of the test result.

Integrated assessment of the variation of differences in wind speed and static pressure shows that, as far as air extracted is concerned, the best performance is achieved by RTV2 (with straight vertical rotor blades). Compared to an open air duct, the extracted airflow of RTV2 can be up to 8% bigger. Depending on the wind speed and the static pressure conditions, the efficiency of the extracted airflow of the rest of the devices could be lower by up to 30%. In this case, analysis of the RTV1 (rotor blades curved in the direction of the vertical axis) test data shows that the small rotor and the relatively large area of the duct opening cross-section of this device means that this device has the poorest performance ratio among the RTVs tested. Meanwhile, RTV3 (rotor blades curved in the direction of the vertical axis), its construction similar to that of RTV1, shows a slightly higher degree of effectiveness owing to the larger gaps between the blades of its rotor.

Assessment of the test results for the deflector shows that the rain cap installed above the device reduces the air extraction capacity by up to 20% compared to the open air duct. Tests conducted allowing the extraction of air to take place have showed that all RTV devices tested greatly reduce the amount of wind flow intake compared to the open air duct. In this case, judging by the absolute indicators, the RTV1 device demonstrated an air intake flow rate that was up to 55% lower. The RTV2 and RTV3 devices reduce the air intake rate by up to 45%.

The following portion of the experimental RTV research has to do with measuring the RTV torque and calculating the power generated by this device. The tests were carried out at three different wind flow speeds and equal static pressures in the ventilated room and the wind tunnel. The tests create different loads on the RTV's rotation axis and involve taking measurements of the torque values and the RTV rotation frequencies using an optical tachometer for that purpose.

The tests established that the RTV creates straight-line variation of torque depending on rotation frequency. In this case, the highest torque value can be achieved when the rotors of the devices are stationary. Speaking of the torques generated by different devices, the biggest torque is achieved by the RTV3 device. The tests established that, when the rotor is stopped at the maximum wind speed of 9.2 m/s, the torque stands at about 0.055 Nm.

Figure S2.4 shows the results of the calculations of the amount of power generated by the RTV, as established against torque values and the values of torque as per relevant rotor angular frequencies. The figure also presents the curves of extracted airflow variation depending on the rotor load.

Fig. S2.4. Variation of the power generated by the RTV and extracted airflows at different wind speeds

Legend: the wind speed at m/s is given in brackets []; R^2 is the coefficient of determination of the test result.

These tests established that, when the wind speed is 9.2 m/s, the chosen RTV can generate power up to a 0.6 W maximum. At high wind speeds and higher-than-nominal extracted airflow, this excess energy can be accumulated by the device. In this case, to achieve maximum power for accumulation, the RTVs rotation frequency must be reduced

by roughly 50%. Nonetheless, with the extracted airflow variation factored in, the extracted airflow in the devices tested can be expected to drop by nearly 20%, therefore, this kind of load on the RTV rotor axis cannot be achieved in some cases, because the amount of extracted air becomes too small to ensure the necessary ventilation of the room.

The results of the calculations of generated power presented in this figure and the one before show that the RTV test results are comparable to the theoretical bounds present in the theory of Savonius-type wind turbines (Twidell & Weir, 2015). The amount of power generated by the RTV rotor depends on the size of and load on the rotor, and varies as a cubic dependence. Assessment of the effectiveness of the maximum power generated by the RTV and its air extraction rate has revealed that the effectiveness of power generated by such devices is between 4% and 8%, and the effectiveness of air extraction is between 12% and 22%. Comparing the effectiveness of wind energy utilisation across the RTVs tested, the best performance is achieved in the RTV2 device.

3. Thermodynamic model of the triple-component concept of turbine ventilator

This chapter introduces a thermodynamic model of the roof turbine ventilator based on the hypothesis that the processes taking place inside the device as such combine processes within the wind turbine, the ejector, and the ventilator. Built on this basis, the triple-component concept is grounded on links with the results of the experimental research. The flow processes taking place inside the device are scrutinised by the analogy of the h - s diagrams, which has an application in ejector studies.

The model developed on the basis of this concept allows making a qualitative and quantitative assessment of the impact that the flow processes, which interact while the RTV is in operation, have on the functioning of the device, determining the efficiency and the theoretical potential for improvement using a definite number of experimental characteristics. The thermodynamic model presented here is limited to processes where the flows of wind and extracted air have the same structure and are considered subsonic flow, the flow speeds are subsonic and subject to the inherent qualities of ideal gas. Furthermore, the fluid flow is considered to be one-dimensional and steady-state.

Analysis of the RTV thermodynamic model begins with an assessment of the parameters of the mass flow rates and the state of flow processes at the control volume of the device. The general principles of operation are interpreted and equations needed for the purposes of calculations are derived through abstract schemes that are not connected to a particular device. In this case, considering the specifics of RTV operations and the nature of airflows, the device is approached as an open thermodynamic system.

Figure S3.1 below shows the principal scheme of the RTV complete with the ventilated room. In this scheme, cross-section 0-0 indicates the extracted air inlet; cross-section 1*-1* corresponds to the boundary of interaction of the wind flow and the RTV's blades; and cross-section 6-6 illustrates the outflow of wind and extracted air out of the RTV.

Fig. S3.1. Control volume of turbine ventilator and air flow state parameters

Having considered the airflows entering and exiting the control volume, a summary mass continuity equation is derived:

$$\dot{M}_w^+ + \dot{M}_e^+ = \dot{M}_{wl}^- + \dot{M}_{wi}^- + \dot{M}_e^-, \quad (\text{S3.1})$$

here $\dot{M}_w$ – the mass wind flow rate, kg/s; $\dot{M}_e$ – the extracted air flow rate, kg/s; $\dot{M}_{wl}$ – the mass rate of the wind flow separated from the rotor's blades, kg/s; $\dot{M}_{wi}$ – the mass rate of the wind flow that has passed the inside of the RTV rotor, kg/s.

Usually, analysis of flow processes involves an assessment of their internal energy (enthalpy) and the kinetic and potential energy of the flows. When it comes to scrutinising flow processes, the thermodynamic model presented here offers the convenience of applying full enthalpy and complete pressure state parameters that factor in the internal and kinetic energy of the flow. In this case, the wind flow is subject to the following full enthalpy equation:

$$h_w = h_a + \frac{u^2}{2}, \quad (\text{S3.2})$$

here h_w , h_a – the full enthalpy of the wind flow and the enthalpy of steady-state atmospheric air, (J/kg·K).

Considering that flow processes in this model are considered steady-state and also considering the amount of work done and the losses incurred, the following balance equation is formulated based on the first law of thermodynamics for the open thermodynamic system:

$$\dot{M}_w^+ h_w + \dot{M}_e^+ h_0 = \dot{M}_{wl}^- h_l + (\dot{M}_{wt}^- + \dot{M}_e^-) h_{ex} + \dot{E}_{RTV} + \dot{Q}_{RTV}, \quad (S3.3)$$

here $h_0 = h_a$ – the full enthalpy of the air inside the room, (J/kg·K); h_l – the enthalpy of flow entering the RTV's control volume; h_{ex} – the enthalpy of the airflow mixture exiting the device; $\dot{E}_{RTV}$ – is the energy transformation process during which technical work is carried out, W; $\dot{Q}_{RTV}$ – dissipation, W.

Speaking about the operating principle of the device and considering the outcomes of experimental research, there is a clear similarity in the construction of the RTV and other devices, as well as a structural and interactional connection between them. To be able to understand the fine points of operation of the device, Figure S3.2 shows its top-down cross-sections with the individual hypothetical RTV components decomposed. The airflow processes that interact inside the device are portrayed by breaking the RTV down into hypothetical components of the turbine, the ejector, and the ventilator.

Fig. S3.2. The turbine ventilator structural breakdown into hypothetical components: a) turbine; b) ejector; c) ventilator

Follows the integral thermodynamic model of this triple-component RTV concept. In this case, the thermodynamic models of individual components are used as a basis on which a common RTV model is built, complete with analytical examples of its application. In this case, the following system of equations is designed to resolve the model:

$$\begin{cases} \dot{M}_w \cdot (h_{1*} - h_0) \cdot \eta_t \cdot \varepsilon_t = \dot{M}_r \cdot (h_5 - h_0) \\ \dot{M}_w \cdot k_{wl} \cdot (h_{1*} - h_0) \cdot (1 - \eta_r \cdot \eta_t) \cdot \eta_{ej} \cdot \varepsilon_{ej} = \dot{M}_{ej} \cdot (h_3 - h_0) \\ \dot{M}_r \cdot (h_5 - h_0) + \dot{M}_{ej} \cdot (h_3 - h_0) = \dot{M}_w \cdot (h_{1*} - h_0) \cdot \varepsilon_Q \\ \dot{M}_r \cdot (h_5 - h_0) = k_{pr} \cdot \dot{M}_{ej} \cdot (h_3 - h_0) \end{cases} \quad (S3.4)$$

here η_t, η_{ej} – isentropic ratios of the turbine and the ejector; $\varepsilon_t, \varepsilon_{ej}$ – the portion of the wind flow energy for the turbine and the ejector; ε_Q – the air extracted efficiency, k_{ej} – the ratio of the ejected airflow.

With this system of energy balance equations applied and making assumptions regarding the isentropic utility ratios of the device, one can draw an h - s diagram depicting the variation of the airflow processes taking place in the RTV. In this case, the RTV2

device is chosen as the numeric example of the model presented here. The numeric example is not limited to just the maximum wind speed achieved during the experiments (9.2 m/s), and isentropic ratios are determined on the basis of data available in scientific literature (Fang Liu & Groll, 2013). The model assumes that the isentropic ratio values of the turbine and the ejector are 0.8, and the ratio of the separated wind flow is 0.7.

Fig. S3.3. Integral h - s diagram of STV2 thermodynamic processes

Analysis of the above scheme shows the following processes to be taking place while the RTV is in operation: during process 1*-1, the wind flow affects the turbine and performs work identical to that performed by the RTV's ventilator. In this case, part of the wind flow separates from the rotor following interaction. During process 1-2, the wind flow that enters the RTV rotor continues to be involved in the process of ejection. In this case, the wind flow has a suction effect on some of the air in the room and is assigned to the active flow. During the ejection, the wind flow energy is used to extract air from the room. Process 0-3 shows the extraction of the air in the room due to ejection taking place. Processes 2-4 and 3-4 illustrate the mixing of the wind flow and the airflow subjected to suction during the ejection. Process 0-5 indicates the air extraction from the room by the RTV ventilator. Processes 4-6 and 5-6 feature the final process where the air suctioned by the ventilator mixes with the wind flow and the mixture of the wind flow and the air suctioned via the ejection.

The numeric case of the model presented here shows how, as the wind flow blows into the RTV, part of the flow energy is consumed to spin the rotor, and another part is used up in the process of ejection. Besides, analysis of the results indicates that the airflow passing through the device needs to have enough energy to flow out of the RTV. In this

case, measuring the maximum consumption of the wind flow energy relies on the theoretical limit of the Betz criterion that applies in wind power plants. The thermodynamic model assumes that, at the highest efficiency of the device, the energy of the wind flow could theoretically decrease by 59.3% max (the horizontal dashed straight line in Figure 3.3).

The results of the numeric case have allowed reaching a determination that the energy of the airflow leaving the device drops by 25.7% (labelled ‘Energy used’ in the diagram) compared to the original wind flow energy. Whereas, considering the limit of the Betz criterion, the potential of unused energy is 33.6% (labelled ‘Residual energy potential’ in the diagram).

Analysis of the overall efficiency of wind flow energy utilisation has showed the best performance in device RTV2, and the worst, in device RTV1. In this case, RTV2 is in line with the result of the above numeric case, which is 25.7%, whilst RTV1 and RTV3 are at 18.1% and 21.2%, as appropriate. These results show that the utilisation of wind energy in all RTVs is more than twice below the possible theoretical limit of the Betz criterion.

This chapter further features a theoretical assessment of boosting the functionality of turbine ventilators in reliance of the experimental research results. Calculations of the annual volume of air extracted by the RTV are based on a hypothetical warehouse located in the city of Vilnius, and wind speed variation is based on one-minute interval data from the *Meteonorm* application. In this case, the RTV is approached on the basis of the average annual wind speed of 3.9 m/s in that particular location and the average RTV2 extracted airflow of 74 m³/h. Considering these criteria, the RTV is designed for a room with a floor space area of 68.5 m². Figure S3.3 shows the results of the calculations when the RTV2 rotor is used to accumulate energy.

Fig. S3.3. The average distribution of the extracted airflow with accumulated energy

The results of the calculations show that with the wind speed within the range of 3.9 and 5.5 m/s, the device can operate under partial load and produce a designed extracted airflow of 74 m³/h. With the wind speed above the designed value, electricity is generated

at the maximum RTV rotor load. With RTV2 operating under these conditions, the average extracted airflow would be around 98.7 m³/h. Compared with the designed airflow, it would appear that this results in an excess of about 33% (24.7 m³/h). During the remaining 57% of the time, the RTV operates in combined mode. With the wind speed below 3.9 m/s, the extracted airflow would be increased using the accumulated electrical energy that spins the RTV rotor. The calculations have determined that under such conditions of operation, the average extracted airflow of the RTV during this period could increase by roughly 36% (15.4 m³/h). Whereas the annual functionality of ventilation can be boosted by nearly 11.6%. Under the scenario chosen, this hybrid ventilation system would satisfy about 87.7% of the annual demand.

General conclusion

1. It has been experimentally determined that the extracted airflow of the RTV depends significantly on the wind speed, the difference in the static pressure between the ventilated room and the outside, and the aerodynamic properties of the RTV. Considering all aspects of variation of wind speeds and the static pressure in the room, the best air extracted performance is achieved by RTVs with straight vertical blades (RTV2). Allowing for wind flow intake to occur during the tests, it has been observed that the test devices reduce the amount of intake wind flow by between 25% and 55% compared to an open air duct. Assessment of the efficiency ratios of the maximum power generated by the RTV and the air extraction has revealed that the efficiency of the power generated by these devices is between 4% and 8%, with the air extraction efficiency of 12 % to 22 %.

2. The results of the experimental research and the principle of RTV operation have led to a determination that the RTV shares a structural and interactional connection with other aerodynamic devices. The processes of airflows interacting in the RTV can be analysed and the efficiency of the device tested through application of a triple-component concept of operation of the device, which is expressed as a thermodynamic model. This triple-component RTV consists of hypothetical components: a turbine, an ejector, and a ventilator.

3. The thermodynamic model that integrates the hypothetical components of the turbine, the ejector, and the ventilator that has been developed allows assessing, within the scope of this research, the impact of the flow processes that interact in the RTV on the functionality and efficiency of the device as well as its potential for improvement. After the model was linked to experimental research and the necessary presumptions were made, the find flow was found to consume between 2.9% and 9.1% of its theoretical power to spin the rotor in the case of the RTVs under analysis. The application of the thermodynamic model revealed that the theoretical maximum extracted airflow can be at least twice as voluminous.

4. The RTV thermodynamic model developed on the grounds of various multifaceted experimental RTV research and statistical data on annual wind speed variation has allowed measuring the extracted airflow of the RTV and the potential for accumulation on a hybrid ventilation system, as well as revealing the possibility to increase the functionality of hybrid ventilation systems that use variable wind energy. Based on the RTV2 hybrid ventilation system installed in Vilnius as chosen for the purposes of analysis, this solution has been found to possibly improve the annual ventilation functionality by nearly 11.6% in theory.

Priedai³

A priedas. Sąžiningumo deklaracija

B priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą daktaro disertacijoje

C priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Dovydas RIMDŽIUS

VĖJO ENERGIJĄ NAUDOJANČIO TURBININIO
VENTILIATORIAUS TERMODINAMINIS MODELIS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
mechanikos inžinerija (T 009)

THERMODYNAMIC MODEL OF WIND DRIVEN TURBINE VENTILATOR

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Mechanical Engineering (T 009)

2021 03 26. 12,5 sp. I. Tiražas 20 egz.
Leidinio el. versija <https://doi.org/10.20334/2021-007-M>
Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“,
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius