

VĒDINIMO ĮRENGINIO SEZONINIO EKSERGINIO NAUDINGUMO VERTINIMAS

Kęstutis GENYS¹, Violeta MISEVIČIŪTĖ², Paulius BAREIKA³

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

El. paštas: ¹kgenys@gmail.com; ²violeta.miseviciute@vgtu.lt; ³pbpaulis@gmail.com

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjamas vėdinimo įrenginio sezoninis ekserginis naudingumas, kuriam vertinti taikoma TRNSYS modeliavimo priemonė. Tyrimo objektas – oro paruošimo įrenginys, skirtas apdoroti orui, kuriuo vėdinama laboratorija. Išnagrinėjus vėdinimo įrenginio bei elementų technines charakteristikas, jame vykstančius energijos mainus, taikant TRNSYS modeliavimo priemonę sukurtas įrenginio matematinis modelis. Sukūrus modelį jis testuojamas. Pagal šiltojo ir šaltojo metų laikotarpiais atliktus stebėjimus atliekama elementų validacija, patikrinus, ar viskas veikia patikimai ir ar nuokrypiai yra leistini, modeliuojamas įrenginio veikimas. Sudarytas vėdinimo įrenginio valdymo mechanizmas, kuris leidžia modeliuoti jo veikimą šaltuoju ir šiltuoju metų laikotarpiais. Naudojantis ekserginės analizės principais sukurtas matematinis algoritmas, pagal kurį skaičiuojamas oro paruošimo įrenginio ekserginio naudingumo koeficientas. Atlikus modeliavimą gautas vėdinimo įrenginio sezoninis ekserginis naudingumas – 3,94 procentai.

Reikšminiai žodžiai: ekserginė analizė, ekserginis naudingumas, modeliavimas, rekuperatorius, TRNSYS, vėdinimo įrenginys.

Įvadas

Lietuvoje nuo 2018 metų pagal 2010 metų ES direktyvos „Dėl pastatų energinio naudingumo“ (2010/31/ES) reikalavimus visi naujai statomi pastatai ar jų dalys turės atitikti A+ energinio efektyvumo klasės reikalavimus, o nuo 2021 metų A++ klasės reikalavimus. Sugriežtinus pastatų energijos vartojimo reikalavimus, siekiama sumažinti energijos sąnaudas pastatams šildyti, todėl pastato atitvaros šiltinamos storu izoliacijos sluoksniu, montuojami didelę šiluminę varžą turintys langai, ir pastatas tampa sandaresnis. Siekiant užtikrinti tinkamą oro kaitą, ne tik viešosios ar pramonės paskirties, bet ir gyvenamuosiuose pastatuose pradedamos diegti mechaninės vėdinimo sistemos.

Viešosios, pramonės paskirties bei daugelis naujai statomų gyvenamųjų pastatų vėdinami vėdinimo įrenginiais. Galima rinktis iš įvairių variantų, o alternatyvos dažniausiai lyginamos remiantis ekonominiu požiūriu, nors vis dažniau atkreipiamas dėmesys ir į energinį efektyvumą. Dėl pastatui keliamų energijos vartojimo reikalavimų svarbu, kad ne tik šildymo, bet ir vėdinimo sistema veiktų efektyviai, todėl tradicinių šilumos iš šalinamo oro atgavimo įrenginių – šilumogražių – nepakanka, atsiranda poreikis diegti efektyvesnius, į vėdinimo įrenginį integruoti šilumos siurblių, ieškoti galimybių, kaip panaudoti atsinaujinančius energijos šaltinius. Įvairių sprendinių derinimas tarpusavy-

je tokiose sistemose neišvengimas, todėl svarstoma, kaip teisingai parinkti sprendinių derinį, kad vėdinimo sistema veiktų efektyviausiai.

Siekiant kurti tvarias energetines sistemas priva- lu atsižvelgti ir į patalpų mikroklimato sistemų energinį efektyvumą. Termodinaminių sistemų analizė, remiantis pirmuoju termodinamikos dėsniu (PTD), yra labiausiai paplitęs vertinimo būdas, leidžiantis nesudėtingai suprasti procesų naudingumą bei efektyvumą. Tradiciškai vertinant energetines sistemas pagal PTD neatsižvelgiama į energijos kokybės lygį, geriausiai į tai atsižvelgiama taikant ekserginį vertinimą. Remiantis antruoju termodinamikos dėsniu (ATD) įvertinamas sistemos galimas atlikti darbas – kol sistemos parametrai susilygis su apsupties parametrais – atliekama ekserginė analizė. Lyginant atliktą darbą su didžiausiu galimu tokiomis sąlygomis atlikti įvertinamas sistemos efektyvumas.

Kaip rodo atlikti įvairių mokslininkų tyrimai, ekserginis požiūris nagrinėjamos įvairios vėdinimo sistemos. Tiriant natūralaus vėdinimo sistemą (Wang, Li 2010) rezultatams palyginti atlikta ir mechaninės vėdinimo sistemos ekserginė analizė, nustatyta, kad maksimalus ekserginis natūralaus vėdinimo sistemos efektyvumas yra 16,9 %.

Atliekant individualaus namo mechaninio vėdinimo sistemos su desikantiniu ir rotaciniu šilumokaičiais energinę ir ekserginę analizę buvo nustatytas sistemos ekserginis efektyvumas, jis lygus 11,1 % (Dincer, Rosen 2007). Nagrinėjant gyvenamojo namo šildymo, vėdinimo ir karšto vandens tiekimo sistemas ATD visose sistemose, kur patalpoms ar tiekiamam orui šildyti vartojama elektros energija, ekserginis sistemos naudingumas yra itin žemas – apie 5–7 %. Kai sistemose naudojami šilumos siurbliai, kurių pašildytas vanduo naudojamas patalpoms ir tiekiamam oro srautui pašildyti, termodinaminio naudingumo koeficientas padidėja nuo 26 % iki 30 % (Zmeureanu, Yu Wu 2007).

Dincer, Rosen (2007), atlikę „oras – vanduo“ tipo šilumos siurblio ekserginę analizę, nustatė, kad ekserginiu požiūriu mažiausiai efektyvūs šilumos siurblio elementai – kondensatorius ir kompresorius. Visos sistemos apskaičiuotas ekserginis efektyvumas siekia 59,8 %, didžiausias šilumos siurblio COP (angl. *coefficient of performance*) gautas, kai išorės oro temperatūra – 2,2 °C, kuri gana artima tai (3,0 °C), kurią Lietuvos klimato sąlygoms kaip atitinkančią maksimalius sistemos eksergijos poreikius pažymi autoriai (Martinaitis *et al.* 2010).

Taikant realaus penkių aukštų administracinio pastato matematinį modelį, atlikta kintamojo oro srauto vėdinimo sistemos ekserginė analizė. Gauta, kad visos sistemos ekserginis efektyvumas siekia vos 2–3 % (Wei, Zmeureanu 2009). Nagrinėdami pastato mechaninę vėdinimo sistemą bei vertindami jos ekserginį naudingumą Dutka, Mroz (2014) pateikia matematinį algoritmą, formules, kuriomis remiantis buvo atliekama ekserginė analizė. Atliekant ją atsižvelgiama ir į drėgmės kiekį, esantį ore, pateikiamos oro koentalpijai apskaičiuoti skirtos formulės. Salaraz-Pereyra *et al.* (2011) panašiai kaip ir Dutka, Mroz (2014) straipsnyje gilinasi į oro koentalpijos skaičiavimą, įvertinant ore esančią vandens garų dalį.

Siekiant išsiaiškinti, kuriame oro ruošimo įrenginio komponente patiriami didžiausi eksergijos nuostoliai, jam taikoma ekserginė analizė (Xiao-xia *et al.* 2012). Atlikus ją, nustatyta, kad įrenginiui veikiant šiltuoju metų laikotarpiu bendras visos sistemos ekserginis naudingumo koeficientas yra lygus 30 %, o didžiausi eksergijos nuostoliai (60 %) patiriami oro tiekimo ir ištraukimo ventiliatoriuose bei ortakių tinkle. Įrenginiui veikiant šaltuoju metų laikotarpiu, gaunami panašūs rezultatai, didžiausi eksergijos nuostoliai – ventiliatoriuose, o bendras visos sistemos ekserginis efektyvumas dar žemesnis – 14,47 %.

Schmidt (2009) pabrėžia ekserginės analizės svarbą siekiant efektyviau vartoti energiją pastatuose ir nors nenagrinėja konkrečios sistemos bei neieško būdų, kaip

ją modernizuoti, bet padeda suprasti ekserginės analizės paskirtį, naudą bei taikymą inžinerinėje praktikoje.

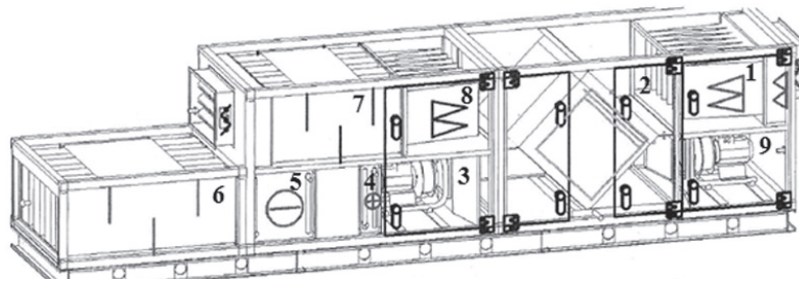
Be ekserginės analizės metodo, pastatų mikroklimato sistemoms tirti taikomos ir modeliavimo priemonės. Kaip rodo atlikta tyrimų apžvalga, dažniausiai energetinių sistemų veikimui modeliuoti pasirenkama TRNSYS (angl. *Transient System Simulation Tool* – kintamų sistemų modeliavimo programa) – tai išsami kompiuterinio modeliavimo programa, kuria naudojantis galima sukurti įvairias energetines sistemas. Inžinieriai ir mokslininkai visame pasaulyje tirdami ir plėtodami įvairias pažangiąsias energetines sistemas naudojami šia programa. TRNSYS kūrėjai pabrėžia, kad vienas svarbiausių šios programos privalumų – universalumas.

Siekdami iširti energinį ir ekserginį administracinio pastato Olandijoje inžinerinių sistemų efektyvumą Sakulpipatsin *et al.* (2010) atlieka modeliavimą TRNSYS programa. Atlikus tyrimą, pastebima, kad nors ir pastato sistemos veikia efektyviai, o pastato energijos poreikiai atitinka Olandijoje keliamus reikalavimus, bendras pastato šildymo sistemos ekserginis efektyvumas tėra 17,15 %, palyginti su energiniu efektyvumu, siekiančiu 77,55 %. Nagrinėto pastato vėdinimo sistemos ekserginis efektyvumas dar žemesnis – 6,81 %.

Gustafsson *et al.* (2014) taikydami net kelias modeliavimo priemones – Matlab Simulink ir TRNSYS – tiria tipišką šiaurės vakarų Europos gyvenamąjį namą. Modeliuojamos kelios to paties namo šildymo sistemos, naudojančios šilumos siurblių. Skirtumas tarp *Matlab Simulink* ir TRNSYS programomis gautų rezultatų išlieka nežymus. Ši išvada labai svarbi, nes tiriamuose pastatuose įdiegtos vėdinimo sistemos artimos projektuojamoms administraciniuose ir komercinės paskirties pastatuose. Todėl labai svarbu taikant modeliavimo priemonę žinoti, ar ji tinkama tokiam tyrimui.

Renkantis kompiuterinę programą konkrečiam tyrimui ne ką mažiau svarbus yra programos tikslumas, ne tik galimybės ją pritaikyti užsibrėžtam tikslui pasiekti. Safa *et al.* (2015) nagrinėja šilumos siurblio „oras – oras“ panaudojimo galimybę individualiame name. Matavimai atlikti tiek šiltuoju, tiek šaltuoju metų laikotarpiu, vėliau tyrimo rezultatai lyginami su TRNSYS programa gautais rezultatais. Iš esmės atliktas patikrinimas leidžia teigti, kad TRNSYS programa gali būti taikoma įvairių inžinerinių sistemų tyrimams ir jos teikiami rezultatai yra tikslūs.

Lucas *et al.* (2012) lygina TRNSYS ir CODYRUN programas modeliuodami tiek vienos zonos, tiek kelių zonų pastatus TRNSYS ir CODYRUN aplinkose. Pastaroji programa, skirtingai nei TRNSYS, skirta tik pastatų energi-



1 pav. Oro tiekimo ir ištraukimo įrenginys:

1 (8) – filtras; 2 – rekuperatorius, efektyvumas – 64,6 %; 3 (9) – tiekimo (ištraukimo) ventiliatorius, elektrinė galia – 0,35 kW, projektinis tiekiamo (ištraukiamo) oro kiekis – 1450 m³/h; 4 – šildymo sekcija, 10,64 kW galios šilumokaitis, į jį tiekiamas 65,0 °C vandens etilenglikolio mišinys (35,0 %), grįžtančio šilumnešio temperatūra – 50,0 °C, pratekančio šilumnešio srautas – 0,18 l/s; 5 – vėsinimo sekcija, 4,87 kW galios šilumokaitis. Į jį tiekiamas 12,0 °C vandens etilenglikolio mišinys (35,0 %), grįžtančio šaltnešio temperatūra 15,0 °C, pratekančio šaltnešio srautas – 0,43 l/s; 6 (7) – triukšmo slopintuvas

Fig. 1. Air supply and extract equipment:

1 (8) – filter; 2 – recuperator of 64.6% efficiency; 3 (9) – supply (extract) fan of 0.35 kW electric power, rated supply (extract) air flowrate – 1450 m³/h); 4 – heating section of 10.64 kW capacity, supplied 65 °C mixture of water and ethylene glycol (35.0%), return heat agent of 50.0 °C temperature, the flow rate of heat agent – 0.18 l/s); 5 – cooling section of 4.87 kW capacity, supplied 12.0 °C mixture of water and ethylene glycol (35.0%), return refrigerant of 15.0 °C temperature, the flowrate of refrigerant – 0.43 l/s); 6 (7) – silencer

niam modeliavimui ir nepasizymi tokiu universalumu kaip TRNSYS. Sakellari *et al.* (2006) TRNSYS programą kartu su EES (angl. *engineering equation solver*) taiko tirdami individualų namą, siekdami jam rasti geriausią šilumos siurblio naudojimo būdą žematemperatūriam šildymui. TRNSYS programa taikoma pastato, jo inžinerinių sistemų aprašams, o šilumos siurblys aprašomas EES aplinkoje.

Daugelyje apžvelgtų straipsnių akcentuojamas ekserginio energinių sistemų vertinimo aktualumas, nėra daug tyrimų, kur atliekama vėdinimo sistemų, jų įrenginių ekserginė analizė. Išnagrinėtų energetinių sistemų ekserginės analizės pavyzdžių analizė rodo, kad gaunami įvairūs rezultatai. Dalis tyrėjų (Dincer, Rosen 2007; Martinaitis *et al.* 2010), kurių metodika – ekserginė analizė, taikoma tyrimui, gauna aukštus ekserginio naudingumo koeficientus – apie 50–70 %, priklausomai nuo nagrinėjamos sistemos. Kiti tyrėjai, nagrinėdami inžinerines sistemas, nenurodo tikslios metodikos, kuria remiantis buvo atliekami skaičiavimai, todėl jų tyrimuose ekserginis efektyvumas gaunamas iki 20,0 %. Apžvelgus tyrimus, atiktus taikant TRNSYS modeliavimo priemonę, daroma išvada, kad dėl savo universalumo ji dažnai taikoma kartu su kitomis modeliavimo priemonėmis, tačiau trūksta darbų, kuriuose ši modeliavimo priemonė būtų išsamiai nagrinėjama. Paprastas nagrinėjamos energinės sistemos modelio kūrimas bei universalus, pagal vartotojo norus gautų rezultatų apdorojimas skatina pritaikyti šią programą tiriamo objekto – oro tiekimo ir

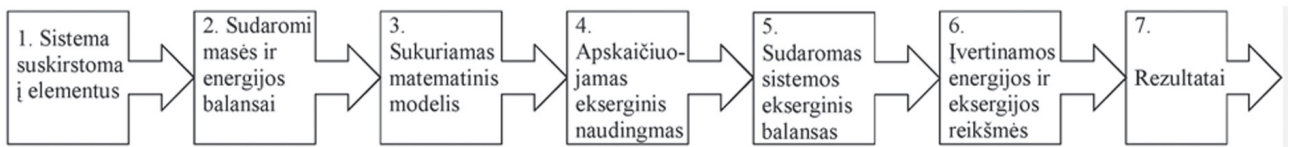
ištraukimo įrenginio – ekserginei analizei atlikti ir veikimui modeliuoti. Darbo tikslui pasiekti naudojantis TRNSYS sukuriama vėdinimo įrenginio modelis ir atliekama ekserginė viso modelio ir jį sudarančių komponentų analizė. Sukūrus modelį, jis testuojamas, pagal šiltojo ir šaltojo metų laikotarpiams atliktus stebėjimus atliekama elementų validacija, patikrinus, ar viskas veikia patikimai ir nuokrypai yra leistini, modeliuojamas įrenginio veikimas.

Tyrimo objektas

Tyrimo objektas yra oro tiekimo ir ištraukimo įrenginys (1 pav.), esantis VGTU Pastato energetinių ir mikroklimato sistemų (PEMS) laboratorijoje. Atliekama šio vėdinimo įrenginio ir jame esančių elementų ekserginė analizė bei modeliavimas TRNSYS programa.

Vėdinimo įrenginys sudarytas iš tiekiamam (1, 2, 3, 4, 5, 6) ir ištraukiamam (7, 8, 2, 9) iš patalpų orui skirtų apdoroti elementų, kurių charakteristikos pateikiamos šalia schemas (1 pav.). PEMS laboratorijoje esančių įrenginių ir sistemų veikimui stebėti bei kontroliuoti įrengta kompiuterinė programa SCADA, kuri nuolat įrašo ir kaupia vėdinimo įrenginio veikimo parametrus: oro temperatūrą charakteringuose taškuose, tiekiamo ir šalinamo oro srautus, šaltnešio ir šilumnešio temperatūrą bei srautus.

Atliekant vėdinimo įrenginio ekserginę analizę vertinami tik tie elementai (1 pav., 2, 3, 4, 5, 9), kuriuose



2 pav. Ekserginės analizės atlikimo eiga
Fig. 2. Order of exergy analysis performance

vyksta energijos transformacijos procesai, todėl sudarant matematinį modelį filtrai ir triukšmo slopintuvai dėl savo nežymios įtakos oro tekėjimui nėra vertinami. Visi likę vėdinimo įrenginio komponentai aprašomi TRNSYS aplinkoje. Nors nagrinėjamas tik oro tiekimo ir ištraukimo įrenginys, tačiau būtina tinkamai įvertinti ir patalpą, kuri tiesiogiai turi įtakos įrenginio veikimui. Priklausomai nuo patalpoje vykstančių procesų, žmonių, esančių patalpoje, skaičiaus, jų veiklos pobūdžio, kinta iš patalpos šalinamo oro temperatūra, nuo to priklauso šilumogrąžyje atgaunamos šilumos kiekis, kuris gali smarkiai sumažinti šildymo sekcijoje orui perduodamą energijos kiekį. PEMS laboratorija vertinama remiantis atliktu tyrimu (Fabijonavičius 2012), kuriame tiesiogiai buvo nagrinėta laboratorija.

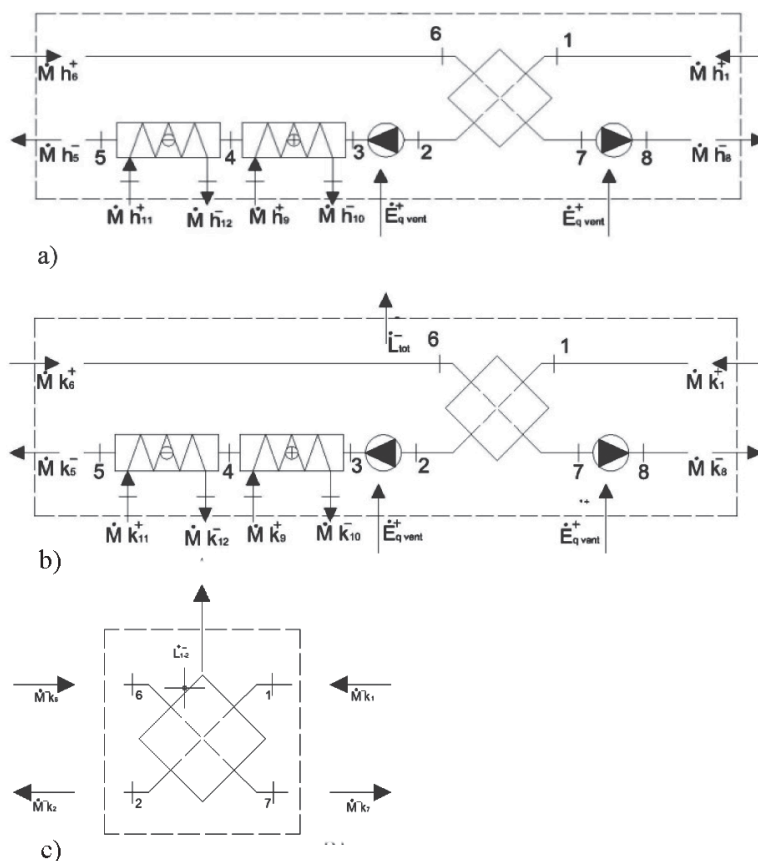
Tyrimė daroma prielaida, kad darbo valandomis (darbo dienomis 8–17 val.) laboratorijoje nuolatos dirba šeši žmonės, kiekvieno iš jų į aplinką skleidžiamas šilumos srautas pagal darbo kategoriją – 140 W (Paulauskaitė, Valančius 2012). Įvertinamas įrangos į aplinką išskiriamas

šilumos srautas – 2 kW. Laikoma, kad šildymo sezono metu vėdinimo įrenginys veikia visą darbo savaitę, o savaitgaliais išjungiamas, nes laboratorijoje nėra šildymo prietaisų. Šiltuoju metų laikotarpiu vėdinimo įrenginys veikia darbo valandomis nuo pirmadienio iki penktadienio. Kitu laiku vėdinimas nevyksta. Nustatoma, kad tiekiamo į patalpą oro temperatūra vasarą – 18,0 °C, žiemą – 22 °C.

Vėdinimo įrenginio ekserginės analizės metodika

Remiantis Dincer, Rosen (2007) metodika, pateikiama 2 pav., iš pradžių nustatomos sistemos ribos (brūkšninė linija) bei identifikuojami tiriamos sistemos elementai (3 pav., a ir 3 pav., b).

Tiriama termodinaminė sistema suskirstoma į atskirus elementus, jų skaičius priklauso nuo atliekamo tyrimo bei pageidaujama gauti rezultatų tikslumo. Nustatomi masės ir energijos balansai, nustatomi ar apskaičiuojami energijos, šilumos kiekiai kiekviename elemente bei šilumnešių bū-



3 pav. Nagrinėjamos sistemos energijos (a), eksergijos (b) srautų ir rekuperatoriaus (c) schema
Fig. 3. Schemes of energy (a), exergy (b) flows of analysed system and recuperator (c)

senos parametrai. Atsižvelgiant į tiriamą procesą, analizės išsamumą ir sudėtingumą bei norimų gauti rezultatų pobūdį, sudaromas tiriamos sistemos modelis. Tam gali būti taikomos ir kompiuterinės programos, modeliuojančios tokių sistemų veikimą. Įvertinamos energijos ir eksergijos reikšmės. Sudaromas ekserginis sistemos balansas, iš kurio taip pat matyti proceso metu gauti eksergijos nuostoliai. Įvertinamas sistemos ekserginis naudingumas. Interpretuojami rezultatai, kuriais remiantis daromos išvados.

Nagrinėjamos sistemos energijos ir eksergijos srautai pavaizduoti 3 pav., a, b.

Sudarant energinius, ekserginius balansus bei atliekant ekserginę vėdinimo įrenginio analizę nagrinėjami tie elementai, kuriuose vysta energijos mainai. Principinė įrenginio schema (3 pav.) sudalinama pjūviais. Rekuperatoriaus schema pavaizduota 3 pav., c. Pjūviai atliekami tuose taškuose, kur keičiasi oro, šilumnešio ar šaltnešio parametrai (žr. rekuperatoriaus pjūvio schemą). Analogiškai atliekami kitų elementų pjūviai.

Modeliuojant oro paruošimo įrenginio veikimą TRNSYS modeliavimo programa apskaičiuojama oro temperatūra, santykinė ir absoliučioji drėgmė, šilumnešio ir šaltnešio temperatūra charakteringuose taškuose. Remiantis šiais duomenimis pagal (1) formulę sudaroma nagrinėjamos sistemos energinio balanso lygtis:

$$\begin{aligned} \dot{M}_{oro}c_{oro}(t_6 - t_1) + \dot{M}_{šil}c_{šilum}(t_9 - t_{10}) + 2\dot{E}_{q,vent} = \\ \dot{M}_{oro}c_{oro}(t_5 - t_8) + \dot{M}_{šalt}c_{šalt}(t_{12} - t_{11}), \end{aligned} \quad (1)$$

čia \dot{M}_{oro} – oro masinis debitas, kg/s; c_{oro} – oro savitoji šiluma, kJ/(kgK); $\dot{M}_{šil}$ – šilumnešio masinis debitas, kg/s; $c_{šilum}$ – šilumnešio savitoji šiluma, kJ/(kgK); t_i – temperatūra fluide i -tajame pjūvyje, °C; $\dot{E}_{q,vent}$ – ventiliatoriaus orui perduodamas energijos srautas, kW; $\dot{M}_{šalt}$ – šaltnešio masinis debitas, kg/s; $c_{šalt}$ – šaltnešio savitoji šiluma, kJ/(kgK).

Kiekviename charakteringame taške masinė koentalpija apskaičiuojama pagal (2) formulę:

$$k_j = h_j - T_a s_j, \quad (2)$$

čia k_j – koentalpija j -ame taške, kJ/kg; h_j – entalpija j -ame taške, kJ/kg; T_a – aplinkos oro temperatūra, K; s_j – entropija j -ame taške, kJ/(kgK).

Turint masinius srautus bei koentalpijas visuose charakteringuose taškuose užrašoma ekserginio balanso lygtis (3) sistemai:

$$\begin{aligned} \dot{M}_{oro}k_1 + \dot{M}_{oro}k_6 + \dot{M}_{šil}k_9 + \dot{M}_{šalt}k_{12} + 2\dot{E}_{q,vent} = \\ \dot{M}_{oro}k_5 + \dot{M}_{oro}k_8 + \dot{M}_{šil}k_{10} + \dot{M}_{šalt}k_{11} + \sum \dot{L}_{tot}, \end{aligned} \quad (3)$$

čia $\sum \dot{L}_{toto}$ – sistemos eksergijos nuostoliai, kW

Remiantis 3, 4 formulėmis pagal 5 lygtį apskaičiuojamas sistemos termodinaminio naudingumo koeficientas šildymo ir vėsinimo sezonams (6, 7 lygtys):

$$\sum [\dot{E}_{k,q,w}^+] - \sum [\dot{E}_{k,q,w}^-] = \sum [\dot{L}_{tot}]; \quad (4)$$

$$\dot{L} = T_a \Delta S; \quad (5)$$

$$\eta_{šild} = \frac{\dot{M}_{oro}(k_5 - k_1)}{\dot{M}_{oro}(k_6 - k_8) + \dot{M}_{šil}(k_9 - k_{10}) + \dot{E}_{vent.tiek} + \dot{E}_{vent.šal}}; \quad (6)$$

$$\eta_{ves} = \frac{\dot{M}_{oro}(k_1 - k_5)}{\dot{M}_{oro}(k_8 - k_6) + \dot{M}_{šal}(k_{12} - k_{11}) + \dot{E}_{vent.tiek} + \dot{E}_{vent.šal}}, \quad (7)$$

čia $\dot{E}_{k,q,w}^{+,-}$ – sistemos per įrenginį k gauta (+) arba atiduota (–) techninio darbo galia, šiluminė (q), virsmo (w) eksergija, kW; \dot{L} – eksergijos nuostoliai, kW; ΔS – proceso metu pagaminta entropija, kJ/(kgK); $\eta_{šild}$ – šildymo sezono ekserginis naudingumas; η_{ves} – vėsinimo sezono ekserginis naudingumas; $\dot{E}_{vent.tiek,šal}$ – tiekiamo, šalinamo oro ventiliatoriaus perduodamas energijos srautas, kW.

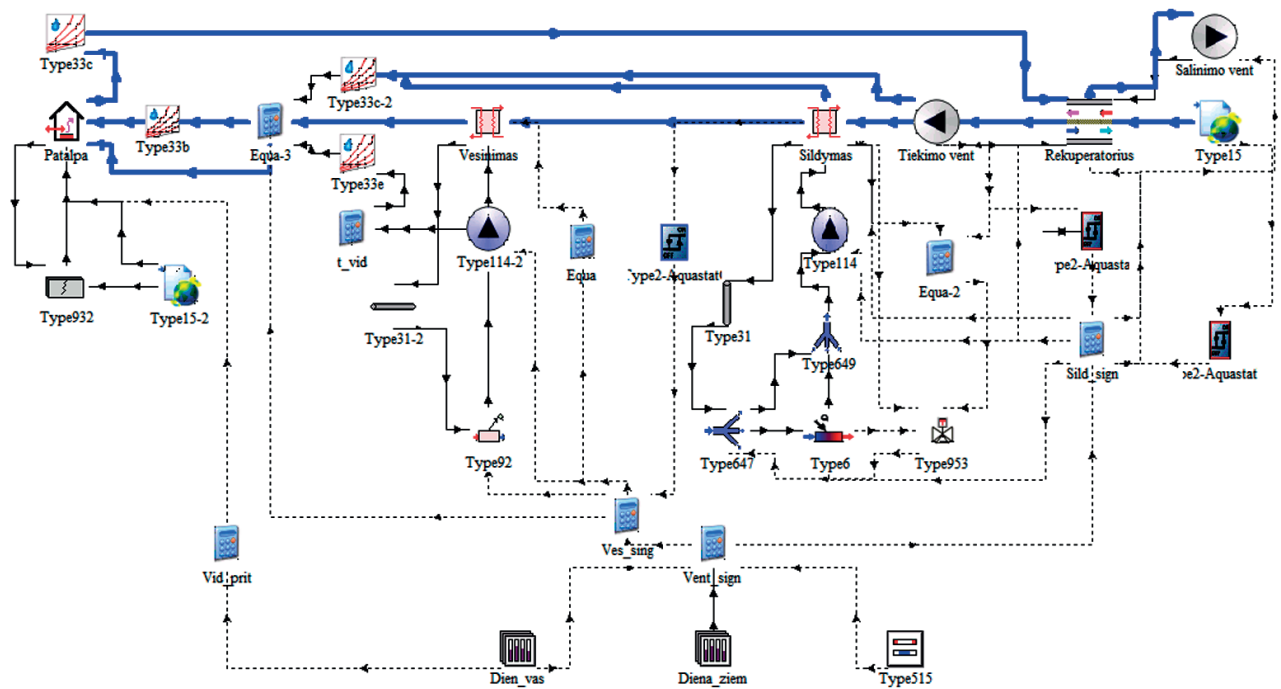
Išreiškus 1–7 formulėmis reikiamus ekserginės analizės metodu įvertinti dydžius, aprašomas matematinio modelio nagrinėjamai sistemai kūrimas TRNSYS aplinkoje.

Vėdinimo įrenginio modelio kūrimas ir pagrindimas

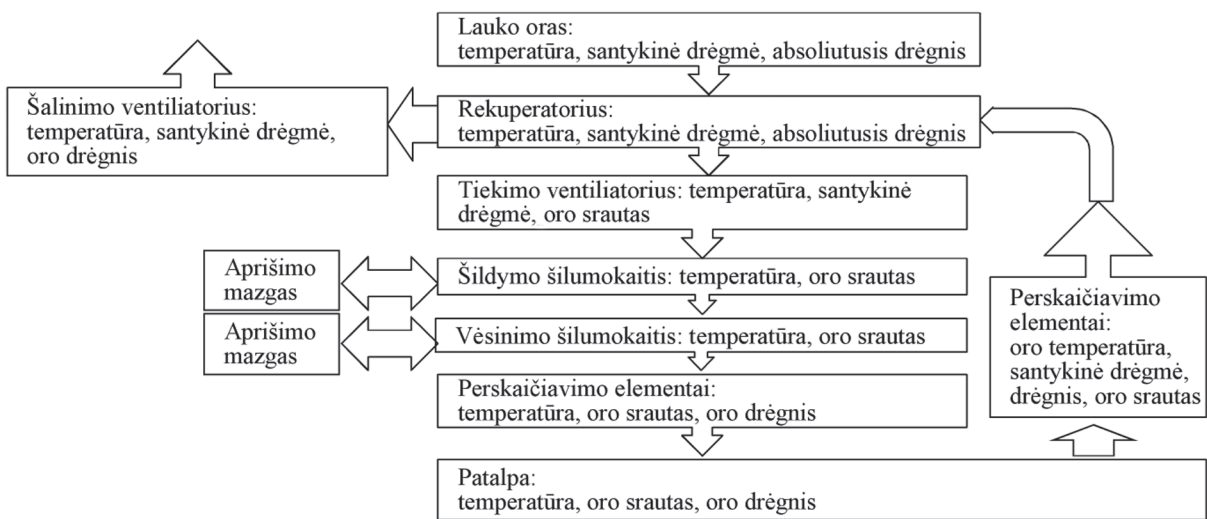
TRNSYS programos pagrindą sudaro įvairios inžinerines sistemas ar įrenginius simbolizuojantys modeliai (*Type*). Kiekvienas iš jų veikia pagal savo matematinį algoritmą, kuris priklausomai nuo įvesties parametrų leidžia generuoti išvesties duomenis. Jungiant keletą TRNSYS modelių į grandinę galima sukurti nagrinėjamos inžinerinės sistemos modelį. Esant būtinybei rasti parametrus, kurių esami modeliai negali apskaičiuoti, galima įterpti skaičiuotuvus, kuriuose sukūrus atitinkamus įvesties kintamuosius ir skaičiavimus aprašius formulėmis, reikiamus dydžius galima apskaičiuoti. Įvairiems kintamiesiems iš išorinių programų (pavyzdžiui, klimato duomenims) įkelti naudojami specialūs tam pritaikyti modeliai, o rezultatams apdoroti naudojami spausdintuvai, kurie esant poreikiui gali būti susieti su failais, į kuriuos yra įrašomi modeliavimo rezultatai. Matematinis nagrinėjamos sistemos modelis pradedamas kurti nuo svarbiausių vėdinimo įrenginio elementų, kurie įvardijami ir aprašomi darbe (Genys 2015).

Šie modeliai sujungiami tarpusavyje, iš jų sudaromas nagrinėjamo vėdinimo įrenginio modelis (4 pav).

Skirtingi modeliai turi savitus įvesties ir išvesties parametrus, skiriasi ir matematinis algoritmas, todėl svarbu



4 pav. Vėdinimo įrenginio modelis, sudarytas TRNSYS programa
 Fig. 4. Model of air handling unit made by TRNSYS



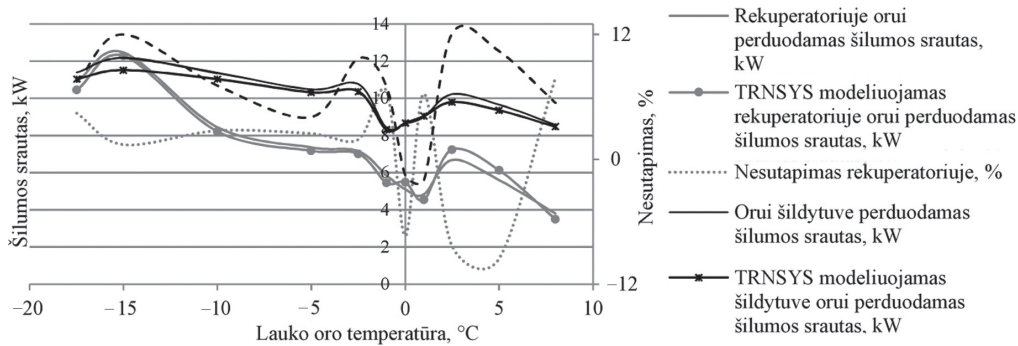
5 pav. Modelio algoritmas
 Fig. 5. Algorithm of a model

išsirinkti tokius modelius (1 lentelė), kurie yra artimiausi realiame objekte esantiems vėdinimo įrenginio elementams (1 pav.), kad būtų galima tikėtis tikslių rezultatų. Modelio algoritmas pateikiamas 5 pav.

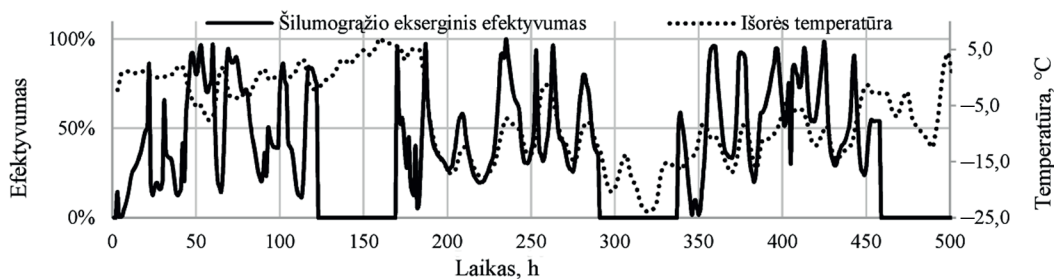
Sukūrus modelį tikrinama, ar jis tiksliai atkartoja realaus įrenginio veikimą. Esant reikalui galima įvesti atitinkamas pataisas, kurios leistų priartinti sukurtą matematinį modelį prie realaus. Tam tikslui panaudojami programos SCADA kaupiami duomenys apie vėdinimo įrenginio veikimą. Iš viso duomenų bazėje esančio archyvo išsirenkami

laikotarpiai, kai veikė vėdinimo įrenginys, šildymo ir vėsinimo sekcijos.

Tikrinant, ar vėdinimo įrenginio šildymo, vėsinimo sekcijos ir rekuperatoriaus modeliai tiksliai sumodeliuoti ir atitinka realaus įrenginio elementus, svarbu išsirinkti visus duomenis, laiko momentus su skirtingomis temperatūromis, kurioms esant veikia įrenginys. Nepakanka atlikti pagrindimą vos vienu laiko momentu, esant konkrečiai oro temperatūrai, nes iškyla grėsmė, kad, pakitus temperatūrai, pasikeis realaus įrenginio charakteristikos, o modeliuo-



6 pav. Modelio pagrindimo rezultatai
Fig. 6. Results of model validation



7 pav. Šilumogražio ekserginis naudingumas
Fig. 7. Exergy efficiency of heat recovery unit

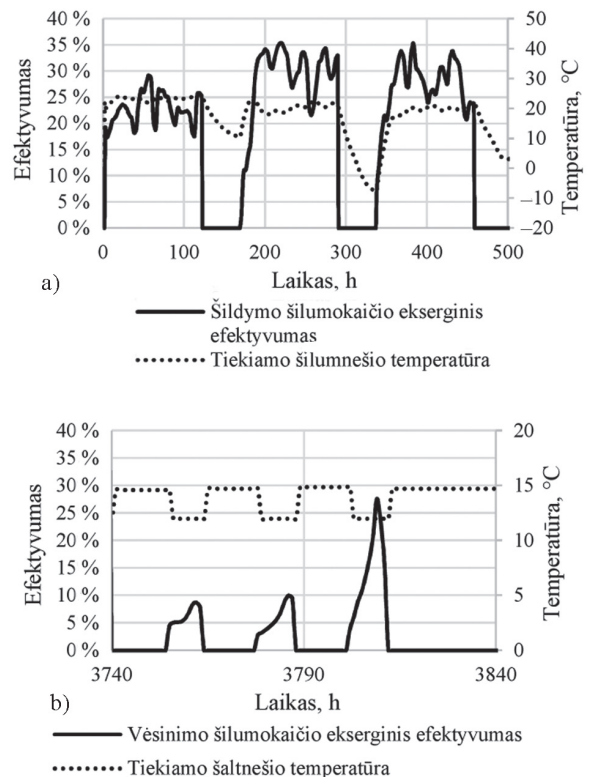
jami rezultatai per daug nukryps nuo realybės gaunamų rezultatų. Duomenų analizei išrinkus charakteringus laiko momentus, gauti nesutapimai tarp SCADA stebimų duomenų ir TRNSYS modeliavimo rezultatų pateikiami 6 pav.

Pagal įvesties parametrus apskaičiuojamas orui perduodamas šilumos srautas, kuris vėliau lyginamas su šilumos srautu, apskaičiuojamu TRNSYS programa. Kaip matyti iš 6 pav. pateiktų rezultatų, programa apskaičiavus ir išmatavus šilumos srauto reikšmes rekuperatoriuje gaunamas nesutapimas nesiekia 10,0 %, o šildytuve 12,0 %, todėl galima teigti, kad programa atliekamas pakankamai tikslus modeliavimas.

Vėdinimo įrenginio veikimo modeliavimo rezultatai

Sukūrus matematinį modelį, išanalizavus jį sudarančius modelius, patikrinus šių modelių tarpusavio sąveiką ir atlikus pagrindimą pereinama prie modelio ekserginės analizės. 7 pav. matyti, kad šilumogražio efektyvumas tiesiogiai priklauso nuo išorės oro temperatūros. Išorės temperatūrai krintant iš patalpos šalinamo šilto oro srauto potencialas didėja, todėl gaunami didesni eksergijos nuostoliai, mažėja ir įrenginio ekserginis efektyvumas.

8 pav., a, pavaizduotas šildymo šilumokaičio ekserginio efektyvumo kitimas per pirmąsias 500 metų valandų, o



8 pav. Šildymo (a) ir vėsinimo (b) šilumokaičio ekserginis naudingumas

Fig. 8. Exergy efficiency of heating (a) and cooling (b) heat exchangers

8 pav., b, – vėsinimo šilumokaičio ekserginio efektyvumo kitimas nuo 3740 iki 3840 metų valandos.

Šildymo šilumokaičio ekserginis efektyvumas tiesiogiai priklauso nuo tiekiamo šilumnešio temperatūros (dešinėje) (8 pav., a). Šiai didėjant efektyvumas nesiekia 30,0 %, pavyzdžiui, per pirmąją metų savaitę, tačiau šilumnešio temperatūrai nukritus, efektyvumas padidėja, tačiau vis tiek išlieka nedidelis, didžiausias nagrinėjamu laikotarpiu 35,0 %. Iš 8 pav., b, matyti, kad vėsinimo šilumokaičio efektyvumas labai nedidelis – svyruoja apie 10,0 %. Nors žiūrint į ilgesnio laikotarpio šilumokaičio efektyvumo kitimą galima išvelgti momentų, kai efektyvumas pakyla iki 80,0–90,0 %, tačiau tai tik momentinės reikšmės, gaunamos oro temperatūrai pakilus ir išjungus cirkuliaciniam siurbliui, tačiau šilumos šaltiniui dar nepradėjus atvėsinti šaltnešio srauto.

Nagrinėjant vėsinimą reikia atsižvelgti į tai, kad vėsinimo sistemos Lietuvoje naudojamos tik patalpų komfortui pagerinti. Priešingai nei šildymas, vėsinimas nėra gyvybiškai svarbus. Pavyzdžiui, nagrinėjamame modelyje per metus buvo vėsinama vos 461 valandą, todėl būtina pabrėžti, kad per metus vėdinimo įrenginys veikė 4909 valandas. Todėl, tobulinant sistemą, visų pirma reiktų sumažinti eksergijos poreikius šildymui.

Nagrinėjamame vėdinimo įrenginyje tiekimo ir šalinimo dalyse sumontuoti skirtingų galių ventiliatoriai. Tiekimo ventiliatoriaus galia – 2,2 kW, šalinimo – 3,0 kW. Kadangi ventiliatoriai sumontuoti tiekiamo oro sraute, todėl laikoma, kad visa jų elektrinė galia perduodama oro srautui. 9 pav. pavaizduotas oro tiekimo ir šalinimo ventiliatorių ekserginio efektyvumo kitimas per pirmąsias 500 metų valandų.

Pagal 9 pav. pateiktus grafikus matyti, kad ventiliatoriaus elektrinė galia tiesiogiai turi įtakos jo efektyvumui. Kadangi elektros energijos potencialas yra itin aukštas, ji, kaip ir pirminis kuras, gali būti paverčiama bet kokios rūšies darbu: kuo galingesnis elektros variklis, tuo mažesnė jo galios dalis paverčiama žemo potencialo darbu. Tai atsispindi ir grafike: šalinimo ventiliatoriaus efektyvumas siekia vos 0,2 %, o tiekimo ventiliatoriaus efektyvumas siekia 4,0–6,0 %.

Išanalizavus kiekvieną elementą atskirai ir įvardijus kiekvieno jų ypatybes, apskaičiuojamas viso įrenginio ekserginis efektyvumas. Skaičiuojant jį būtina atsižvelgti tiek į sezoniškumą, tiek į eksergijos srautų kitimo kryptis. Todėl anksčiau pateikta formulė koreguojama:

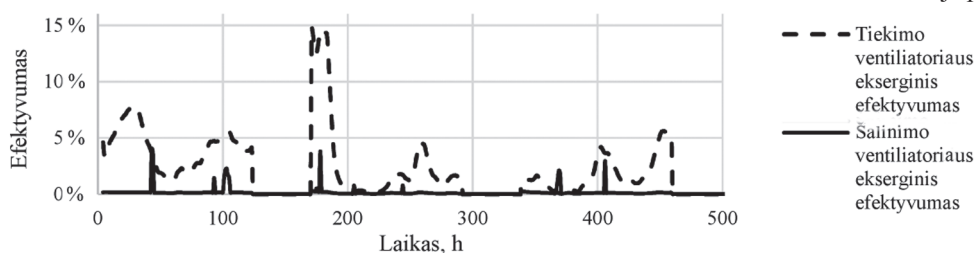
$$\eta = \frac{\sum E^-}{\sum E^+}, \quad (8)$$

čia $\sum E^-$ – neigiamų eksergijos srautų vėdinimo įrenginio elementuose suma; $\sum E^+$ – teigiamų eksergijos srautų vėdinimo įrenginio elementuose suma.

Atlikus šiuos skaičiavimo metodikos pakeitimus, atliekamas modeliavimas visų metų laikotarpiu. Vėdinimo įrenginio ekserginio efektyvumo kitimas pavaizduotas 10 pav.

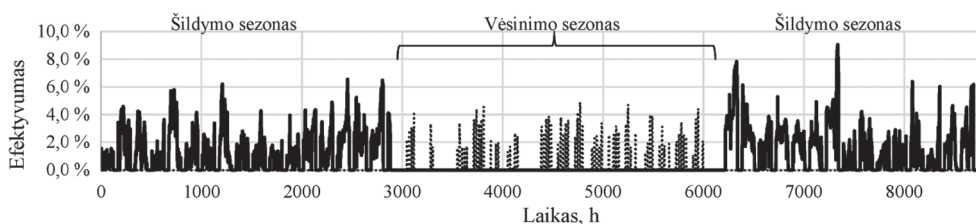
Bendras ekserginis įrenginio naudingumas itin žemas (10 pav.), svyruoja apie 3,0–4,0 %, įrenginys efektyviau veikia vasaros sezonu, vidutinis šildymo sezono efektyvumas – 1,99 %, o vidutinis vasaros sezono efektyvumas – 2,49 %.

Įvertinus kiekviename elemente susidarančius eksergijos nuostolius gauta, kad didžiausia nuostolių dalis tenka ventiliatoriams. Oro ištraukimo ventiliatoriuje patiriama net



9 pav. Ventiliatorių ekserginis efektyvumas

Fig. 9. Exergy efficiency of fans



10 pav. Vėdinimo įrenginio ekserginio efektyvumo kitimas

Fig. 10. Change of exergy efficiency of air handling unit

52,0 % visame įrenginyje susidarančių eksergijos nuostolių, tiekimo ventiliatoriuje – 35,0 %. Šildymo ir vėsinimo sekcijose atitikamai – 8,0 % ir 4,0 %. Mažiausia nuostolių dalis tenka rekuperatoriui, kuriame patiriama tik 1,0 % visų eksergijos nuostolių.

Išvados

Ištyrus oro paruošimo įrenginį, naudojantis TRNSYS modeliavimo priemone sukurtas jo matematinis modelis, patikrinus jo veikimą ir validavus jį bei atlikus visų metų vėdinimo įrenginio veikimo modeliavimą nustatyta, kad, priešingai nei energijos kryptis, eksergijos kryptis gali keistis procese, todėl būtina pasirinkti skaičiavimo metodus, kuriuos galima taikyti prie kintančių eksergijos srautų krypčių, kitaip skaičiuojant gauti patikimus rezultatus neįmanoma.

Taikant ekserginę analizę galima palyginti skirtingų energijos šaltinių potencialus, o dar svarbiau, kad taikant šį metodą galima tirti skirtingus įrenginius ir nutatyti, kokie elementai juose gali būti tobulinami. Matyti, kad ten, kur tiekama aukšto potencialo energija, eksergijos nuostoliai didesni (tiekimo ir šalinimo ventiliatoriuose patiriama net 87,0 % eksergijos nuostolių).

Pats efektyviausias ekserginiu požiūriu vėdinimo įrenginio komponentas – šilumogražis. Vidutinis metinis jo efektyvumas – 46,3 %.

Apskaičiuotas vidutinis metinis ekserginis vėdinimo įrenginio efektyvumas – 3,94 %. Gaunamas žemas efektyvumas, siekiant jį padidinti siūloma rinktis gamintojo rekomenduojamos galios ventiliatorius, žeminti tiekiamo šilumnešio temperatūrą, mažinti vėsinimo sekcijos veikimo trukmę.

Padėka

Tyrimą finansavo Lietuvos mokslo taryba (sutarties Nr. MIP-077/2015). Autoriai dėkoja VGTU Civilinės inžinerijos mokslo centro Pastato energetinių ir mikroklimato sistemų laboratorijai už suteiktą galimybę naudotis matavimo prietaisais ir kompiuterinėmis programomis.

Literatūra

- Dincer, I.; Rosen, M. A. 2007. *Exergy: energy, environment and sustainable development*. 1st ed. New York: Elsevier Science.
- Dutka, A.; Mroz, M. 2014. Exergy evaluation of mechanical ventilation systems, in 35th AIVC Conference “Ventilation and airtightness in transforming the building stock to high performance”, 24–25 September 2014, Poznań, Poland.
- 2010/31/ES Europos Parlamento ir Tarybos direktyva “Dėl pastatų energinio naudingumo”, 2010 m. gegužės 19 d. Europos Sąjungos oficialusis leidinys L 153: 13–35.

- Fabijonavičius, M. 2012. *PEMS patalpų mikroklimato ir energetinių poreikių tyrimas*. Vilnius: Civilinės inžinerijos mokslo centras. 30 p.
- Genys, K. 2015. *Vėdinimo sistemos ekserginė analizė naudojant TRNSYS modeliavimo priemonę*: magistro baigiamasis darbas/Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius.
- Gustafsson, M.; Dermentzis, G.; Myhren, J. A.; Bales, C.; Ochs, F.; Holmberg, S.; Feist, W. 2014. Energy performance comparison of three innovative HVAC systems for renovation through dynamic simulation, *Energy and Buildings* 82: 512–519. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.059>
- Lucas, F.; Mara, T. A.; Garde, F.; Boyer, H. 2012. *A comparison between CODYRUN and TRNSYS, simulation models for thermal buildings behaviour*, *Computational Engineering, Finance, and Science* [online], [cited 1 June 2015]. Available from Internet: <http://arxiv.org/abs/1212.5255>
- Martinaitis, V.; Biekša, D.; Miseviciute, V. 2010. Degree-days for the exergy analysis of buildings, *Energy and Buildings* 42(7): 1063–1069. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.019>
- Paulauskaitė, S.; Valančius, K. 2012. *Statybinė šiluminė fizika*. Vilnius: Technika. <http://dx.doi.org/10.3846/1300-S>
- Safa, A. A.; Fung, A. S.; Kumar, R. 2015. Performance of two-stage variable capacity air source heat pump: Field performance results and TRNSYS simulation, *Energy and Buildings* 94: 80–90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.041>
- Sakellari, D.; Forsén, M.; Lundqvist, P. 2006. Investigating control strategies for a domestic low-temperature heat pump heating system, *International Journal of Refrigeration* 29(4): 547–555. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.10.009>
- Sakulpipatsin, P.; Itard, L. C. M.; van der Kooi, H. J.; Boelman, E. C.; Luscuere, P. G. 2010. An exergy application for analysis of buildings and HVAC systems, *Energy and Buildings* 42(1): 90–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.07.015>
- Salazar-Pereyra, M.; Toledo-Velázquez, M.; Eslava, G. T.; Lugo-Leyte, R.; Rosas, C. R. 2011. Energy and exergy analysis of moist air for application in power plants, *Energy and Power Engineering* 3(3): 376–381. <http://dx.doi.org/10.4236/epe.2011.33048>
- Schmidt, D. 2009. Low exergy systems for high-performance buildings and communities, *Energy and Buildings* 41(3): 331–336. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.10.005>
- Wang, L.; Li, N. 2010. Evaluation of buoyancy-driven ventilation in respect of exergy utilization, *Energy and Buildings* 42(2): 221–229 [online], [cited 1 June 2015]. Available from Internet: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=22308413>
- Wei, Z.; Zmeureanu, R. 2009. Exergy analysis of variable air volume systems for an office building, *Energy Conversion and Management* 50(2): 387–392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.010>
- Xiao-xia, X.; Zhi-qi, W.; Shun-sheng, X. 2012. Exergy analysis of energy consumption for primary return air conditioning system, *Physics Procedia* 24: 2131–2137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2012.02.313>
- Zmeureanu, R.; Yu Wu, X. 2007. Energy and exergy performance of residential heating systems with separate mechanical ventilation, *Energy* 32(3): 187–195. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2006.04.007>

EVALUATION OF SEASONAL EXERGY EFFICIENCY OF AIR HANDLING UNIT

K. Genys, V. Misevičiūtė, P. Bareika

Abstract

The article deals with the air handling unit seasonal exergy efficiency. TRNSYS simulation tool is used to evaluate it. The object of research is air treatment device used to treat an air for the ventilation of laboratory. The mathematical model of air handling unit using TRNSYS simulation tool was developed when the technical parameters of air handling unit and energy exchange in it were analysed. The developed model according to the made observations during the warm and cold periods was tested and validation of elements was performed. The simulation of air handling unit operation after the verification of reliability and permitted tolerances was performed. The control mechanism which allows simulating the operation of air handling unit during cold and warm periods of the year was made. The mathematical algorithm for calculation of air handling unit exergy efficiency coefficient applying the principles of exergy analysis was developed. The seasonal exergy efficiency of air handling unit equal to 3.94 percent during the simulation was obtained.

Keywords: exergy analysis, exergy efficiency, simulation, recuperator, TRNSYS, air handling unit.