

VĒDINIMO ĮRENGINIO SU ŠILUMOS SIURBLIU TERMODINAMINIO  
EFEKTYVUMO TYRIMASVytautas Martinaitis<sup>1</sup>, Paulius Bareika<sup>2</sup>, Violeta Misevičiūtė<sup>3</sup>*Vilniaus Gedimino technikos universitetas**El. paštas: <sup>1</sup>vytautas.martinaitis@vgtu.lt; <sup>2</sup>pbpaulis@gmail.com; <sup>3</sup>violeta.miseviciute@vgtu.lt*

**Santrauka.** Straipsnyje vertinamas oras-oras šilumos siurblio, naudojamo vėdinimo sistemos šilumogrąžai, sezoninis termodinaminis naudingumas ir kelios kompresorių, turinčių įtakos termodinaminiam šilumos siurblio naudingumui, moduliacijos. Analizei pasirinkti kintamo greičio ir įjungiamo / išjungiamo tipo kompresoriai. Siekiant įvertinti įrenginio termodinaminį potencialą atliekama eksperimentinė analizė.

Modeliuojant vėdinimo įrenginio veikimą šaltuoju metų laiku, lyginama, kaip kinta skirtingų moduliacijų kompresorių termodinaminis naudingumas. Tyrimo rezultatai rodo, kad naudojant kelis paprastus kompresorius sezoniniai šilumos siurblio parametrai krenta: kondensatoriaus atiduodamas šilumos srautas yra 5 % mažesnis, lyginant su kintamo veikimo kompresorių naudojimu, be to, 5 % sumažėja sezoninis šilumos siurblio efektyvumo koeficientas (COP).

Šilumos siurblių galima tobulinti kompresorių keičiant į kintamo greičio arba moduliacinį, kuris leistų prisitaikyti prie šilumos poreikio ir tokiu būdu termodinaminio požiūriu pagerintų sezoninį sistemos efektyvumą.

**Reikšminiai žodžiai:** eksperimentinė analizė, kompresorius, oras-oras šilumos siurblys, šilumogrąža, šilumos siurblio sezoninis efektyvumas, vėdinimo sistema.

**Įvadas**

Vėdinimo sistema yra viena iš neatsiejamų statinio inžinerinių sistemų, naudojama tinkamam mikroklimatui užtikrinti, deja, jai veikti sunaudojama 30–60 % pastate suvartojamos energijos (Orme 2001). Apie 35–40 kWh/m<sup>2</sup> šilumos gali būti pašalinta iš gyvenamojo namo su šalinamu vėdinimo oru, o iki 90 % gali būti atgauta naudojant šilumogrąžius (Tommerup, Svendsen 2011; Doodoo *et al.* 2011).

Šilumai atgauti naudojami įvairūs šilumogrąžos įrenginiai: rotaciniai, plokštiniai šilumokaičiai, taip pat ir šilumokaičiai su tarpiniu šilumnešiu. Tokių įrenginių naudojimas skatinamas ne tik Lietuvos (STR 2.09.02:2005), Europos Sąjungos, bet ir kituose teisės aktuose (2010/31/EB, LST EN 13779:2007).

Vėdinimo įrenginių gamintojai (Genvex 2012; Venco 2012) taip pat į šiuos įrenginius jau pradeda diegti šilumos siurblius didesniai šilumos kiekiui atgauti, efektyvumui pagerinti, siekiant vasaros metu juos naudoti kaip vėsinimo įrenginius. Tačiau šie palyginti visai neseniai pradėti diegti įrenginiai yra tobulinami. Didžiausią įtaką šilumos siurblio termodinaminiam efektyvumui turi kompresorius. Šiame straipsnyje lyginami paprasto ir kintamo galingumo kompresorių tipai, siekiant įvertinti, kokią įtaką termodinaminiam šilumos siurblio efektyvumui turi kompresorių keitimas šilumos siurblyje.

**Tyrimo objektas**

1 paveiksle pateikta nagrinėjama vėdinimo sistema su šilumos atgavimo ir oro pašildymo įranga. Sistemą sudaro kelios posistemės arba mažesnės sistemos.

Nagrinėjamą sistemą sudaro:

- a) šilumos siurblys (1, 2, 3, 4);
- b) šilumogrąžos įrenginys (5, 6, 7);
- c) vėdinimo įrenginys (8, 9).

Tariama, kad vėdinimo įrenginys skiriamas į dvi atskiras dalis: viena dalis tiekia orą į patalpą, kita – šalina orą iš patalpos. Esant atskiriems tiekiamo ir šalinamo oro įrenginiams galimas tik šilumogrąžis su tarpiniu šilumnešiu.

Šilumos siurblys, kaip galutinis šilumos atgavimo (oro pašildymo) įrenginys, skirtas šilumai iš šalinamo oro atgauti ir į patalpą tiekiamam orui pašildyti iki projektinės temperatūros, šiuo atveju tai yra 22 °C. Šiam tikslui šilumos siurblyje yra 4 įrenginiai (1 pav.). Kompresorius (1) suspaudžia freoną iki reikiamo slėgio, taip jį pašildo ir priverčia garuoti. Tuomet freonas teka į kondensatorių (2), kuriame atiduodamas šilumą tekančiam orui kondensuojasi. Kondensavimosi temperatūra  $t_c = 35$  °C. Atidavęs šilumą, bet neatvėšęs freonas teka pro droselinį vožtuvą (3), kuriame droseliavimo metu staigiai krenta freono slėgis ir temperatūra. Atšalęs freonas teka į garintuvą (4), kuriame

šiltesnis tekantis oras jį pašildo ir išgarina iki  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 2 paveiksle pavaizduotas šilumos siurblio ciklas.

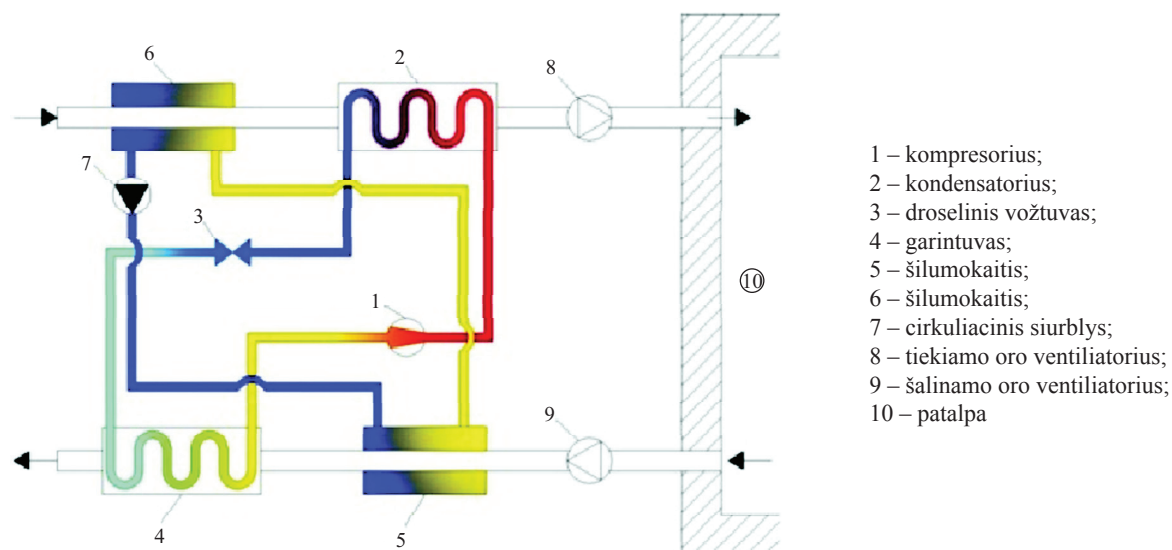
Šiuo atveju tariama, kad išgarinimo ir kondensavimo temperatūros visada yra pastovios. Nuostoliai vamzdynuose nevertinami, kompresoriaus adiabatinio efektyvumo koeficientas  $\varepsilon_k = 80\%$ .

Siekiant apsaugoti sistemą nuo užšalimo, šilumogrąžai naudojamas šilumogrąžis su tarpiniu šilumnešiu – 50

glikolio ir vandens tirpalas. Sezoninis šilumogrąžio efektyvumas laikomas lygus 60 %.

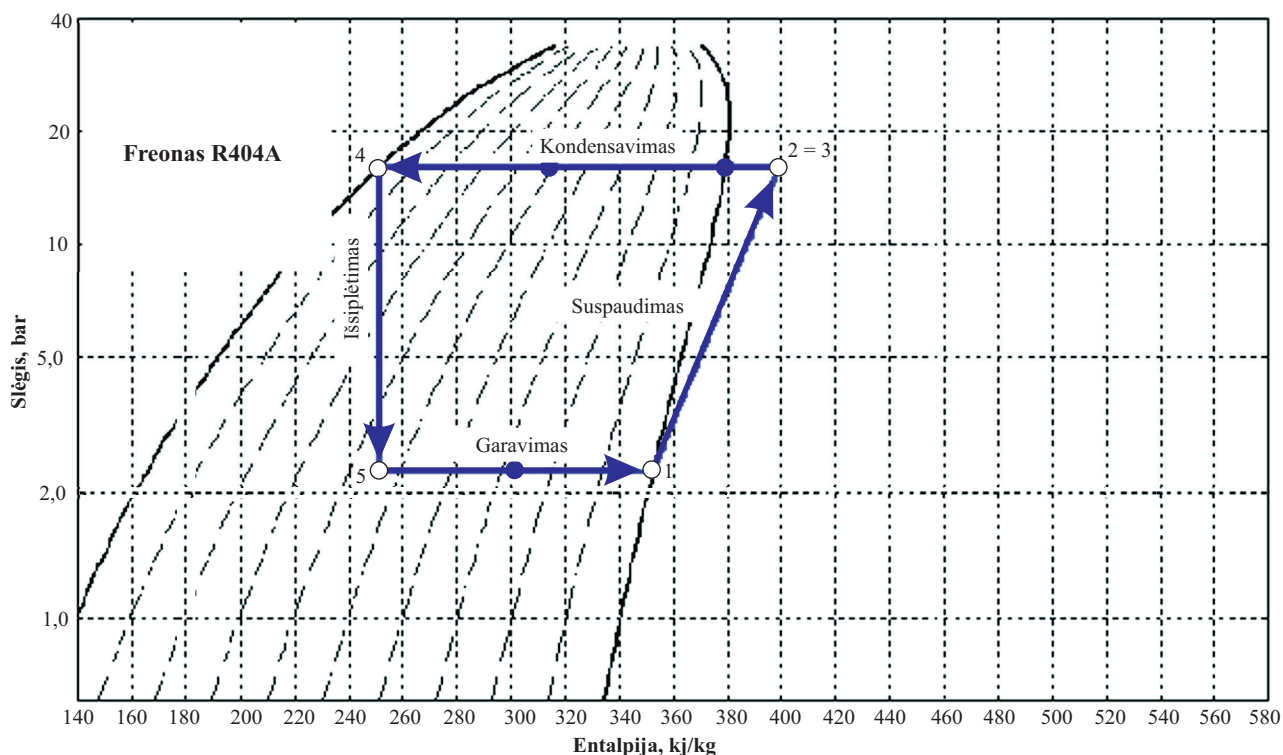
### Metodika

Nagrinėjamas vėdinimo įrenginys analizuojamas dviem požiūriais: energiniu ir ekserginu. Energinu požiūriu nustatomi pagrindiniai įrenginio parametrai, įrenginio ir jo posistemų efektyvumas.



1 pav. Vėdinimo sistemos schema

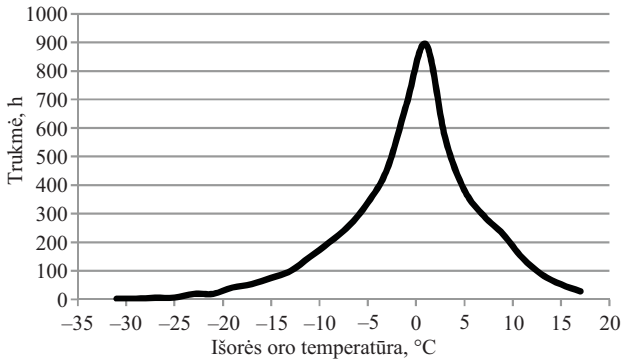
Fig. 1. Scheme for a ventilation system



2 pav. Šilumos siurblio ciklas p-h diagramoje

Fig. 2. p-h diagram showing the cycle of a heat pump

Ekserginė analizė atliekama norint sužinoti tikrą įrenginio termodinaminį potencialą. Modeliuojama šaltuoju metų laikotarpiu. 3 paveiksle pateikiamas pagal RSN 156-94 sudarytas Vilniaus miesto išorės oro temperatūros kitimas šaltuoju metų periodu.



3 pav. Temperatūrų trukmė šaltuoju metu  
Fig. 3. Temperatures during a cold period

Modeliavimo tikslas – palyginti, koks termodinaminio efektyvumo skirtumas bus tarp skirtingų moduliacijų kompresorių. Norint, kad sezoninis efektyvumo koeficientas būtų pastovus, šilumos siurblys turi prisitaikyti prie projekcinės tiekiamo oro temperatūros, tuomet bus palaikomas reikiamas komfortas patalpoje ir optimaliai panaudojamas šilumos siurblys. Toks šilumos siurblio veikimas gali būti užtikrintas tik kintamo debito kompresoriais (inverteriniais, skaitmeniniais). Deja, tokie kompresoriai šiuo metu yra brangūs lyginant su paprastais įjungiamo / išjungiamo tipo kompresoriais. Todėl gamintojai dažniausiai naudoja paprastus kompresorius.

Norint pagerinti šilumos siurblio efektyvumą naudojami keli paprasti kompresoriai, kurie įjungiami arba išjungiami prisitaikant prie reikalingo šilumos srauto (tiekiamo oro temperatūros). Analizei parenkami du šilumos siurblio su skirtingais kompresoriais atvejai:

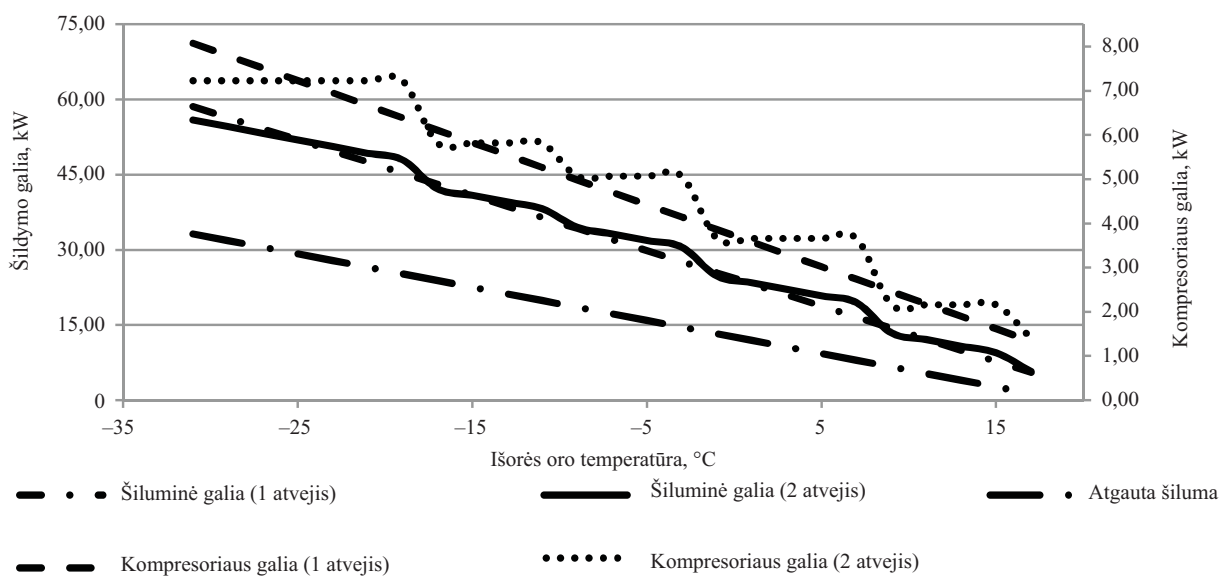
- 1) kompresorius su kintamo dažnio varikliu yra valdomas pagal tiekiamo į patalpą oro temperatūrą, kuri yra 22 °C;
- 2) 3 paprasti įjungiamo / išjungiamo tipo kompresoriai, kurie įjungiami ir išjungiami taip pat pagal tiekiamo į patalpą oro temperatūrą, šiuo atveju jų temperatūrų intervalas yra 20–24 °C. Kai tiekiamo oro temperatūra nukrinta žemiau 20 °C, įjungiamas didesnis kompresorius, arba keli kompresoriai, kai tiekiamo oro temperatūra pakyla daugiau kaip 24 °C.

Atliekant skaičiavimus laikoma, kad pirmiausia šiluma atgaunama šilumogrąžiu su tarpiniu šilumnešiu, vėliau iki reikiamos temperatūros pašildo šilumos siurblys, naudodamas atliekinę šilumą. Toliau pateikiama metodika (Martinaitis 2008), kuria remiantis atliekamas energinis ir ekserginis šilumos siurblio, naudojamo vėdinimo sistemos šilumogrąžai, įvertinimas.

Oro temperatūra už šilumogrąžio nustatoma pagal (1) formulę:

$$t_{13} = \varepsilon_T \cdot (t_{10} - t_a) + t_a, \quad (1)$$

čia:  $t_{13}$  – tiekiamo oro temperatūra prieš kondensatorių, °C;  $\varepsilon_T$  – šilumogrąžio su tarpiniu šilumnešiu temperatūrinis efektyvumas, %;  $t_{10}$  – šalinamo iš patalpos oro temperatūra, °C;  $t_a$  – išorės oro temperatūra, °C.



4 pav. Atgautas šilumos kiekis ir kompresorių galios esant įvairioms lauko oro temperatūroms  
Fig. 4. The amount of recovered heat and the input of compressor power at different outdoor temperatures

Atliekant skaičiavimus laikoma, kad šilumogrąžio vamzdynuose šilumos nuostoliai yra labai maži, todėl jie nevertinami, tuomet oro už šilumogrąžio temperatūra ( $t_{11}$ ) bus (2):

$$t_{11} = t_{10} - t_{13} + t_a. \quad (2)$$

Šilumogrąžio grąžintas šilumos srautas ( $\dot{Q}_{10-11}$ ) apskaičiuojamas pagal (3) formulę:

$$\dot{Q}_{10-11} = \dot{M}_{oro} \cdot c_{p_{oro}} (t_{10} - t_{11}), \quad (3)$$

čia:  $\dot{M}_{oro}$  – oro debitas, kg/s;  $c_{p_{oro}}$  – oro savitoji šiluma, kJ/kgK.

Šilumos siurblio kondensatoriaus atiduodamas šilumos srautas ( $\dot{Q}_k$ ) apskaičiuojamas pagal (4) formulę:

$$\dot{Q}_k = \dot{M}_{oro} \cdot (h_{14} - h_{13}), \quad (4)$$

čia:  $h_{14}$  – tiekiamo oro entalpija už kondensatoriaus, kJ/kg;  $h_{13}$  – tiekiamo oro entalpija prieš kondensatorių, kJ/kg.

Garintuvui atiduodamas šilumos srautas ( $\dot{Q}_g$ ) apskaičiuojamas (5):

$$\dot{Q}_g = \dot{M}_{R404A} \cdot (h_6 - h_5), \quad (5)$$

čia:  $\dot{M}_{R404A}$  – freono R404A debitas, kg/s;  $h_6$  – freono entalpija 6-ame taške, kJ/kg;  $h_5$  – freono entalpija 5-ame taške, kJ/kg.

Kompresoriui suteikiama galia ( $\dot{E}_{KM}$ ) nustatoma pagal (6) formulę:

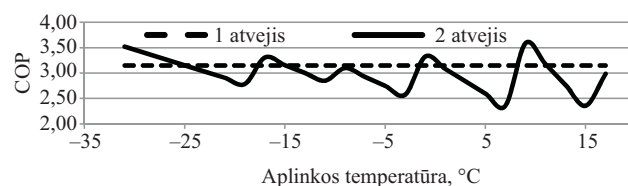
$$\dot{E}_{KM} = \dot{M}_{R404A} \cdot (h_2 - h_1). \quad (6)$$

Šilumos siurblio efektyvumo koeficientas ( $COP_{SS}$ ) nustatomas pagal (7) :

$$COP_{SS} = \frac{\dot{Q}_k}{\dot{E}_{KM}}. \quad (7)$$

Ekserginis vėdinimo sistemos vertinimas atliekamas pagal eksergijos balanso lygtį (8):

$$\sum_k \dot{E}_{e,k}^{+-} + \sum_j \dot{E}_{q,j}^{+-} + \sum_i \dot{E}_{W,i}^{+-} = \dot{L}, \quad (8)$$



5 pav. Šilumos siurblio efektyvumo koeficiento priklausomybė nuo lauko oro temperatūros

Fig. 5. The dependency of the performance coefficient of the heat pump on outdoor temperature

čia:  $\sum_k \dot{E}_{e,k}^{+-}$  – sistemos per įrenginius  $k$  gauta (+), atiduota (-) techninio darbo galia, kW;  $\sum_j \dot{E}_{q,j}^{+-}$  – sistemos per įrenginius  $j$  gauta (+), atiduota (-) šilumos galia, kW;  $\sum_i \dot{E}_{W,i}^{+-}$  – sistemos gauta (+), atiduota (-) virsmo eksergijos galia, kW;  $\dot{L}$  – sistemos eksergijos nuostoliai, kW.

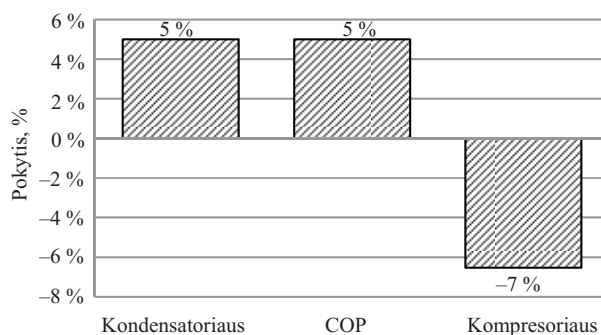
Ekserginis skaičiavimas atliekamas visam įrenginiui, įvertinus ventiliatorius ir patalpą. Nustatomi ekserginiai nuostoliai kiekviename sistemos ir posistemės įrenginyje, apskaičiuojami posistemų ir visos sistemos ekserginio naudingumo koeficientai, esant skirtingoms lauko oro temperatūroms.

## Rezultatai

Kaip matome 4 paveiksle, šilumogrąžis abiem atvejais atgauna vienodą šilumos kiekį, tačiau šilumos siurblio atiduotas šilumos srautas skiriasi. Taip yra todėl, kad pirmuoju atveju kompresorius reaguoja į tiekiamo į patalpą oro temperatūrą ir ją visada palaiko panašią.

Antruoju atveju naudojami 3 kompresoriai, kurie tarpusavyje moduluojami, siekiant geresnio šiluminio komforto, tačiau jų moduliacija nėra tokia lanksti, todėl atiduodama mažiau arba daugiau šilumos. Taip pat padidėja kompresoriaus suvartojamos energijos kiekis (5 pav.) ir mažėja šilumos siurblio efektyvumas (COP).

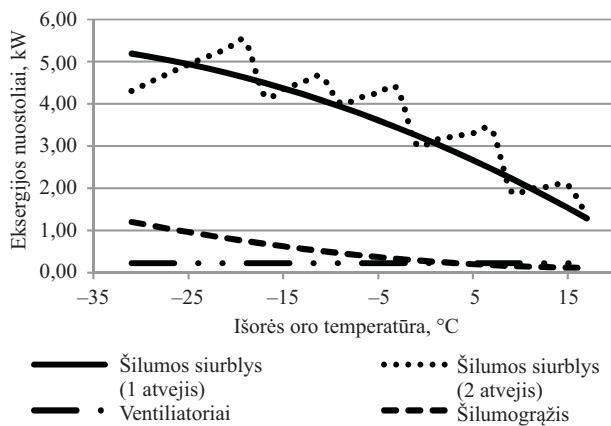
Pagal gautus rezultatus matyti, kad naudojant kelis paprastus kompresorius sezoniniai šilumos siurblio parametrai krenta (6 pav.). Kondensatoriaus atiduodamas šilumos srautas yra 5 % mažesnis, lyginant su antruoju atveju, taip pat 5 % sumažėja sezoninis COP, kompresorių galios padidėja 7 %.



6 pav. Šilumos siurblio su keliais paprastais kompresoriais rodiklių pokyčių palyginimas

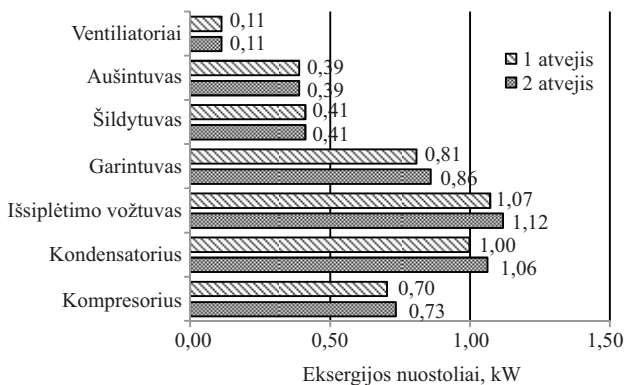
Fig. 6. A comparison of changes in the parameters of the heat pump having several simple compressors

7 paveiksle pavaizduoti kiekvieno įrenginio sezoniniai eksergijos nuostoliai. Kaip matome, didžiausi eksergijos nuostoliai yra šilumos siurblyje, šilumogrąžos įrenginyje, o ventiliatoriai sudaro palyginti mažą eksergijos nuostolių dalį.



7 pav. Eksergijos nuostolių pasiskirstymas sistemos elementuose esant skirtingoms išorės oro temperatūroms

Fig. 7. Exergy losses in the subsystem at different outside air temperatures



8 pav. Vidutinių eksergijos nuostolių sistemos komponentuose pasiskirstymas

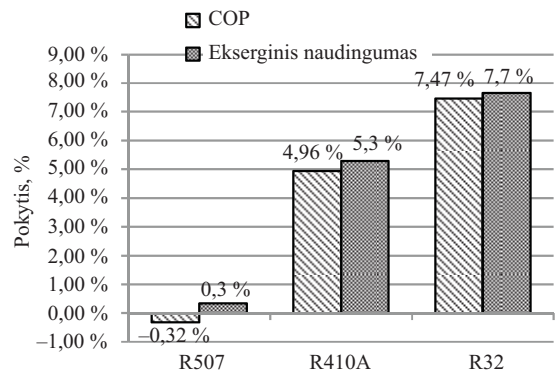
Fig. 8. The distribution of the average exergy losses in the components of the system

Detaliau išnagrinėjus kiekvienos posistemės įrenginį nustatyti jų eksergijos nuostoliai pavaizduoti 8 paveiksle. Didžiausi eksergijos nuostoliai yra išsiplėtimo vožtuve ir kondensatoriuje, mažiausi eksergijos nuostoliai susidaro ventiliatoriuose lyginant su kitais vėdinimo įrenginių sudarčiais elementais.

9 paveiksle vaizduojami jautrumo analizės, atliktos keičiant šilumos siurblio šilumokaičiuose cirkuliuojantį freoną, rezultatai.

Jautrumo analizei naudojami skirtingų rūšių freono (R507, R410A ir R32) parametrai, oro parametrai nekeičiami. Gautieji rezultatai lyginami su R404A freono skaičiavimo rezultatais (9 pav.).

Atlikę skirtingų rūšių freono, naudojamo šilumos siurbliuose, jautrumo analizę (9 pav.), matome, kad parinkę tinkamą freoną, šilumos siurblio COP galime padidinti 7,47 %, o visos sistemos naudingumą – 7,70 %.



9 pav. Šilumos siurblių su skirtingų rūšių freonu jautrumo analizės rezultatų palyginimas

Fig. 9. A comparison of results analyzing the sensitivity of heat pumps having different refrigerants

## Išvados

Atlikę skaičiavimus matome, kad naudojant paprastus įjungiamo / išjungiamo tipo kompresorius šilumos siurblyje, sunku prisitaikyti prie patalpoje nustatytos oro temperatūros, nes pakitus šilumos poreikiams kinta veikiančių kompresorių skaičius, o šie kompresoriai gali veikti tik visu galimumu esant nustatytoms kondensavimosi ir išgarinimo temperatūroms.

Naudojant kelis paprastus kompresorius sezoniniai šilumos siurblio parametrai krenta: kondensatoriaus atiduodamas šilumos srautas ir sezoninis šilumos siurblio COP sumažėja 5 %.

Šilumos siurblių galima tobulinti keičiant kompresorių į kintamo greičio arba moduliacinį, kuris leistų prisitaikyti prie šilumos poreikio ir termodinaminiu požiūriu pagerinti sezoninį sistemos efektyvumą.

Jautrumo analizė parodė, kad ypatingas dėmesys turi būti skiriamas freonui, kuris turi įtakos šilumos siurblio komponentams (garintuvo, kondensatoriaus plotui, kompresoriaus galiai), pasirinkti.

## Literatūra

- Tommerup, H.; Svendsen, S. 2006. Energy savings in Danish residential building stock, *Energy and Buildings* 38(6): 618–626. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.08.017>
- Dodoo, A.; Gustavsson, L.; Sathre, R. 2011. Primary energy implications of ventilation heat recovery in residential buildings, *Energy and Buildings* 43: 1566–1572. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.019>
- Europos Parlamentas ir Taryba 2010. 2010 m. gegužės 19 d. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2010/31/EB dėl pastatų energinio naudingumo, *Europos Sąjungos oficialusis leidinys* L 153: 13–35.

- Air Source Heat Pumps and Heat Recovery Ventilation from Genvex* [interaktyvus]. 2012. Genvex [žiūrėta 2012 m. rugsėjo 30 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.genvex.co.uk/>
- LST EN 13779:2007. *Negyvenamųjų pastatų ventiliacija. Ventiliacijos ir patalpų oro kondicionavimo sistemų eksploatacinių charakteristikų reikalavimai*. Vilnius, 2007. 72 p.
- Martinaitis, V. 2008. *Termodinaminė analizė: mokomoji knyga*. Vilnius: Technika. 208 p.
- Orme, M. 2001. Estimates of the energy impact of ventilation and associated financial expenditures, *Energy and Buildings* 33(3): 199–205.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00082-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00082-7)
- STR 2.09.02:2005. *Šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas*. Vilnius, 2005.
- RSN 156-94. 1996. *Statybinė klimatologija*. Vilnius, 1995.
- Heat pump heat recovery units* [interaktyvus]. 2012. Venco [žiūrėta 2012 m. rugsėjo 15 d.]. Prieiga per internetą: [http://venco.com.tr/images2/img/974/File/Isi%20Pompali%20Isi%20Geri%20Kazanim\(1\).pdf](http://venco.com.tr/images2/img/974/File/Isi%20Pompali%20Isi%20Geri%20Kazanim(1).pdf).

## ANALYSIS OF THE THERMODYNAMICAL EFFICIENCY OF AN AIR HANDLING UNIT WITH A HEAT PUMP

V. Martinaitis, V. Misevičiūtė, P. Bareika

### Abstract

This paper evaluates the seasonal thermodynamic efficiency of the air-to-air heat pump used for a heat recovery ventilation system and several modulations of compressors affecting the thermodynamic efficiency of the heat pump. A variable speed and on/off-type compressors have been selected. In order to evaluate the thermodynamic potential of the device, energy analysis has been performed.

Along with modelling the operation of the air handling unit during the cold time of the year, variations in the thermodynamic efficiency or different modulation compressors have been compared. The obtained results have shown that the use of a few simple compressors causes a decrease in the seasonal parameters of the heat pump: heat generated by a condenser is 5% lower compared to the use of variable speed compressors and therefore the seasonal coefficient of the performance (COP) of the heat pump decreases by 5%.

Possible improvement on the heat pump can be provided changing the compressor into variable speed or modulatory equipment, which allows adjusting to heat demand and thus increases the seasonal efficiency of the system from a thermodynamic point of view.

**Keywords:** air-to-air heat pump, compressor, exergy analysis, seasonal efficiency of the heat pump, heat recovery, ventilation.