

## Environmental engineering Aplinkos inžinerija

### VĒDINIMO ĮRENGINIO ŠILUMOS SIURBLIO EKSPERIMENTINIO TYRIMO STENDAS

Anton FRIK \*, Juozas BIELSKUS 

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

Gauta 2020 m. birželio 30 d.; priimta 2020 m. rugpjūčio 18 d.

**Santrauka.** Šilumos siurbliai (ŠS) tampa vis populiareni ir užima reikšmingą dalį pastatų šilumos bei vėsos aprūpinimo grandinėje. Nors nuo pirmojo ŠS pagaminimo jau praėjo daugiau nei 160 metų, šią technologiją, skirtą žemo potencialo šiluminei energijai atgauti bei naudingai panaudoti, galima pavadinti inovatyviu ir efektyviu energijos transformatoriumi. Šiandien ŠS „oras–vanduo“ ir „oras–oras“ dėl savo įdiegimo kainos lyginant su ŠS „gruntas–vanduo“ tampa vis populiareni. Pastebėta, kad ŠS „oras–oras“ vis plačiau montuojami šiuolaikiniuose vėdinimo įrenginiuose. Šiuose vėdinimo įrenginiuose pagrindiniai energijos transformatoriai yra „oras–oras“ šilumos siurblys ir šilumogražis. Mokslinėje literatūroje mažai dėmesio skiriama vėdinimo įrenginio ir šilumos siurblio derinio termodinaminiam ciklui bei naujų galimybių paieškai jį keisti ir valdyti, o tai potenciali kryptis, kuri galėtų pagerinti visos sistemos efektyvumo rodiklius. Siekiant tyrinėti įrenginio valdymo galimybes, reikalingas į vėdinimo įrenginį integruoto šilumos siurblio eksperimentinis stendas, kuris padėtų validuoti teorinių tyrimų rezultatus bei atskleisti valdymo praplėtimo sprendinius. Todėl šiame darbe atliekama šilumos siurblių atskiro veikimo ir vėdinimo įrenginiuose integruotų eksperimentinių stendų apžvalga. Ja remiantis suformuluojami į vėdinimo įrenginį integruoto šilumos siurblio eksperimentinio stendo įrengimo pagrindiniai reikalavimai ir parengiama šio stendo principinė schema.

**Reikšminiai žodžiai:** vėdinimo įrenginyje integruotas šilumos siurblys, eksperimentinis stendas, šilumos siurblio termodinaminis ciklas.

#### Įvadas

Žmonės siekia pastatuose sukurti komfortišką aplinką, todėl energijos poreikis pastatuose kiekvienais metais tik didėja. Pastate šiluminį komfortą užtikrinančios pagrindinės sistemos yra šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo (ŠVOK). Jos sunaudoja pusę Europos Sąjungoje (ES) suvartojamos energijos, kurios daug iššvaistoma dėl neefektyvaus vartojimo (European Commission, 2016). Todėl energijos vartojimo efektyvumas yra strateginis ES prioritetas, skatinantis neefektyvius energijos gamybos būdus keisti efektyvesniais (Europos Parlamentas, 2016). ŠVOK sistemos kartu su naujomis medžiagomis, naujomis stebėjimo ir automatinio valdymo technologijomis rodo sparčiai augantį suinteresuotumą siekti aukštesnio energijos vartojimo efektyvumo (Jouhara ir Yang, 2018). Todėl būtent ŠVOK sistemos reikalauja naujų išmaniųjų bei energiška efektyviųjų technologinių sprendimų, galinčių palaikyti tinkamą mikroklimatą patalpose.

Reikalingos naujos žinios, atskleidžiančios galimybes sukurti efektyvesnius produktus, tiesiogiai prisidedančius

prie strateginių ES ir Lietuvos tikslų mažinti energijos vartojimą, naudoti atsinaujinančius energijos išteklius ir didinti energijos vartojimo efektyvumą. Pirminė atsinaujinančių šaltinių energija, pavyzdžiui, vėjo energija, saulės energija (fotovoltainiai saulės elementai) dažniausiai transformuojama į elektrą. Kadangi šilumos siurblio darbui reikalinga elektra, jis tampa potencialiu šiluminės energijos generatoriumi ŠVOK sistemose, gebančiu prisidėti prie energijos vartojimo efektyvumo didinimo problemos sprendimo pastatų sektoriuje. Šilumos siurbliai pastato šildymo sistemoms nėra naujovė, bet jų pritaikymas vėdinimo sistemoms yra mažiau paplitęs. Pastaraisiais metais padėtis keičiasi, vis daugiau vėdinimo įrangos gamintojų (pvz., „FläktGroup“, „Mandik“, „Komfovent“, VENTS) pristato vėdinimo įrenginių su integruotais šilumos siurbliais.

ŠVOK sistemų ypatybė – technologiškai apibrėžtas, bet nuolat gana stochastiškai kintantis energijos poreikis per metus, parą, o kartais net ir valandą. Taigi energijos generatoriai / transformatoriai turi užtikrinti šios reikalingos energijos kintamą poreikį išlaikant didžiausią energijos

\*Autorius susirašinėti. El. paštas [anton.frik@vgtu.lt](mailto:anton.frik@vgtu.lt)

transformavimo efektyvumą. Atsiranda įrenginių valdymo algoritmų poreikis, kurie geba pagal visus įeinamus kintamus išorinius parametrus pasirinkti efektyviausią sistemos veikimo režimą.

Tradicinės šilumos siurblio veikimo režimo valdymo priemonės – tai kompresorius ir išsiplėtimo vožtuvas, šių sudėtinių dalių valdymo derinys (moduliaciniai / inverteriu valdomi ŠS). Kompresoriaus darbas / galia šilumos siurbliuose gali būti reguliuojami keliais režimais: įjungimo / išjungimo (angl. *On/Off*) režimas; vienos arba skirtingos galios įjungimo / išjungimo kompresorių kaskadinis veikimas; moduliacinis veikimo režimas. Šiuolaikiniuose šilumos siurbliuose vis dažniau taikomas kintamo greičio kompresoriaus ir elektroninio (naudojant žingsninį variklį) išsiplėtimo vožtuvo derinys. Šis sprendimas sudarė galimybes padidinti šilumos siurblio sezoninį veiksmingumą. Tolygus reguliavimas yra tinkamiausias į vėdinimo sistemą integruoto šilumos siurblio kompresoriaus valdymo režimas. Jis leidžia prisitaikyti prie nuolat kintančių oro parametrų ir užtikrinti reikalaujamą šviežio oro šildymo galią. Be to, kaip rodo kitų tyrėjų darbai (Aprea et al., 2006; Dongellini et al., 2017), kintamo greičio veikimas yra efektyvesnis, lyginant su pakopiniu ar įjungimo / išjungimo veikimu. Aprea et al. (2006) savo darbe atliko šilumos siurblio („oras–vanduo“), veikiančio įjungimo / išjungimo ir moduliaciniu režimais, tyrimą. Rezultatai rodo, kad tolygus reguliavimas leidžia 20 % sumažinti elektros energijos sąnaudas. Energijos taupymas daugiausia buvo susijęs su suspaudimo santykio (laipsnio) sumažėjimu moduliacijos fazėje (Aprea et al., 2006). Dongellini et al. šilumos siurblio veikimo režimų tyrimo rezultatai rodo, kad šilumos siurblio, dirbančio tolygaus reguliavimo režimu, sezoninis efektyvumas, lyginant su pakopiniu bei įjungimo / išjungimo režimais dirbančiais siurbliais, yra aukštesnis 8,3 % bei 15,4 % atitinkamai (Dongellini et al., 2017). Tolygus kompresoriaus sukimosi greičio reguliavimas leidžia sumažinti iki minimumo jo įjungimo / išjungimo ciklų skaičių, o tai turi teigiamą įtaką jo naudojimo trukmei.

Pastebėta, kad daugumoje darbų, susijusių su šilumos siurblio efektyvumo didinimu, nagrinėjamos tradicinės, jau žinomos ir plačiai naudojamos šilumos siurblio valdymo priemonės bei jų optimalus veikimas. Mažai dėmesio skiriama pačiam šilumos siurblio termodinaminiam ciklui bei naujų galimybių paieškai jį keisti ir valdyti. O tai potenciali kryptis, kuri galėtų pagerinti šilumos siurblio efektyvumo rodiklius.

Analitinio metodo neužtenka norint nagrinėti termodinaminio ciklo valdymo galimybes ir ieškoti naujų. Teoriniai šilumos siurblio termodinaminio ciklo analizavimo būdai neparodo proceso tikro, realiai vykstančio vaizdo, neduoda patikimų atsakymų. Sudėtinga nustatyti visus šio ciklo charakteringų parametrų pakeitimus. Todėl problema turi būti ištirta ne tik analitiniu, bet ir empiriniu požiūriu. Tokio tyrimo rezultatai leidžia objektyviai analizuoti sistemos veikimą realiomis darbo sąlygomis, validuoti hipotezes ir teorinių tyrimų rezultatus. Tam

reikalingas į oro paruošimo įrenginį integruoto šilumos siurblio eksperimentinis standas, kuris leistų atlikti termodinaminio ciklo tyrimus, užfiksuoti vykstančius procesus, išmatuoti dominančius veikimo parametrus ir nustatyti šilumos siurblio darbo charakteristikų priklausomybes nuo kintančių išorės parametrų.

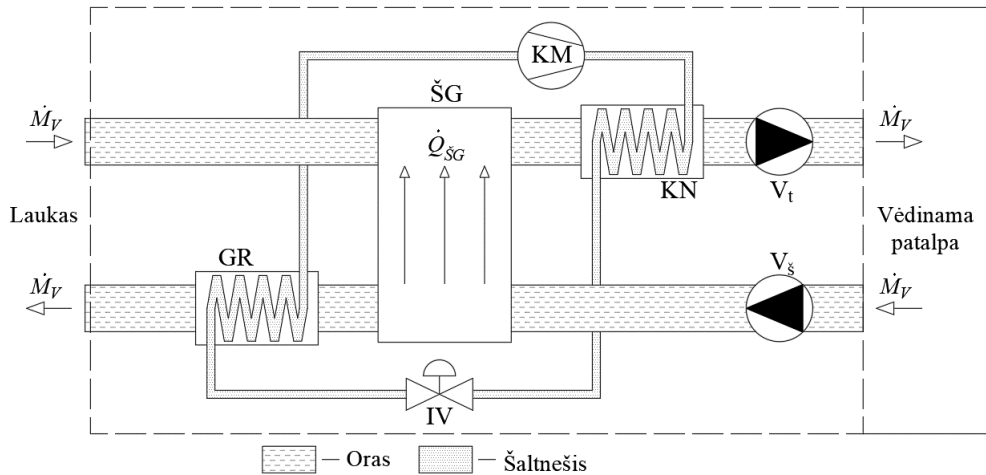
## 1. Eksperimentinis standas

Eksperimentinis standas turi užtikrinti vėdinimo įrenginio veikimą – tiekti šviežią orą į patalpą, prieš tai jį pašildant ar atvėsinant, bei šalinti užterštą orą iš patalpos siekiant užtikrinti tinkamą oro kaitą. Galima išskirti tris pagrindinius vėdinimo įrenginio komponentus: oro tiekimo / ištraukimo ventiliatoriai, šilumogrąžis, šilumos siurblys. Nors siekiama išnagrinėti vėdinimo įrenginio su integruotu šilumos siurbliu veikimą, pats eksperimentinis standas nebūtinai turi visiškai konstruktyviai atitikti įprastą vėdinimo įrenginio formą (vieno bloko konstrukcija). Svarbu imituoti jo funkcionalumą. Taigi siekiant supaprastinti stendo įsigijimo ir surinkimo procesą, siūloma išskaidyti sistemą į atskirus komponentus, o ne daryti vieno bloko konstrukcijos vėdinimo įrenginį, kuriame visi jo komponentai sumontuoti ant vieno rėmo. Galimas stendo pagrindinių elementų scheminis išsidėstymas parodytas 1 paveiksle.

Kaip ir realiame vėdinimo įrenginyje, oro paruošimo proceso pradžioje iš lauko paimamas oras pašildomas šilumogrąžyje, o iki projekcinės temperatūros sušildomas šildytuve, kurio funkciją stende atlieka vienas iš šilumos siurblio šilumokaičių (kondensatorius). Sušilęs oras tiekiamas į patalpą. Iš patalpos šalinamasis oras prateka per šilumogrąžį, kuriame esanti ore šiluma perduodama tiekiamojo oro srautui. Paskui oras patenka į šilumos siurblio garintuvą, kuriame išgaunama likusi naudingoji šiluma. Oro tiekimą ir ištraukimą užtikrina du kanaliniai ventiliatoriai. Šilumos siurblio kontūrą sudaro kompresorius, išsiplėtimo vožtuvas bei jau minėti kondensatorius ir garintuvas. Toks išskaidytas stendo komponentų išsidėstymas ne tik palengvins veikimo procesų stebėjimą ir parametrų matavimo eigą, bet ir duos galimybę paprasčiau keisti sistemos komponentus būsimoje eksperimentuose.

Ortakiai, jungiantys visus sistemos komponentus, turi būti sandarūs bei izoliuoti šilumos izoliacija, siekiant eliminuoti sistemos šilumos nuostolių ir papildomo oro pritekėjimo / ištekėjimo per nesandarias vietas įtaką tyrimo rezultatams. Tačiau kartais pasitaiko eksperimentinių stendų, kuriuose panaudoti permatomi ortakiai be šilumos izoliacijos (Gunt, 2019). Tokio tipo ortakiai duoda galimybę stebėti ortakio sistemos viduje vykstančius procesus, pavyzdžiui, kondensato susidarymą ir užšalimą ant garintuvo paviršiaus.

Pagrindinis tikslas – nustatyti viso įrenginio būdingųjų parametrų priklausomybę nuo kintamosios lauko temperatūros, nustatyti galimybę tais parametrais manipuliuoti, siekiant užtikrinti vėdinimo įrenginio optimalų veikimą efektyvumo požiūriu. Techniniu aspektu pagrindinis



1 paveikslas. Vėdinimo įrenginio su integruotu šilumos siurbliu išskaidyto išdėstymo pavyzdys (KM – kompresorius; KN – kondensatorius; GR – garintuvas; IV – plėtimosi vožtuvas; ŠG – šilumogražis;  $V_t$  – oro tiekimo ventiliatorius;  $V_s$  – oro šalinimo ventiliatorius)

Figure 1. Example of a split layout of an air handling unit with integrated heat pump (KM – compressor; KN – condenser; GR – evaporator; IV – expansion valve; ŠG – recovery heat exchanger;  $V_t$  – air supply fan;  $V_s$  – exhaust fan)

valdomas komponentas, nusakantis vėdinimo įrenginio veiksmingumo rodiklius, yra šilumos siurblys. Kitų vėdinimo įrenginio komponentų (šilumogražio, ventiliatorių) įtaka efektyvumo rodikliams gana pastovi. Todėl projektuojant eksperimentinį stendą pagrindinis dėmesys turi būti skiriamas šilumos siurbliui ir galimybei valdyti jo veikimo režimą.

Tradicinės šilumos siurblio valdymo priemonės – kompresorius ir plėtimosi vožtuvas. Kitų autorių tyrimo rezultatai rodo, kad vėdinimo įrenginiuose įjungiamo / išjungiamo tipo kompresoriaus arba jų derinių naudojimas yra netinkamas. Tokiai sistemai sunku prisitaikyti prie nuolat kintančių oro parametrų, nes šie kompresoriai gali veikti tik visu galingumu, esant nustatytoms kondensavimo ir išgarinimo temperatūroms (Martinaitis et al., 2012). Tinkamiausias variantas – eksperimentiniame stende naudoti kintamųjų sūkių kompresorių ir elektroninį plėtimosi vožtuvą sudarant galimybę programuoti bei pasirinktu algoritmu valdyti šių prietaisų veikimo režimus.

Aeroterminio tipo šilumos siurbliams būdinga garintuvo užšalimo problema. Dažnai, veikiant šilumos siurbliui, garintuvo paviršiaus temperatūra nukrinta žemiau 0 °C. Oro temperatūra garintuve krinta žemiau rasos taško temperatūros, todėl ore esanti drėgmė kondensuojasi ant garintuvo paviršiaus, o vėliau pradeda formuotis šerkšno sluoksnis. Tokioje situacijoje garintuve vykstantys šilumos mainų procesai su išore sulėtėja bei krinta per šilumokaitį pratekantis oro srautas. Šilumos siurbliai, integruoti į vėdinimo įrenginius, nėra išimtis, šios problemos būdingos ir jiems. Dėl užšalimo įtakos padidėja ventiliatorių energijos sąnaudos, kompresoriaus vartojama energija, sumažėja tiekiamo oro temperatūra, todėl į patalpas tiekiamas šaltas oras. Apšalus garintuvui krinta garinimo slėgis, todėl, jei sistemoje nėra įdiegta apsauginių priemonių, kompresorius gali būti sugadintas. Tad periodiškai reikia atlikti garintuvo atitirpinimo procedūrą.

Plačiausiai naudojami atitirpinimo metodai yra reversinio ciklo ir karštų dujų apėjimo linija. Tyrėjas iš Kinijos Song savo „oras-oras“ šilumos siurblio eksperimentiniame stende pritaikė reversinio ciklo išorinio šilumokačio atitirpinimo technologiją. Ji realizuojama naudojant šaldymo agento kontūrą instaliuotus vieną ketureižį vožtuvą (angl. *Four-way valve*) ir keletą atgalinių vožtuvų (angl. *Check valve*), jų padedamas šaldymo agentas pradeda cirkuliuoti atgaline kryptimi negu įprasto veikimo (šildymo režimu) metu. Šilumos siurblys, atitirpinant išorinį šilumokaitį, veikia atvirkštiniu režimu, jo kondensatorius ir garintuvas „apsikeičia“ vietomis. Lauke esantis šilumokaitis pradeda šildyti, o viduje šaldyti. Taip vyksta, kol užšalęs šilumokaitis, esantis lauke, nebus nutirpintas (Song et al., 2016; Bareika, 2013; Frik, 2019; Liu et al., 2018). Karštų dujų apėjimo linijos technologijos esmė ta, kad šaldymo agento suslėgtosios karštos dujos po kompresoriaus yra tiesiai nukreipiamos į šilumos siurblio garintuvą, kad jį atitirpintų. Kaip rodo kitų tyrėjų darbai, toks atitirpinimo metodas reikalauja mažiau energijos sąnaudų, jo įtaka patalpos temperatūrai yra mažesnė, lyginant su reversinio ciklo metodu. Tačiau karštų dujų metodas yra pavojingesnis kompresoriaus normalaus darbo atžvilgiu, nes išauga skysto šaldymo agento pasiurbimo į kompresorių rizika (Liu et al., 2018). Reversinio ciklo technologijos naudojimas suteikia galimybę ne tik atitirpinti garintuvą, bet ir naudoti šilumos siurblių vėsinimo režimu. Toks sprendimas praplatina eksperimentinio stendo veikimo galimybių rinkinį. Techniniu požiūriu karštų dujų apėjimo linijos technologijos realizavimas naujame stende nėra sudėtingas. Įrengiant naują stendą, pravartu įgyvendinti abi šias technologijas, tai leistų nustatyti skirtingų atitirpinimo metodų įtaką šilumos siurblio termodinaminiam ciklui.

Siekiant atlikti tikslią vėdinimo įrenginio su integruotu šilumos siurbliu veikimo procesų analizę, būtina fiksuoti sistemos būdingųjų parametrų rodiklius. Tokio tipo

sistemose dažniausiai matuojami tokie parametrai: šaldymo agento temperatūra, slėgis ir debitas; oro temperatūra, debitas ir santykinė drėgmė. Parametrai turi būti matuojami būdinguose sistemos taškuose, kur jų dydžiai dėl sistemos komponentų veikimo gali pasikeisti. Šilumos siurblio veikimo ciklo metu įrenginio kontūre cirkuliuojantis šaldymo agentas nuolat varijuoja tarp garo, skystosios ir šių dviejų mišinio būsenos fazių. Norint stebėti šaldymo agento besikeičiančią fazės būseną, šilumos siurblio kontūre galima įrengti apžiūros langelius po kiekvienu pagrindinių šilumos siurblio komponentų. Reikia atkreipti dėmesį, kad nuolat fazę keičiančio šaldymo agento debitą matuoti nėra lengvas uždavinys, kaip gali atrodyti. Taip pat svarbus įrenginio veiksmingumo koeficiento nustatymo aspektas yra jo suvartotas elektros kiekis. Todėl eksperimentiniame stende privalo būti galimybė nustatyti elektrą vartojančių sistemos elementų energijos sąnaudas. Be to, stende turi būti galimybė ne tik matuoti parametrus realiuoju laiku, bet ir tam tikru periodiškumu fiksuoti bei kaupti matavimo rezultatus (Wenju et al., 2011; Lu et al., 2019; Song et al., 2016; Bareika, 2013; Karim et al., 2019; Qiu et al., 2019).

Apibendrinant analizės rezultatus galima konstatuoti, kad eksperimentinis vėdinimo įrenginio su integruotu šilumos siurbliu standas turi atitikti šiuos reikalavimus:

- Stendas privalo fiziškai užtikrinti realiai veikiančio įrenginio funkcionalumą.
- Stendas turi turėti kuo platesnį veikimo režimo reguliavimo rinkinį tiek šilumos siurblio, tiek oro ištraukimo pusėje.
- Šilumos siurblyje turi būti garintuvo atitirpinimo funkcija.

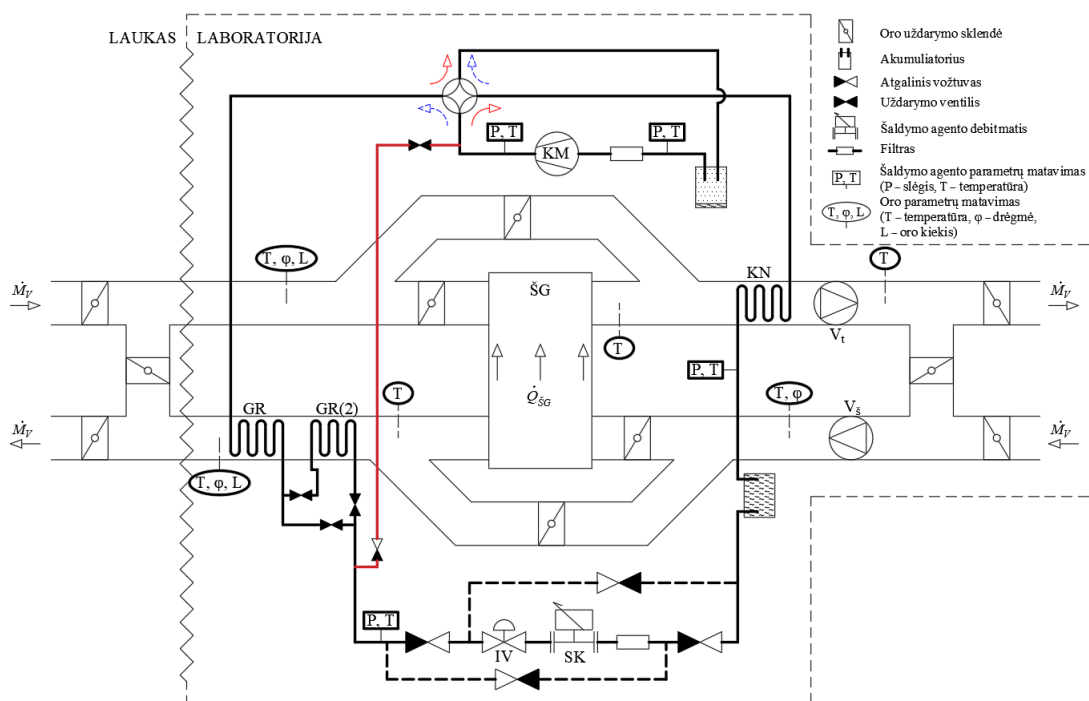
- Stende turi būti galimybė matuoti ir kaupti oro bei šaldymo agento fizikinius parametrus, debitus, duomenis apie suvartotos elektros energijos kiekius, stebėti šaldymo agento fazės būseną.
- Siekti išmatuoti daugiau parametrų, dubliuojančių atskirų kontūrų energijos balanso lygčių narius.

## 2. Eksperimentinio stendo principinė schema

Atsižvelgiant į ankstesniame skyriuje atliktą eksperimentinių stendų apžvalgą ir suformuluotus reikalavimus vėdinimo įrenginio eksperimentinio šilumos siurblio stendui, parengiama jo principinė schema, pateikta 2 paveiksle.

Stendo konstrukcijoje galima išskirti du pagrindinius komponentus: oro tiekimo / ištraukimo sistema ir šilumos siurblio sistema.

Nuodugniau panagrinėkime stendo dalį, kuri atsakinga už oro tiekimą ir ištraukimą. Viršutinėje schemas dalyje galime matyti šviežio lauko oro tiekimo į patalpą liniją, apatinėje – oro ištraukimo iš patalpos liniją. Tarp šių oro tiekiamosios ir ištraukiamosios linijų (schemos centre) numatytas šilumogražis (ŠG), kuriuo galima atgauti šilumą iš grįžtamojo oro srauto ir perduoti ją tiekiamajam. Šalia šilumogražio numatytos jo apėjimo linijos, kurios leistų atlikti eksperimentus eliminuojant šilumogražio įtaką. Taip pat galime matyti, kad oro tiekiamoji bei ištraukiamoji linijos yra tarpusavyje sujungtos ortakiais su uždarymo sklendėmis. Tokia konstrukcija leistų iš dalies recirkuliuoti orą sistemoje arba gauti visiškai uždarą oro cirkuliacijos kontūrą. Tai praplečia galimų oro parametrų diapazoną. Ortakiai laboratorijos patalpoje padengiami ši-



2 paveikslas. Vėdinimo įrenginio eksperimentinio šilumos siurblio stendo principinė schema  
Figure 2. Principle scheme of the experimental heat pump stand of the ventilation unit



lumine izoliacija, kad eliminuotų šilumos nuostolių įtaką tyrimo rezultatams.

Oro parametrus pradeda matuoti nuo jo paėmimo iš lauko. Pradžioje nustatoma oro temperatūra, santykinė drėgmė ir oro kiekis. Dėl tolesnių termodinaminių procesų oro tiekimo linijoje nei oro kiekis, nei drėgmės kiekis ore pasikeisti neturėtų, todėl aktualus tik temperatūros matavimas po šilumogrąžio ir po kondensatoriaus (KN). Oro ištraukimo pusės pradžioje matuojama temperatūra ir drėgmė, nes dėl patalpoje vykstančių procesų šie parametrai galėtų pasikeisti. Po šilumogrąžio atliekamas tik temperatūros matavimas, o jau už garintuvo (GR) turėtų būti atliktas ne tik temperatūros, bet ir santykinės drėgmės matavimas, nes dėl oro aušinimo proceso garintuve pasikeis ore esantis drėgmės kiekis. Taip pat turi būti nustatytas išmetamojo oro kiekis. Iš esmės oro debito matavimo vieta nėra griežtai fiksuota, svarbu, kad ant oro tiekimo ir ištraukimo atšakų būtų nors vienas pratekančio oro srauto matavimo prietaisai.

Antras iš pagrindinių stendo komponentų – tai šilumos siurblio kontūras. Jis susideda iš kintamojo greičio kompresoriaus (KM), elektroninio plėtimosi vožtuvo (IV), šilumokaičių (KN ir GR), vamzdžių, apsaugos, šaldymo agento parametrų matavimo bei stebėjimo prietaisų. Be to, sistemoje numatytas ketureiškis vožtuvas, kuris leidžia perjungti šilumos siurblio veikimo režimus: šildymas arba vėsinimas / atitirpinimas. Taip pat šilumos siurblio sistemoje numatytas antras garintuvas (GR(2)), turintis galimybę jį atjungti. Tai leistų nagrinėti skirtingus šilumos siurblio garintuvo atitirpinimo scenarijus.

Veikiant šilumos siurbliui šildymo režimu, kompresorius (KM) suslegia šaldymo agento garus iki reikiamo slėgio, taip jo būseną transformuoja į aukštos temperatūros perkaitintus garus. Tuomet šaldymo agento garai teka į kondensatorių (KN), kuriame, atiduodami šilumą tekančiam orui, kondensuojasi. Atidavęs šilumą, bet neatvėšęs šaldymo agentas teka pro plėtimosi vožtuvą (IV), kuriame droseliuojant staigiai krinta šaldymo agento slėgis ir temperatūra. Atšalęs šaldymo agentas teka į garintuvą (GR), kuriame iš patalpos ištraukiamas šiltas oras jį pašildo ir išgarina. Paskui šaldymo agentas vėl patenka į kompresorių ir ciklas kartojasi.

Veikiant reversinio ciklo atitirpinimo arba vėsinimo režimu kondensatoriaus ir garintuvo funkcinės vietos apsisikeičia: garintuve šaldymo agentas kondensuojasi ir šildo pratekančią orą, o kondensatoriuje jis garuoja vėsindamas orą. Tokioje situacijoje po kompresoriaus aukštos temperatūros perkaitinti šaldymo agento garai patenka ne į kondensatorių (KN), o į garintuvą (GR). Jame karšti garai pradeda kondensuotis atiduodami šilumą garintuvui ir taip jį atitirpindami. Garintuve susikondensavęs šaldymo agentas prateka pro plėtimosi vožtuvą (IV) ir, esant žemai temperatūrai bei slėgiui, patenka į kondensatorių (KN). Kondensatoriuje šaldymo agentas garuoja vėsindamas per šilumokaitį tekančią į patalpą orą. Ciklas kartojasi.

Karštų dujų apėjimo linija schemoje (2 paveikslas) pažymėta raudona spalva. Veikiant pagal šį garintuvo

atitirpinimo scenarijų, karštos šaldymo agento dujos po kompresoriaus tiekiamos į garintuvą, tuomet nutirpina jį nuo susidariusio šerkšno sluoksnio. Pasibaigus atitirpinimo procesui apėjimo linija uždaroma ir įrenginys toliau veikia šildymo režimu.

Šilumos siurblio kontūre po kiekvieno iš pagrindinių komponentų (KM, KN, IV, GR) numatyti šaldymo agento slėgio bei temperatūros matavimo prietaisai. Šaldymo agento skystosios fazės pusėje numatytas debitmatis. Be to, prieš kompresorių numatytas šaldymo agento akumulatorius, skirtas skysto patiekimui į kompresorių minimizuoti paleidimo ir pereinamųjų veikimo procesų metu, taip jį apsaugant nuo potencialių gedimų. Pageidautina, kad akumulatorius būtų padarytas iš skaidrios medžiagos arba nors turėtų pakankamo dydžio apžiūros langelį, kad būtų įmanoma fiziškai stebėti šaldymo agento fazės būseną. Panašiu tikslu šilumos siurblio sistemoje už kondensatoriaus numatytas permatomas indas, kuris leistų stebėti kondensavimo proceso rezultatus.

## Išvados

Siekiant sukonstruoti vėdinimo įrenginio su integruotu šilumos siurbliu eksperimentinį stendą, atlikta tokio tipo eksperimentinių stendų analizė. Ji leido atskleisti pagrindinius tokių stendų konstrukcijos aspektus, suformuluoti esminius reikalavimus ir prielaidas. Remiantis šios apžvalgos rezultatais parengta į vėdinimo įrenginį integruoto šilumos siurblio eksperimentinio stendo principinė schema, kurioje parodytas stendo komponentų funkcinis išdėstymas ir būtinos oro bei šaldymo agento parametrų matavimo vietos. Toks eksperimentinio stendo sprendimas leistų atlikti šilumos siurblio termodinaminio ciklo tyrimus, išmatuoti tyrėjus dominančius veikimo parametrus, deramai identifikuoti vykstančius procesus.

## Literatūra

- Aprea, C., Mastrullo, R., & Renno, C. (2006). Experimental analysis of the scroll compressor performances varying its speed. *Applied Thermal Engineering*, 26(10), 983–992. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.10.023>
- Bareika, P. (2013). *Vėdinimo įrenginių su integruotais šilumos siurbliais projektavimas, tyrimas ir analizė*. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Dongellini, M., Abbenante, M., & Morini, G. L. (2017). *A strategy for the optimal control logic of heat pump systems: impact on the energy consumptions of a residential building*. Paper presented at the Proceedings of the 12th IEA Heat Pump Conference 2017.
- Europos Parlamentas. (2016). *Europos Parlamento rezoliucija dėl ES šildymo ir vėsinimo strategijos* (2016/2058(INI)). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A52016IP0334>
- European Commission. (2016). *An EU strategy on heating and cooling 2016*. Brussels.
- Frik, A. (2019). *Eksperimentinis šilumos siurblio ciklo tyrimas, jo valdymo algoritmo parengimas*. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. <https://doi.org/10.20334/pinzs.2019.02>
- Gunt. (2019). *Air conditioning system model gunt Et 605*. Berlin.

- Jouhara, H., & Yang, J. (2018). Energy efficient HVAC systems. *Energy and Buildings*, 179, 83–85. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.001>
- Karim, A., Ishtiyaque, S., Afridi, F., Kaneez, R., Kamaludin, S., Karim, A., Khan, A. A., Abouesayed, A., Solung, A. R., Ghanzanfar, F., Hai, M., & Siddique, M. (2019). A Simple approach to design and fabricate an efficient heat pump. *Journal of Applied and Emerging Sciences*, 8(2), 186–194.
- Liu, Z., Fan, P., Wang, Q., Chi, Y., Zhao, Z., & Chi, Y. (2018). Air source heat pump with water heater based on a bypass-cycle defrosting system using compressor casing thermal storage. *Applied Thermal Engineering*, 128, 1420–1429. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.131>
- Lu, F., Liu, S., Dai, B., Zhong, Z., Li, H., & Sun, Z. (2019). Experimental study on thermal performance of transcritical CO<sub>2</sub> air source heat pump for space heating. *Energy Procedia*, 158, 5913–5919. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.532>
- Martinaitis, V., Bareika, P. ir Misevičiūtė, V. (2012). Vėdinimo įrenginio su šilumos siurbliu termodinaminio efektyvumo tyrimas. *Mokslas – Lietuvos ateitis / Science – Future of Lithuania*, 4(5), 493–498. <https://doi.org/10.3846/mla.2012.79>
- Qiu, J., Zhang, H., Sheng, J., & Wu, Z. (2019). Experimental investigation of L41b as replacement for R410A in a residential air-source heat pump water heater. *Energy and Buildings*, 199, 190–196. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.055>
- Song, M., Deng, S., Mao, N., & Ye, X. (2016). An experimental study on defrosting performance for an air source heat pump unit with a horizontally installed multi-circuit outdoor coil. *Applied Energy*, 165, 371–382. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.107>
- Wenju, H., Yiqiang, J., Minglu, Q., Long, N., Yang, Y., & Shiming, D. (2011). An experimental study on the operating performance of a novel reverse-cycle hot gas defrosting method for air source heat pumps. *Applied Thermal Engineering*, 31(2–3), 363–369. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.09.024>

## EXPERIMENTAL TEST STAND OF A HEAT PUMP INTEGRATED IN AIR HANDLING UNIT

A. Frik, J. Bielskus

### Abstract

Heat pumps are becoming increasingly popular and are playing an important role in the heat and cooling supply chain of buildings sector. Although more than 160 years have passed since the manufacture of the first heat pump, this technology, designed to recover low-potential heat energy and its useful use, can be called an innovative and efficient energy transformer. Air-to-water and air-to-air heat pumps are becoming more popular today due to their installation cost compared to ground-to-water heat pumps. It has been noticed that recently air-to-air heat pumps are more often installed in modern air handling units. The main energy transformers in these air handling units are the air-to-air heat pump and recovery heat exchanger. In the scientific literature little attention is paid to the thermodynamic cycle of the combination of the air handling unit and the heat pump, as well as the search for new possibilities to change and control it, this is a potential direction that can increase the efficiency of the whole system. To study the control capabilities of the unit, an experimental stand of the heat pump built into the ventilation unit is needed; it would help validate the results of theoretical studies and investigate the possibilities of expanding the control. Therefore, this paper presents a review of the experimental stands of non-integrated heat pumps and integrated heat pumps in air handling unit. Based on this review, the basic requirements for the installation of an experimental stand of a heat pump built into an air handling unit are formulated and a conceptual scheme of this stand is drawn up.

**Keywords:** heat pump integrated in air handling unit, experimental stand, thermodynamic cycle of heat pump.