

Environmental engineering Aplinkos inžinerija

ŠILUMOS SIURBLIO ORAS–VANDUO VEIKIMO TYRIMAS TAIKANT TRNSYS MODELIAVIMO PRIEMONĘ

Gabrielė DAUGIRDAITĖ, Giedrė STRECKIENĖ ^{*}, Tomas KROPAS 

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

Gauta 2021 m. liepos 8 d.; priimta 2021 m. rugsėjo 3 d.

Santrauka. Siekiant ambicingų energijos efektyvumo ir beveik energijos nevirtojančių pastatams keliamų reikalavimų ir tikslų, įvairūs technologiniai sprendimai, įgalinantys atsinaujinančiosios energijos vartojimą, siūloni bei taikomi. Viena tokių sparčiai plintančių technologijų – šilumos siurbliai. Tačiau taikant šilumos siurblius oras–vanduo šalyse, kur šaltasis sezonas šaltas ir drėgnas, susiduriama su nepalankiomis sąlygomis šiai įrangai veikti šildymo sezono metu. Dėl šios priežasties įrangos veikimo efektyvumas mažėja. Šiame straipsnyje pristatomi šilumos siurblio oras–vanduo, kurio nominalioji šildymo galia 6,55 kW, veikimo analizės rezultatai Lietuvos klimato sąlygomis taikant TRNSYS modeliavimo priemonę. Darbui taikytas skaitinis modelis buvo kalibruotas naudojant realius duomenis, gautus Vilniaus Gedimino technikos universitete, kai eksperimentiniai matavimai atlikti esant šilumos siurblio užšalimo sąlygoms. Skaičiavimų metu nustatomas šilumos siurblio šildymo režimo efektyvumas. Modeliuojant taip pat atlikta modelio parametrinė analizė, kai stebima, kiek pradiniai klimato duomenys turi įtakos modelio rezultatams. Lyginami Vilniaus, Prahos ir Londono miestų klimato sąlygas atitinkantys modeliavimo rezultatai.

Reikšminiai žodžiai: eksperimentas, modeliavimas, šilumos siurblys oras–vanduo, sezoninis veiksmingumo koeficientas (SPF), šildymo sezonas, šilumos siurblio efektyvumas (COP), TRNSYS.

Įvadas

Besikeičiantis klimatas tampa vis aktualesne tema šiuolaikiniame pasaulyje. Kuriami įstatymai bei įpareigojimai siekiant sumažinti klimato kaitą skatinančius veiksnius bei pereiti prie darnaus miesto koncepcijos. Atsinaujinančių energijos išteklių naudojimas šilumos ir elektros gamybai leistų prisidėti prie tvarios energetikos, mažintų kuro importą ir šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas. Viena iš priemonių, taikomų siekiant šių tikslų, yra šilumos siurblių naudojimas pastatuose. Šilumos siurbliai oras–oras arba oras–vanduo šiuo metu yra sparčiai plintanti technologija energiška efektyviuose pastatuose. Tačiau šalyse, kur šaltasis metų sezonas yra šaltas ir drėgnas, šilumos siurbliai, veikdami šildymo režimu, susiduria su nepalankiomis sąlygomis jiems veikti.

Pastebėta, kad šilumos siurblių veikimui didelę įtaką daro šildymo sezono metu kintanti aplinkos oro temperatūra ir santykinė drėgmė, pastato šiluminės apkrovos, šilumos siurblio valdymo algoritmai (Dongellini et al., 2015). Susidarius nepalankioms klimato sąlygoms pradeda formuotis šerkšnas ant šilumos siurblio (ŠS) garintuvo

išorinio paviršiaus. Šiuo atveju šilumokaičio paviršiaus temperatūra būna žemesnė nei oro rasos taško temperatūra ir ore esanti drėgmė pradeda kondensuotis bei šalti tarp garintuvo plokštelių. Susiformavęs šerkšno sluoksnis didina slėgio nuostolius šilumokaitėje, dėl to, norint išlaikyti oro srauto greitį, reikia didesnės ventiliatoriaus galios, taip pat šerkšno sluoksnis mažina šilumos mainus tarp oro ir šaldymo agento (Nawaz et al., 2018). Šerkšno formavimąsi lemia aplinkos sąlygos ir pačio ŠS veikimo parametrai, didžiausią įtaką turi oro srauto, pratekančio per šilumokaitę, greitis, oro švarumas, šilumokaičio paviršiaus temperatūros, aplinkos oro parametrai (Lee ir Ro, 2002; Zhu et al., 2015).

Analizuojant ir parenkant energetines sistemas su ŠS dažnai šalia eksperimentų pasitelkiami kompiuteriniai modeliai įvairių derinių tyrimams. ŠS derinami su fotovoltiniais saulės moduliais, tai leidžia ilgalaikėje perspektyvoje mažinti išlaidas elektrai bei šiltnamio dujų emisijas (Kamel ir Fung, 2014). Tyrėjai taip pat pasirenka įvairias modeliavimo priemones, kuriomis stengiamasi analizuoti tiek sistemos, tiek viso pastato veikimą. Ling ir kt. nagrinėjo

*Autorius susirašinėti. El. paštas giedre.streckiene@vilniustech.lt

mokyklos paskirties pastatą su oro šaltinio ŠS, taikydami EnergyPlus įrankį, bei nustatė įtekančio vandens srauto temperatūros įtaką sistemos efektyvumui (Ling et al., 2020). Januševičius ir kt. panaudojo TRNSYS įrankį sistemos su saulės siena ir ŠS tyrimui, kartu autoriai atkreipė dėmesį į išaugusį tikslų ir išsamių kompiuterinių modelių poreikį (Januševičius et al., 2016). Tą pačią kompiuterinę priemonę taikė ir St-Onge ir kt., kai kintamosios galios oro šaltinio ŠS nagrinėtas įtraukiant atšildymo ciklus. Autoriai pastebėjo, kad eksperimentų metu ŠS veiksmingumas ne visada atitinka tą, kurio tikimasi, bei pažymėjo, kad reikalingi tolesni papildomi tyrimai, lankstesni kompiuteriniai modeliai (St-Onge et al., 2018). Archetipiniame tvariame pastate įrengto ŠS veikimą modeliavo Amirirad ir kt. siekdami nustatyti bendrą jo poveikį elektros vartojimui. Nagrinėtu atveju ŠS efektyvumas (COP angl. *coefficient of performance*) kito 1,5–4,5 ribose priklausomai nuo lauko oro temperatūros (Amirirad et al., 2017). Wang et al. taip pat taikydami TRNSYS įrankį nagrinėjo įprasto ŠS ir pasiūlyto neužšalancio (angl. *frost-free*) ŠS veikimą. Jų tyrimas parodė, kad sezoninis įrenginio šildymo veiksmingumas (SPF angl. *seasonal performance factor*) įprastiniu atveju atskiruose miestuose buvo 1,71, 1,63 ir 2,37, o esant neužšalimo technologijai SPF gali padidėti iki 9 % (Wang et al., 2018).

Kaip matyti, ŠS siurblių taikymo ir plėtojimo tyrimų poreikis auga, kartu pastebėta, kad ne visada modeliuojant sistemas tiksliai atsižvelgiama į oro šaltinių šilumos siurblių veikimo efektyvumo sumažėjimą, kai šildymo sezono metu aplinkos oro temperatūra žema, o santykinė oro drėgmė didelė. Tai parodo poreikį tobulinti ŠS technologijas bei taikyti išsamius modelius.

Šio straipsnio tikslas – pateikti sudaryto oro šaltinio ŠS modelio taikant TRNSYS programą rezultatus, kai pats modelis yra kalibruojamas naudojant eksperimentinius duomenis ir atsižvelgiama į aplinkos oro parametrus. Tai leidžia toliau nustatyti nagrinėjamo ŠS sezoninį veiksmingumo koeficientą.

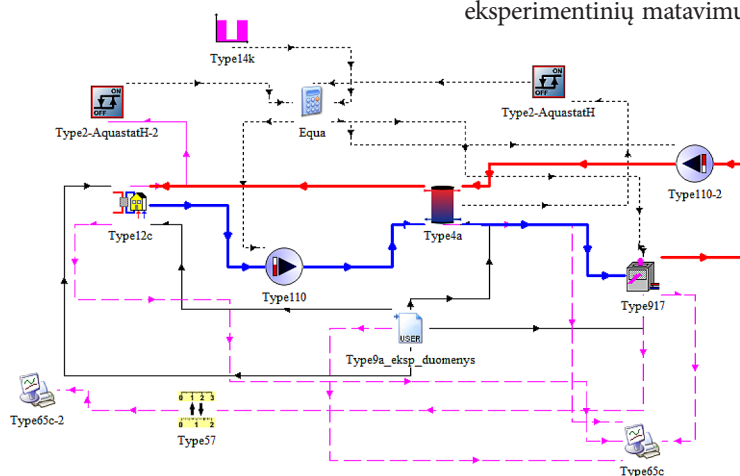
1. Tyrimo objektas ir TRNSYS modelio kūrimas

Tyrimo objektas – oro šaltinio šilumos siurblys, esantis Vilniaus Gedimino technikos universiteto Pastato energinių ir mikroklimato sistemų laboratorijoje. Esant lauko oro temperatūrai 2 °C ir ruošiamo vandens temperatūrai 35 °C, jo nominalioji šildymo galia yra 6,55 kW, nominalusis pratekančio oro srautas – 46 m³/min. Šilumos siurblio kontūras pripildytas R410A šaldymo agento. Vykdyt eksperimentus, kurių duomenys panaudojami rezultatų dalyje, šilumos siurblys veikė aplinkos oro sąlygomis, kai ant jo garintuvo formuodavosi šerkšnas, o tai mažino jo veikimo efektyvumą. Vykdyt eksperimentų metu sumontuotas stebėjimo stendas, matavimo įranga, stebėjimų eiga bei vaizdinis šerkšno formavimasis pateiktas šaltinyje (Daugirdaitė et al., 2021). Vykdyt eksperimentų metu (2020–2021 m.) vidutinis oro srautas kito nuo 1583 m³/h iki 5298 m³/h, tiekiamo vandens temperatūra esant garantuoto užšalimo galimybei buvo palaikoma apie 40 °C, o grįžtamojo – apie 35 °C. Tiriamuoju laikotarpiu ŠS šildymo galia svyravo nuo 0,58 kW iki 6,39 kW.

Skaitiniam modeliavimui buvo taikoma imitacinio modeliavimo programa TRNSYS, kuri pasižymi moduline struktūra. Tai leidžia sudaryti nagrinėjamą šildymo sistemą iš komponentų bei nagrinėti tiek visos sistemos rezultatus, tiek atskiro komponento išvestis (Januševičius ir Streckienė, 2015). Šios programos taikymo tinkamumą ŠS veikimui tirti parodė taip pat ir ankstesnės studijos (Chargui ir Sammouda, 2014; Januševičius et al., 2016; St-Onge et al., 2018; Wang et al., 2018). TRNSYS programoje naudojamiems komponentams kaip įvestį taip pat galima panaudoti eksperimentų metu gautus duomenis, tai buvo atliekama ir šio tyrimo metu. Sudaryto modelio vaizdas, skirtas jo rezultatų patikrai su eksperimentiniais duomenimis, pateiktas 1 paveiksle.

Pagrindiniai komponentai, naudojami sudarant TRNSYS modelį:

- Oro šaltinio šilumos siurblys (Type917), kurio nominalioji šildymo galia yra 6,55 kW. Modelio kalibravimo metu įtekančio vandens temperatūra imama iš eksperimentinių matavimų atitinkamu laiko žingsniui,



1 paveikslas. Sistemos su šilumos siurbliu modelis TRNSYS aplinkoje
Figure 1. TRNSYS model of the system with heat pump

o atliekant viso sezono skaičiavimus nustatoma, kad ŠS ruošia 40,0 °C temperatūros vandenį. Modeliavimo metu nustatomas įtekančio vandens srautas yra 1300 kg/h. Šiame TRNSYS komponente galima aprašyti konkretaus ŠS jungimosios galios, bendros šiluminės galios ir elektrinio galingumo parametrus priklausomai nuo aplinkos oro temperatūros bei santykinės oro drėgmės. Tačiau numatytuose nustatymuose šie duomenys pateikiami tik esant teigiamoms aplinkos oro temperatūroms. Todėl tokiai informacijai aprašyti reikalingi arba tikslūs ŠS gamintojo duomenys apie įrenginio veikimą, arba eksperimentinių matavimų duomenys.

- Vartojimo kontūras (Type12c) – nagrinėjama šildoma patalpa, kurioje palaikoma 20 °C temperatūra, vidiniai pritekiai pasirenkami 0,5 kW, taikomi savitieji šilumos nuostoliai 80 W/K.
- Akumuliacinė talpa (Type4a) pasirenkama 700 l, pripildoma vandens, šilumos perdavimo koeficientas dėl šilumos nuostolių 0,15 W/m²K. Akumuliacinė talpa yra stratifikuota, padalinta į penkis izoterminius sluoksnius. Leidžiama didžiausia vandens temperatūra talpoje 80 °C.
- Valdikliai (Type2-AquastatH) leidžia stebėti patalpos vidaus temperatūrą, kuri gali kisti ±3 °C ribose nuo nustatytosios temperatūros, akumuliacinės talpos temperatūrą, kurioje palaikoma 40 °C temperatūra bei leidžiama taip pat jai svyruoti ±3 °C ribose. Atitinkamai valdikliai siunčia signalą cirkuliaciniams siurbliams, kada pastarieji turėtų įsijungti ir išsijungti.
- Šildymo sezono trukmės nustatymas (Type14k) naudojamas skaičiuojant viso šildymo sezono įrenginio rodiklius. Nustatyta šildymo sezono trukmė yra nuo rugsėjo 30 d. iki balandžio 30 d.
- Atitinkamais ryšiais sujungus komponentus su išvesties duomenų spausdintuvu (Type65c), analizuojami tokie duomenys: patalpos vidutinė temperatūra, į akumuliacinę talpą įtekančio ir ištekančio vandens temperatūra, vandens srauto temperatūra ištekančio iš šilumos siurblio, šilumos siurblio COP, kompresoriui ir visam ŠS reikalinga galia ir pan.
- Vienetų perskaičiavimo komponentas (Type57) taikomas, kad įrenginių galios būtų išreiškiamos kW.
- Duomenų nuskaitymo komponentas (Type9a) leidžia modelyje panaudoti eksperimente išmatuotus duomenis: aplinkos oro temperatūra, santykinė drėgmė ir vandens, patenkančio į ŠS, temperatūra.
- Suderinus modelį, Type 9a iš dalies pakeičiamas klimatinių duomenų įvesties komponentu (Type15), kai nagrinėjamas įrenginio veikimas viso šildymo sezono metu. Naudojamas Vilniaus miesto klimatinių duomenų failas TMY2 formatu.

ŠS veikimui vertinti gali būti taikomi įvairūs rodikliai (Wu et al., 2021), tačiau vieni populiariausių yra COP ir SPF. Pirmasis jų apskaičiuojamas pagal formulę:

$$COP = \frac{Q}{P_e}, \quad (1)$$

čia Q – šilumos siurblio pagamintas energijos kiekis, kWh; P_e – šilumos siurblio suvartojamas energijos kiekis, kWh.

Eksperimentų metu šie dydžiai apskaičiuojami matuojant įtekančio ir ištekančio vandens temperatūras ir masinius debitus, srovės stiprį. Tinklo įtampa pasirenkama 230 V, galios faktorius 0,97.

Taip pat skaičiuojamas įrenginio sezoninis efektyvumo rodiklis SPF:

$$SPF = \frac{\text{pagamintas energijos kiekis per visą šildymo sezoną}}{\text{suvartotas energijos kiekis per visą šildymo sezoną}}. \quad (2)$$

Iš eksperimentinių duomenų buvo nustatyta, kad, esant aplinkos oro temperatūrai 6 °C, ŠS COP sudarė 2,69, o nukritus jai iki 2 °C COP vertė sumažėjo iki 2,18. Aplinkos temperatūroje 6 °C ŠS dirbo kondensacijos zonoje, kur buvo fiksuojami dažnesni ŠS išsijunginėjimai. Be to, atskirai dar reikia vertinti patiriamus šilumos nuostolius dėl vamzdyno izoliacijos pažeidimo trasoje, esančioje lauke.

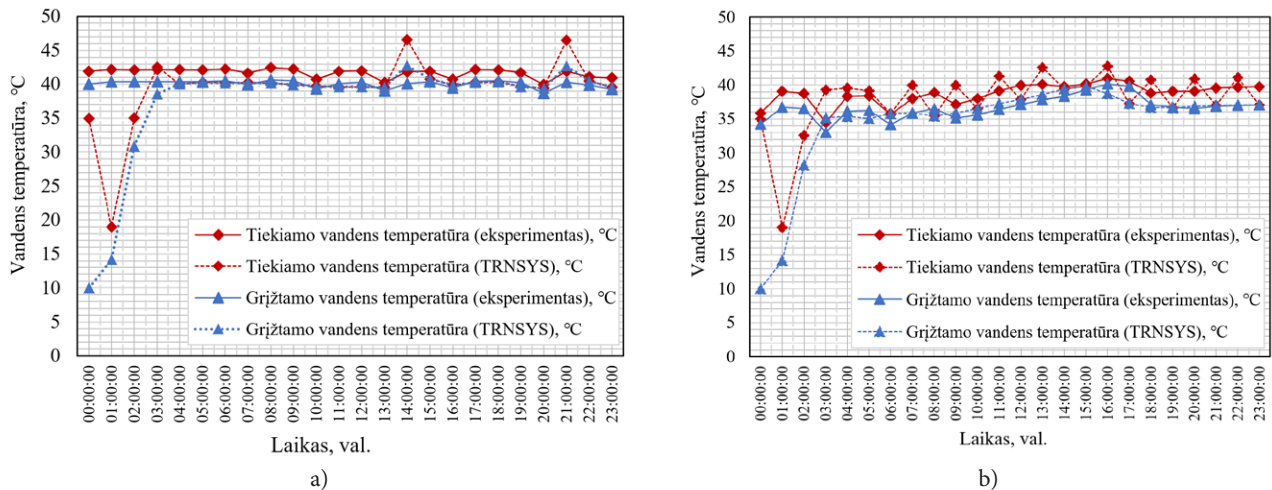
2. Rezultatai ir jų aptarimas

2.1. Modelio rezultatų palyginimas su eksperimentiniais duomenimis

Siekiant modeliu nustatyti šilumos siurblio oras–vanduo sezoninį efektyvumą, pirmiausiai TRNSYS programoje modelis buvo kalibruojamas. Šiam tikslui buvo pasirinktos dvi paros, turinčios skirtingus lauko oro parametrus. Viena iš jų 2021 m. sausio 11 d., kai aplinkos oro temperatūra svyravo nuo –5 °C iki –1 °C, o oro santykinė drėgmė buvo apie 93 %. Šią parą modelio rezultatų ir eksperimentinių duomenų palyginimas stebint tiekiamo ir grįžtamo iš šilumos siurblio temperatūras pateiktas 2a paveiksle. Pradinuose laiko žingsniuose modelio rezultatuose matomas nesutapimas dėl talpos parametrų nustatymų, t. y. pačios talpos vidutinės temperatūros, kad susiformuotų reikalingas šilumos srautas šildymo sistemai. Tolesniais laiko žingsniais modelio rezultatai atitinka eksperimentinius. Modelyje gaunamo tiekiamo vandens temperatūros ryškesnis svyravimas paaiškinamas nustatyta galimybe valdiklyje (Type2-AquastatH-3) šiai temperatūrai svyruoti. Šios paros ŠS veikimas pagal Zhu ir kt., kurie sudarė ŠS garintuvo užšalimo žemėlapi, priskiriamas dviem zonoms: vidutinio užšalimo ir sunkaus užšalimo (Zhu et al., 2015). Šią parą ŠS palaikoma tiekiamo vandens temperatūra 41,6 °C ir tūrinis debitas 22,8 l/min.

Panaši situacija gaunama, kai nagrinėjama 2021 m. vasario 19 para. Tuomet lauko oro temperatūra svyravo nuo –15 °C iki –4 °C, o santykinė oro drėgmė kito nuo 50 % iki 84 %. Ši para buvo šalčiausia matavimo laikotarpiu bei šią parą buvo užregistruotas didžiausias santykinės oro drėgmės svyravimas. Naudojantis matavimais, buvo gauta, kad ŠS veikė vidutinio užšalimo ir lengvo užšalimo zonose, o išmatuota tiekiamo vandens temperatūra apie 38,7 °C, debitas 22,5 l/min.

Modeliuojant pastebėta, kad šilumos siurblys veikė tik tuo laikotarpiu, kai talpoje trūko šilumos, kuri buvo tiekama į pastato šildymo sistemą. Naudojantis eksperimentiniais duomenimis buvo apskaičiuotas šilumos siurblio



2 paveikslas. Šilumos siurblio cirkuliuojančio vandens temperatūrų palyginimas eksperimento metu ir modelyje:
 a) 2021 01 11 para; b) 2021 02 19 para
 Figure 2. Comparison of the circulating water temperatures in the heat pump during the experiment and in the model:
 a) 2021.01.11 day; b) 2021.02.19 day

vidutinis COP sausio 11 d. ir gauta jo reikšmė 1,61, o taikant modelio sugeneruotus duomenis gauta COP vertė 1,72. Nagrinėjamu atveju nesutapimas sudarė 7 %. Palyginus vasario 19 d. apskaičiuotą COP vertę (1,79) su modeliu gauta vertė (1,73), gautas nesutapimas sudarė 4 %. Palyginimas parodė, kad modelis gali būti toliau taikomas sezoniniams šilumos siurblio veikimo tyrimams, nes matavimų ir modeliavimo rezultatų paklaida buvo mažesnė nei 10 %.

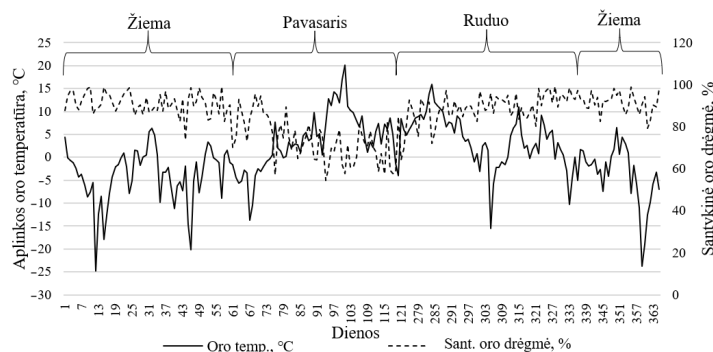
2.2. Šilumos siurblio veikimas visą šildymo sezoną

Vertinant visą šildymo sezoną buvo pasirinktas Vilniaus miestas, kurio aplinkos oro sąlygoms apibūdinti naudojami tipiniai meteorologiniai metai (TMY rinkmena). Tik šildymo sezono metu aplinkos oro temperatūros ir santykinės oro drėgmės kitimas nuo sausio 1 d. iki gruodžio 31 d. pateiktas 3 pav., kuriame šiltasis sezonas, kai neaktualus patalpų šildymas, nėra vaizduojamas. Kaip matyti, nagrinėjamu laikotarpiu aplinkos oro temperatūra svyravo nuo $-24,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $20,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, vidutinė oro temperatūra sudarė $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, o santykinė oro drėgmė svyravo nuo 54,5 % iki 99,3 %.

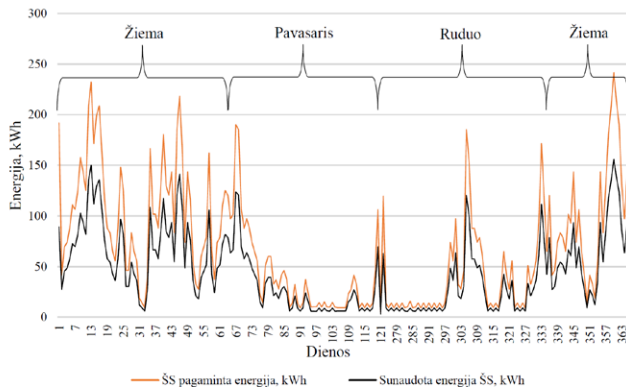
Šildymo sezono metu ŠS gaminamos ir vartojamos energijos kiekiai nuo rugsėjo 30 d. iki balandžio 30 d. pa-

vaizduoti 4 paveiksle. Jame energijos kiekiai apskaičiuojami sumuojant kiekvienos paros energijos srautus.

Nustatyta, kad kai aplinkos oro temperatūra didesnė nei $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, skirtumas tarp tiekiamojo ir grįžtamojo vandens temperatūrų ŠS yra mažiausias. Šildymo sezono metu ŠS šildymo galia svyravo nuo 4,62 kW iki 5,69 kW. Taip pat buvo apskaičiuota, kad per šildymo sezoną ŠS pagamino 14569,9 kWh šilumos ir suvartojo 9439,3 kWh elektros, o gautas SPF sudarė 1,54. Didžiausi energijos kiekiai fiksuojami žiemos laikotarpiu. Modeliuojant taip pat pastebėta, kad yra poreikis papildyti pataisų rodiklius, kurie charakterizuoja ŠS veikimo parametrus. Todėl atskirai reikalinga sudaryti juntamosios galios, bendros šiluminės galios ir elektrinio galingumo priklausomybes nuo aplinkos oro temperatūros ir oro santykinio drėgnio, tai paprastai nėra pateikiama įrangos techninėse charakteristikose, kurias sudaro ŠS gamintojai. Tai rodo eksperimentinių matavimų poreikį, kad naudojami skaitiniai modeliai būtų kuo tikslesni. Taikant sistemas su ŠS taip pat reikia atsakingai parinkti ŠS ruošiamo karšto vandens temperatūrą, nes sumažinus ją, pavyzdžiui, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (nuo $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $35\text{ }^{\circ}\text{C}$), elektros suvartojimas sumažėjo 16 %, tai kartu turės ir teigiamą ekonominį poveikį.



3 paveikslas. Tipinių meteorologinių metų šildymo sezono aplinkos oro temperatūros ir santykinės oro drėgmės kitimas
 Figure 3. Variation of ambient air temperature and relative humidity during the heating season of the typical meteorological year



4 paveikslas. ŠS pagaminta ir suvartota energija šildymo sezono metu

Figure 4. Generated and consumed energy by the heat pump during the heating system

Atliekant modelio parametrinę analizę, buvo keičiama vietovė, t. y. pasirenkama kita klimatinė metų rinkmena: Prahos ir Londono miestai, pasižymintys švelnesnėmis žiemomis ir skirtingu santykinu drėgnumu lyginant su Vilniumi. Pavyzdžiui, Prahoje klimatas yra vidutinis žemyninis, žiemos švelnios, Londono klimatas pagal Kiope no klimato klasifikaciją priskiriamas jūriniam, turinčiam šiltas žiemas, o Vilniaus klimatas priklauso šaltų žiemų vidutinių platumų klimatui. Lyginant energinius dydžius, Prahoje pagamintos šilumos ir suvartotos elektros kiekiai sumažėjo 29 %, o Londone 66 %, lyginant su Vilniaus atveju, tai daugiausia siejama su aplinkos oro temperatūra ir mažesne santykinė oro drėgme. Reikia paminėti, kad nagrinėtu laikotarpiu vidutinė lauko oro temperatūra atitinkamai Vilniuje, Prahoje ir Londone yra 0,5 °C, 2,7 °C ir 7,2 °C, o oro santykinė drėgmė atitinkamai 86 %, 81 % ir 80 %. Kartu tai atsispindėjo ir SPF rodiklio atveju, jis Prahos mieste didesnis 3 %, o Londone beveik 13 % nei taikant Vilniaus klimatologinius duomenis.

Išvados

Išnagrinėjus TRNSYS modeliavimo programą oro šaltinio šilumos siurblio veikimo rezultatus šildymo sezono metu, atsižvelgiant į aplinkos oro santykinę drėgmę ir oro temperatūrą, nustatyta, kad:

- šilumos siurblio garintuvo užšalimo poveikis turi būti vertinamas sudarant skaitinius modelius, ypač kai įrenginiai veikia nepalankiomis klimato sąlygomis;
- Lietuvos klimato sąlygomis šilumos siurblių veikimas šaltuoju laikotarpiu dažnai patenka į lengvo, vidutinio ir sunkaus užšalimo zonas;
- eksperimentinių duomenų įtraukimas leidžia išsamiu aprašyti ŠS veikimą bei gauti tikslesnes COP ir SPF vertes. Reikalingi atskiri eksperimentiniai matavimai, kai nagrinėjama, kaip kinta ŠS juntamoji galia, bendra šiluminė galia ir vartojama elektrinė galia priklausomai nuo ruošiamo šilumnešio temperatūros, aplinkos oro temperatūros ir oro santykinės drėgmės;

- skaitinio modelio atveju, įtraukiant garintuvo užšalimo įtaką, oro šaltinio ŠS SPF Vilniaus miestui sudarė 1,54, esant ruošiamo ŠS vandens temperatūrai 40 °C ir 1300 kg/h debitui;
- Prahos ir Londono miestų atvejais pagamintos šilumos ir suvartotos elektros kiekiai sumažėjo 29 % ir 66 % lyginant su Vilniumi, skirtumą labiausiai lėmė šildymo sezono aplinkos oro parametrai: temperatūra ir santykinė drėgmė, o SPF atitinkamai padidėjo 3 % ir 13 %;
- pateiktas skaitinis modelis gali būti toliau tobulinamas siekiant jo lankstumo ir pritaikomumo kitų veikimo schemų šilumos siurbliams.

Literatūra

- Amirad, Kumar, R., & Fung, A. (2017, November 15–16). Performance prediction of an air source heat pump water heater in Canadian conditions. In *AIRAH and IBPSA's Australasian Building Simulation 2017 Conference* (pp. 1–9), Melbourne.
- Chargui, R., & Sammouda, H. (2014). Modeling of a residential house coupled with a dual source heat pump using TRNSYS software. *Energy Conversion and Management*, 81, 384–399. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.040>
- Daugirdaitė, G., Streckienė, G. ir Kropas, T. (2021). Oro šaltinio šilumos siurblio veikimo parametrų tyrimas susidarant šerkšnui ant jo garintuvo. Iš *24-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminė konferencija „Pastatų energetika“* (pp. 11–17), Vilniaus Gedimino technikos universitetas. <https://doi.org/10.3846/pinzs.2021.02>
- Dongellini, M., Naldi, C., & Morini, G. L. (2015). Seasonal performance evaluation of electric air-to-water heat pump systems. *Applied Thermal Engineering*, 90, 1072–1081. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.026>
- Januševičius, K., Streckienė, G., Bielskus, J., & Martinaitis, V. (2016). Validation of unglazed transpired solar collector assisted air source heat pump simulation model. *Energy Procedia*, 95, 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.039>
- Januševičius, K., & Streckienė, G. (2015). Analysis of air-to-water heat pump in cold climate: comparison between experiment and simulation. *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 7(4), 468–474. <https://doi.org/10.3846/mla.2015.823>
- Kamel, R. S., & Fung, A. S. (2014). Modeling, simulation and feasibility analysis of residential BIPV/T+ASHP system in cold climate–Canada. *Energy and Buildings*, 82, 758–770. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.081>
- Lee, Y. B., & Ro, S. T. (2002). Frost formation on a vertical plate in simultaneously developing flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26(8), 939–945. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(02\)00216-9](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(02)00216-9)
- Ling, J., Tong, H., Xing, J., & Zhao, Y. (2020). Simulation and optimization of the operation strategy of ASHP heating system: A case study in Tianjin. *Energy and Buildings*, 226, 110349. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110349>
- Nawaz, K., Elatar, A., & Fricke, B. (2018). A critical literature review of defrost technologies for heat pumps and refrigeration systems. US Department of Energy (DOE). <https://doi.org/10.2172/1474464>
- St-Onge, G., Kummert, M., & Kegel, M. (2018, May 9–10). Variable capacity mini-split air source heat pump model for

- TRNSYS. In *Proceedings of ESIM 2018, the 10th Conference of IBPSA Canada* (pp. 40–49), Montreal (QC), Canada.
- Wang, Z., Song, M., Wang, F., Ma, Z., & Lin, Q. (2018). Experimental investigation and seasonal performance assessment of a frost-free ASHP system with radiant floor heating. *Energy and Buildings*, 179, 200–212.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.019>
- Wu, Y., Wang, W., Sun, Y., Cui, Y., Lin, Y., & Deng, S. (2021). Development of evaluation indexes for assessing the regional operating performances of air source heat pump (ASHP) units operated in different climate regions based on the equivalent temperature drop method. *Energy and Buildings*, 247, 111111.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111111>
- Zhu, J. H., Sun, Y. Y., Wang, W., Deng, S. M., Ge, Y. J., & Li, L. T. (2015). Developing a new frosting map to guide defrosting control for air-source heat pump units. *Applied Thermal Engineering*, 90, 782–791.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.076>

OPERATION ANALYSIS OF THE AIR-SOURCE HEAT PUMP USING TRNSYS SIMULATION TOOL

G. Daugirdaitė, G. Streckienė, T. Kropas

Abstract

In order to achieve ambitious goals for energy efficiency and requirements for near zero energy buildings, various technological solutions enabling the use of renewable energy are proposed and applied. One such rapidly spreading technology is heat pumps. However, the use of air-to-water heat pumps in countries where the cold season is cold and humid has unfavourable conditions for the operation of this equipment during the heating season. As a result, the performance efficiency of the equipment decreases. This article presents the simulation results of an air-to-water heat pump operation in Lithuania using the TRNSYS modelling tool; its nominal heating capacity is 6.55 kW. The model was calibrated using real data obtained at Vilnius Gediminas Technical University when measurements were performed under heat pump freezing conditions. The seasonal performance factor of the heat pump heating mode was determined during the calculation. Parametric analysis of the model was also performed, when sensitivity of the model to the initial climatic data was observed. Comparable results are obtained for Vilnius, Prague and London.

Keywords: experiment, simulation, air-source heat pump, seasonal performance factor (SPF), heating season, coefficient of performance (COP), TRNSYS.