

ŽEMATEMPERATŪRIO ŠILUMOS TIEKIMO TINKLO ŠILUMOS ŠALTINIŲ TERMODINAMINĖ ANALIZĖ

Jonas PAPINIGIS*, Juozas BIELSKUS

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Aplinkos inžinerijos fakultetas,
Pastatų energetikos katedra, Saulėtekio al. 11, Vilnius, Lietuva
El. paštas jonas.papinigis@stud.vilniustech.lt

Gauta 2023 m. kovo 6 d.; priimta 2023 m. balandžio 3 d.

Santrauka. Padidėjęs šiuolaikinių pastatų energinis efektyvumas ir sumažėjęs šilumos poreikis leidžia keisti centralizuotose šilumos tiekimo tinkluose taikomus sprendimus ir diegti naujus. Šilumnešio temperatūrinio režimo mažinimas prisidėtų prie sistemos energinio efektyvumo padidėjimo, didinant šilumos gamybos efektyvumą, mažinant šilumos nuostolius į aplinką, ir leistų plačiau pritaikyti atsinaujinančius energijos išteklius. Straipsnyje pateikiami žematemperatūrio šilumos tiekimo tinklo teoriniai skaičiavimai, kai šilumą gamina skirtingi šilumos šaltiniai (šilumos siurblys ir biokuro katilas). Nustatyta, kad šilumos siurblio sistema yra eksergiškai efektyvesnė už biokuro katilo sistemą, kai šilumos siurblys ruošia žemų parametrų šilumnešį, o biokuro katilas – aukštą.

Reikšminiai žodžiai: žematemperatūriai šilumos tiekimo tinklai, šilumos siurblys, biokuro katilas, termodinaminė analizė.

Įvadas

Siekiant tvarios energijos gamybos ir vartojimo, svarbus procesų efektyvumo didinimas ir atsinaujinančios energetikos plėtra. 2014 m. Europos Taryba suformavo siekį Europos Sąjungoje (ES) iki 2030 m. sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų (toliau – ŠESD) emisiją 40 %, lyginant su 1990 m. Taip pat iki 2030 m. 27 % bendro galutinio suvartojamos energijos kiekio turi sudaryti atsinaujinantys energijos ištekliai (European Council, 2014). Šiems siekiams įgyvendinti Lietuvoje sudarytas nacionalinis energetikos ir klimato srities veiksmų planas (NECP) 2021–2030 metams. Atsižvelgiant į ES energetikos politikos uždavinius, siekiama skatinti atsinaujinančių energijos šaltinių ir energijos vartojimo efektyvumo didinimo plėtrą. Iki 2030 m. iš bendro galutinio suvartojamos energijos kiekio atsinaujinantys energijos ištekliai (toliau – AEI) turi sudaryti 45 %, transporto sektoriuje AEI dalis turi sudaryti 15 % galutinės suvartotos energijos kiekio, o iš centralizuoto šilumos tiekimo (toliau – CŠT) AEI dalis turi sudaryti 90 % (National energy and climate plans [NECP], 2020).

2014 m. duomenimis, 43 % visų pastatų šilumos poreikio pasaulyje yra patenkinama naudojant iškastinį kurą, o Europos Sąjungoje ši dalis sudaro 60 %. 41 %

pastatams reikalingos šilumos pagaminama naudojant gamtines dujas. To priežastis – didelis žmonių tankis miestuose, kuriuose stipriai išvystytas gamtinių dujų tiekimo tinklas. Tik 8 % viso pastatų šilumos poreikio pasaulyje yra aprūpinama centralizuotų šilumos tiekimo tinklų šiluma, o Europoje ši dalis yra 13 %. Tačiau kai kuriose Europos šalyse šiluma centralizuotais šilumos tinklais aprūpinama 50 % ir daugiau pastatų, pvz., Baltijos šalyse, Lenkijoje, Suomijoje ir kitur (Werner, 2017).

Siekiant tvaraus energijos vartojimo, svarbūs centralizuoti šilumos tiekimo tinklai. Pakeitus vietinį šildymą centralizuotu šilumos tiekimu, galima sumažinti suvartojamo kuro kiekį, ŠESD dujų taršą ir šilumos kainą. Šilumos siurblių energijos vartojimas, CO₂ emisija ir kaina yra panaši į centralizuotų šilumos tiekimo tinklų šilumos gamybą ir tiekimą. Dėl šios priežasties efektyviausias pastatų aprūpinimas šiluma Danijoje yra centralizuoto šilumos tiekimo tinklo praplėtimas, kad aprūpinamų pastatų dalis padidėtų nuo 46 % iki 63–70 %, o likę pastatai šiluma būtų aprūpinami vietiniais šilumos siurbliais. Taip pat centralizuoti šilumos tiekimo tinklai leidžia vartoti deginamų atliekų ir geoterminę šilumos energiją, taip prisidedant prie atsinaujinančių energijos išteklių integracijos į pastatų energetikos sektorių (Lund et al., 2010).

Norint apibūdinti energiškai efektyvų centralizuotą šilumos tiekimo tinklą, suformuota ketvirtos kartos centralizuoto šilumos tiekimo tinklo sąvoka. Svarbiausi šios kartos bruožai yra žematemperatūrio šilumnešio tiekimas (50–60 °C), maži tinklo šilumos nuostoliai ir atsinaujinančių energijos šaltinių integracija. Daugelyje šalių pastatų sektorius suvartoja didelę dalį energijos, todėl labai svarbu statyti mažai energijos vartojančius pastatus. Tvarūs pastatai prisidėtų prie išmetamo CO₂ mažinimo ir iškastinio kuro naudojimo aprūpinant šiluma pastatus vietiniais ir centralizuotais tinklais. Žemos šilumnešio temperatūros padidintų kogeneracinių jėginių ir šilumos siurblių efektyvumą, taip pat būtų sumažinti tinklų šilumos nuostoliai. Gerai izoluoti pastatai reikalautų mažesnės momentinės šiluminės galios, todėl galima būtų žeminti šilumnešio temperatūrinį režimą, o naujai tiesiamuose ruožuose sumažėtų centralizuotų šilumos tiekimo tinklų maksimalus momentinis debitas, todėl galima mažinti tinklų vamzdžių skersmenis (Lund et al., 2014).

Žemos šilumnešio temperatūros reikalauja didesnių investicijų į pastatų izoliaciją ir esamų tinklų renovaciją, t. y. į pritaikymą žemos temperatūros šilumnešiui, tačiau ketvirtos kartos CŠT tinklų nuostoliai yra 11 % mažesni, lyginant su trečios kartos šilumos tiekimo tinklais, taip pasiekiamas didesnis sistemų komponentų efektyvumas (Lund et al., 2018).

Darbo tikslas – nustatyti biokuro katilo ir šilumos siurblio termodinaminius efektyvumus, kai jie veikia žemos temperatūros šilumos tiekimo tinkle.

1. Tyrimo objektai

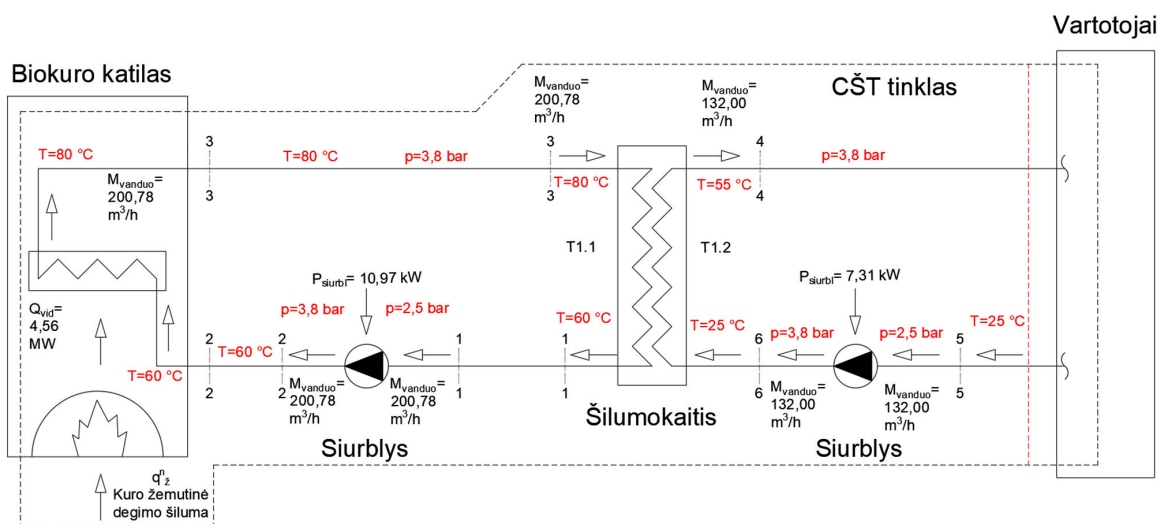
Pirmasis tyrimo objektas – Biržų miesto centralizuoto šilumos tiekimo tinklo „Biržų šiluma“ filialo 8-oji katilinė. Katilinės šilumos šaltinis yra biokuro katilas,

kurio galia yra 6,00 MW. Šilumos tinklo metiniai šilumos nuostoliai yra 16,9 %. Pastatai į centralizuoto šilumos tiekimo tinklus prijungti priklausomu būdu, t. y. nėra šilumos perdavimo tarpininko, pavyzdžiui, šilumokaičio, o šilumnešis, pratekęs per pastatuose įrengtus šildymo prietaisus, tiekiamas atgal į CŠT tinklą. Išimtis – karšto vandens ruošimas, kai karštas vanduo prijungiamas prie CŠT tinklo per šilumokaitį. Centralizuoto šilumos tiekimo tinklo temperatūrinis grafikas kinta nuo 60/40 °C tiekiamojo / grįžtamojo šilumnešio temperatūros, esant 10 °C lauko oro temperatūrai, iki 77/46 °C šilumnešio temperatūros, kai lauko oro temperatūra yra –24 °C.

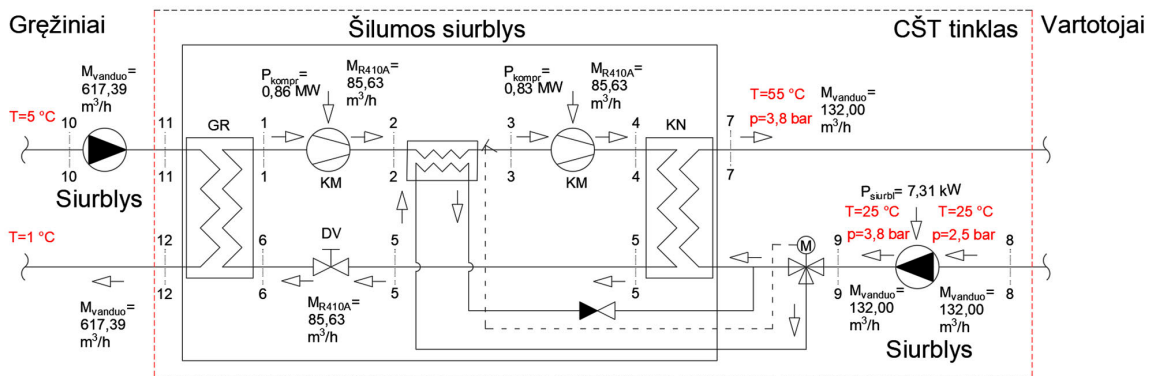
Esamos sistemos temperatūrinis grafikas pakeistas į ketvirtos kartos centralizuoto šilumos tiekimo tinklo temperatūrinį grafiką, t. y. kai vartotojams tiekiamo šilumnešio temperatūra yra 55 °C, o grįžtamojo šilumnešio temperatūra – 25 °C (1 pav.). Tariama, kad katilė deginamas kuras yra medienos granulės (Lund et al., 2014).

Antrasis tyrimo objektas – dvipakopis gruntinis šilumos siurblys, kurio darbinis agentas yra R410A freonas (2 pav.). Garintuve (GR) freonas yra perkaitinamas iki –1 °C. Tuomet pirmajame kompresoriuje (KM₁₋₂) atliekamas pirminis suspaudimas. Po pirmojo kompresoriaus darbinis agentas yra aušinamas su šilumnešiu, grįžtančiu iš CŠT tinklo, ir vėl spaudžiamas antrajame kompresoriuje.

Freonas tiekiamas į kondensatorių (KN), kuriame šiluma atiduodama į CŠT tinklą, o pratekęs droselinę vožtuvą, darbinis agentas grąžinamas į garintuvą. Apskaičiuotas šilumos siurblio efektyvumas (COP) yra 2,56, esant vidutinei Biržų miesto šildymo sezono lauko oro temperatūrai.



1 paveikslas. Ketvirtos kartos CŠT tinklo principinė schema su šilumos šaltiniu – biokuro katilu



2 paveikslas. Ketvirtos kartos CŠT tinklo principinė schema su šilumos šaltiniu – šilumos siurbliu

2. Tyrimo metodika

Eksergija – maksimalus darbas, kurį galima išgauti iš sistemos iki sistemos pasiekiant pusiausvyrą su aplinka. Šiluminė eksergija – tai didžiausias galimas gauti darbas iš šiluminės energijos iki nagrinėjamo objekto susilyginant su atskaitos tašku. Priklausomai nuo analizės pobūdžio ir nagrinėjamo objekto, skiriasi reikalingi atskaitos taško parametrai, naudojami skaičiuojant. Šie parametrai gali būti temperatūra, cheminė sudėtis, slėgis. Kadangi šiame straipsnyje nėra nagrinėjama fizikinių procesų cheminė sudėtis, atskaitos taškas yra aplinkos temperatūra (Gong & Werner, 2015). Eksergija apibūdina nukrypimą nuo atskaitos taško, todėl atskaitos taškas turi būti apibrėžtas. Pasirinkta Biržų miesto vidutinė šildymo sezono lauko oro temperatūra, kuri lygi $0,1^\circ\text{C}$ (Lietuvos Respublikos statybos ir urbanistikos ministerija, 1994).

Srauto eksergija E skaičiuojama taip:

$$E = M \cdot (h_1 - s_1 \cdot T_a) - M \cdot (h_2 - s_2 \cdot T_a) = M \cdot k_1 - M \cdot k_2, \text{ kW}, \quad (1)$$

čia E – eksergijos srautas, kW; M – masinis debitas, kg/s; h – srauto entalpija, kJ/kg; s – srauto entropija, kJ/(kg·K); T_a – aplinkos temperatūra (atskaitos taškas), K; k – srauto koentalpija, kJ/kg.

Entropija – tai negrįžtamumo matas, apibūdinantis termodinaminės sistemos negrįžtamumą kiekybiškai. Energija nuo eksergijos skiriasi tuo, kad energija negali būti sunaikinta, tik gali būti paversta kitos rūšies energija, o eksergija gali būti sunaikinta. Sunaikinta eksergija parodo energijos kokybės praradimą, neefektyviausias sistemos dalis ir efektyvumo didinimo potencialą. Eksergijos sunaikinimas yra proporcingas sukuriama entropijai proceso metu.

Sunaikinta eksergija L apskaičiuojama taip:

$$L = E^+ - E^-, \text{ kW}, \quad (2)$$

čia L – sunaikinta eksergija, kW; E^+ – įrenginį atiduotos eksergijos srautas, kW; E^- – įrenginio suteikiamas eksergijos srautas, kW.

Bendruoju atveju nagrinėjamo objekto ekserginis efektyvumas apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$\Psi = \frac{E^-}{\Sigma E^+}, \quad (3)$$

čia Ψ – ekserginis efektyvumas; E^+ – visų į įrenginį atiduotų eksergijos srautų suma, kW; E^- – įrenginio suteikiamų eksergijos srautų suma, kW.

Rezultatai patikrinami darant prielaidą, kad visų komponentų sunaikintos eksergijos sumos santykis su visų į įrenginį atiduotų eksergijos kiekių suma lygus 1. Rezultatai turi sutapti (Rijs & Mróz, 2019):

$$\Psi = 1 - \frac{\Sigma L}{\Sigma E^+}, \quad (4)$$

čia Ψ – ekserginis efektyvumas; E^+ – visų į įrenginį atiduotų eksergijos srautų suma, kW; L – visų komponentų sunaikintos eksergijos suma, kW.

Sausos biomasės kuro cheminė eksergija yra 1,3–7,8 % didesnė nei kuro aukštutinė degimo šiluma. Dėl šios priežasties, skaičiuojant eksergiją, kurią kuras atidavė katilui, imamas 4,7 % aukštutinės šilumos daugiklis (Song et al., 2011):

$$E_{kat}^+ = q_a^n \cdot e^{CH} \cdot M_{kuro}, \text{ kW}, \quad (5)$$

čia E_{kat}^+ – kuro suteikta eksergija katilui, kW; q_a^n – kuro aukštutinė degimo šiluma, kJ/kg; e^{CH} – kuro eksergijos ir aukštutinės degimo šilumos santykio koeficientas, 1,047; M_{kuro} – momentinis masinis kuro poreikis, kg/s.

Vertinant sistemos ekserginį efektyvumą, elektros energijai turi būti imamas pirminės energijos daugiklis. Ši perskaiciuota eksergija, vadinama pirminė eksergija (angl. *primary exergy*), leidžia tikslingai įvertinti sistemos ekserginį efektyvumą, nes įvertina elektros gamybą (Rijs & Mróz, 2019). Tariaama, kad elektros į eksergiją perskaiciavimo daugiklis lygus Lietuvos energijos gamybai naudojamų energijos šaltinių neatsinaujinančios pirminės energijos veiksnių pagal elektros įvairių gamybos būdų vidurkį ir yra lygus 2,3 (Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija, 2020).

Prielaidos:

- 1) nevertinami šilumokaičių šilumos nuostoliai, išskyrus biokuro katilo, kurie imti pagal realius duomenis;
- 2) savitoji specifinė vandens šiluma c_p nepriklauso nuo šilumnešio temperatūros ir yra fiksuotas dydis, lygus 4,1876 kJ/(kg·K);
- 3) siurblių efektyvumas imamas 65 %;
- 4) kompresorių izotropinis suspaudimo efektyvumas yra 68 % (Longhini, 2015);
- 5) nevertinamas biokuro katilo kuro ir oro tiekimo sistemų elektros poreikis.

3. Rezultatai

Šiame skyriuje pateikiami dviejų skirtingų šilumos gamybos ekserginio vertinimo skaičiavimo rezultatai projektinėmis sąlygomis.

1 lentelėje pateikiamas kietojo kuro katilinės sistemos slėgis, temperatūra, tankis, entalpija, entropija ir koentalpija nagrinėjamuose taškuose bei kiekvieno sistemos komponento ekserginių skaičiavimų rezultatai.

Į biokuro katilą tiekiamo šilumnešio temperatūra yra 60 °C ir aukštesnė, kad katilo degimo kamera nebūtų gėsinama įtekančio šalto šilumnešio ir sumažėtų katilo efektyvumas. Dėl šios priežasties žemos temperatūros šilumos tiekimo tinkluose reikalingas pamaišymo mazgas arba temperatūrinio režimo žeminimo šilumokaitis, kuris atskirtų katilo ir šilumos tiekimo tinklų kontūrus. Tuomet biokuro katilas gali būti eksploatuojamas optimaliu temperatūrinio režimu, o į vartotojų pusę gali būti tiekiamas žemos temperatūros šilumnešis. Pasirinkta

temperatūrinį žeminimą atlikti per šilumokaitį pagal kitų mokslininkų rekomendacijas (Ziemele et al., 2021; Østergaard et al., 2022; Li et al., 2022).

3 paveiksle pateikiami katilo pagrindinių komponentų ekserginiai efektyvumai.

Iš 3 paveikslu matyti, kad aukščiausias ekserginis efektyvumas pasiektas temperatūrinio režimo žeminimo šilumokaityje ir yra 61,3 %. To priežastis – šilumokaičio paskirtis. Šiame šilumokaityje žeminama šilumnešio temperatūra, kuri tiekama vartotojams, todėl mažėja temperatūrų skirtumas tarp šilumnešio ir aplinkos, gaminama entropija, sunaikinama eksergija, o šilumnešio nauda sumažėja.

Žemiausias ekserginis efektyvumas yra biokuro katile ir sudaro 13,9 %. To priežastis – deginamas aukštą energinį potencialą turintis kuras (medienos granulės), kuris paverčiamas į žemos ekserginės vertės šilumą – 80 °C temperatūros šilumnešį. Žemas katilo energinis efektyvumas, lygus 82,5 %, yra dėl šilumos nuostolių su degimo produktais, išeinančiais į aplinką, dėl nevisiško cheminio kuro degimo, nevisiško mechaninio kuro degimo, šilumos nuostolių į aplinką ir su fizine šlako šiluma.

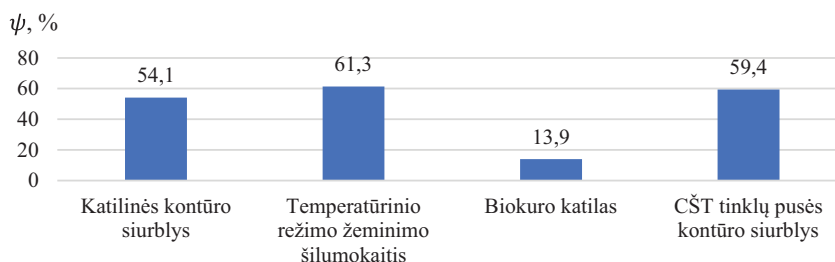
2 lentelėje pateikiami šie fiziniai parametrai: šilumos siurblio sistemos slėgis, temperatūra, tankis, entalpija, entropija ir koentalpija nagrinėjamuose taškuose bei kiekvieno sistemos komponento ekserginių skaičiavimų rezultatai.

Iš 2 lentelės matyti, kad šilumos siurblys turi daugiau analizuojamų taškų nei kietojo kuro katilas, o jį sudaro daugiau komponentų lyginant su katilu. Šilumos siurblio sistema turi tris pagrindinius kontūrus (2 pav.):

- 1) šilumos siurblio vidinis kontūras (1–6 taškai);

1 lentelė. Biokuro katilo sistemos (1 pav.) fiziniai parametrai

Taškai	Slėgis p , bar	Temperatūra t , °C	Tankis ρ , kg/m ³	Entalpija h , kJ/kg	Entropija s , kJ/(kg·K)	Koentalpija k , kJ/kg
1	2,5	60	983,43	251,31	0,83	24,21
2	3,8	60	983,59	251,42	0,83	24,32
3	3,8	80	972,31	335,19	1,08	41,37
4	2,5	55	985,92	230,40	0,77	20,60
5	2,5	25	997,17	105,04	0,37	4,71
6	3,8	25	997,27	105,16	0,37	4,82



3 paveikslas. Biokuro katilo sistemos komponentų ekserginiai efektyvumai

2 lentelė. Šilumos siurblio sistemos (2 pav.) fiziniai parametrai

Taškai	Slėgis p , bar	Temperatūra t , °C	Tankis ρ , kg/m ³	Entalpija h , kJ/kg	Entropija s , kJ/(kg·K)	Koentalpija k , kJ/kg
1	7,01	0,00	–	424,10	1,83	–76,79
2	16,40	51,93	–	459,03	1,87	–51,40
3	16,40	30,00	–	432,82	1,78	–54,79
4	38,34	86,47	–	466,31	1,81	–29,50
5	38,34	59,91	–	308,13	1,34	–59,34
6	7,01	-4,05	–	308,13	1,40	–75,02
7	2,50	55,00	985,92	230,40	0,77	20,60
8	2,50	25,00	997,17	105,04	0,37	4,71
9	3,80	25,00	997,27	105,16	0,37	4,82
10	2,50	5,00	1000,05	21,24	0,08	0,41
11	3,80	5,00	1000,12	21,36	0,08	0,53
12	3,80	1,00	1000,05	4,470	0,02	0,30

2) CŠT tinklo kontūras (7–9 taškai);

3) gręžinių pusės kontūras (10–12).

Šilumos siurblys šilumą gauna iš vertikalų 100 m gręžinių. Iš grunto grįžtančio šilumnešio temperatūra yra 5 °C, nes vidutinė grunto temperatūra 10–100 m gylyje yra 7 °C, o tarp vamzdžių ir grunto vertinamas 2 °C skirtumas (Giedraitienė ir Pūtys, 2012). Į CŠT tinklą tiekiamo šilumnešio parametrai yra tokie patys kaip ir biokuro katilo sistemos atveju.

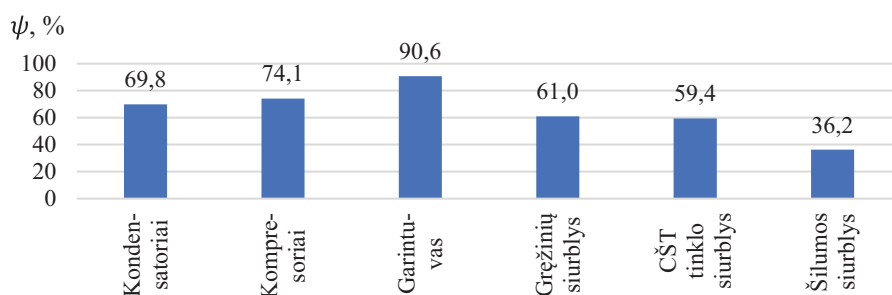
4 paveiksle pateikiami šilumos siurblio sistemos pagrindinių komponentų ekserginiai efektyvumai.

Iš 4 paveikslą matyti, kad aukščiausias ekserginis efektyvumas pasiektas šilumos siurblio garintuve. To priežastis – žemos garintuvų šildančio šilumnešio temperatūros, atitekančio iš gręžinių ir garintuvo ruošiamo šilumnešio parametrai. Dėl šios priežasties temperatūros

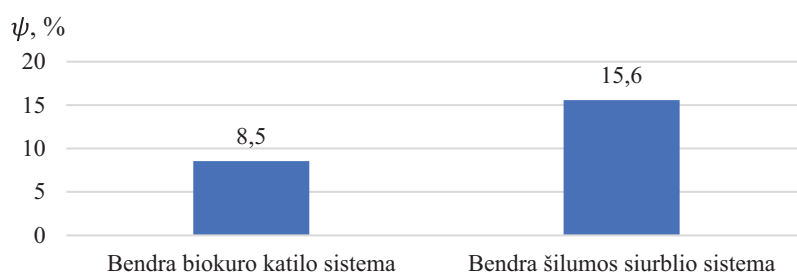
skirtumas tarp šilumnešių ir aplinkos yra mažas (iki 5 °C), todėl pagaminama mažai entropijos, sunaikinama mažai eksergijos, o sistemos komponento ekserginis efektyvumas yra aukštas.

Šilumos siurblyje naudojamas dviejų pakopų suspaudimas, t. y. spaudimo funkciją atlieka du nuosekliai sujungti kompresoriai, kuriuos skiria tarpinis šilumokaitis. Šis šilumokaitis atlieka darbinio agento vėsinimo funkciją, kad į antrąjį kompresorių įtekantis šilumnešis būtų žemos temperatūros ir kompresorius veiktų efektyviai. Šilumokaityje šiluma atiduodama iš šilumos tinklų grįžtančiam šilumnešiui. Kompresorių bendras ekserginis efektyvumas yra 74,1 %.

Bendras biokuro katilo sistemos ir šilumos siurblio sistemos pirminis ekserginis efektyvumas palygintas 5 paveiksle.



4 paveikslas. Šilumos siurblio sistemos komponentų ekserginiai efektyvumai



5 paveikslas. Biokuro katilo ir šilumos siurblio sistemų pirminis ekserginis efektyvumas

5 paveiksle matoma, kad bendras šilumos siurblio sistemos pirminis ekserginis efektyvumas yra 15,56 %, o biokuro katilo – 8,53 %. To priežastis – biokuro katile deginamas aukštą ekserginę vertę turintis kuras (liepsna įkaista daugiau nei 700 °C), kuris naudojamas žemos ekserginės vertės šilumai (55/25 °C šilumnešiu) gaminti. Šilumos siurblio atveju naudojama žemos ekserginės vertės geoterminė žemės šiluma (5/1 °C šilumnešis), kuri paverčiama į aukštesnę ekserginę vertę turinčią šilumą (55/25 °C). Nors šilumos siurblyje naudojama aukštos ekserginės vertės elektra, šilumos siurblio energinio efektyvumo koeficientas COP yra 2,56, todėl šilumos siurblio sistemos ekserginis efektyvumas yra aukštesnis už biokuro katilo sistemą. Kadangi šilumos sistemoje yra daug įvairaus efektyvumo komponentų, bendros sistemos efektyvumas yra 15,6 %, kai atskirų komponentų efektyvumas yra 59,4–90,6 %. Atsižvelgus į pirmiau pateiktus paveikslus galima teigti, kad projektinėmis sąlygomis šilumos siurblio sistema yra efektyvesnė ir sėkmingiau gali būti pritaikyta žemos temperatūros šilumos tiekimo tinklams nei su biokuro katilais.

Išvados

1. Nustatytas biokuro katilo sistemos ir jos komponentų ekserginis efektyvumas. Aukščiausias ekserginis efektyvumas pasiektas temperatūros režimo žeminimo šilumokaityje ir yra 61,3 %. Žemiausias ekserginis efektyvumas pasiektas biokuro katile ir yra 13,9 %, nes katile, deginant aukštos ekserginės vertės kurą, gaminama žemos ekserginės vertės šiluma. Biokuro katilo sistemos efektyvumas yra 8,5 %.
2. Apskaičiuotas šilumos siurblio sistemos ir jos komponentų ekserginis efektyvumas rodo, kad didžiausias pasiektas efektyvumas yra garintuve (90,6 %), žemiausias – temperatūrinio režimo žeminimo šilumokaityje (59,4 %), o bendras šilumos siurblio ekserginis efektyvumas projektinėmis sąlygomis yra 36,2 %, šilumos siurblio sistemos – 15,6 %.
3. Projektinėmis sąlygomis šilumos siurblio sistema yra efektyvesnė už biokuro katilo sistemą, todėl žemos temperatūros tinkluose šilumos siurblio taikymas šilumos gamybai termodinaminio požiūriu yra naudingesnis.

Literatūra

European Council. (2014). *EUCO 169/14. 2030 climate and energy policy framework*. <https://www.consilium.europa.eu/media/24561/145397.pdf>

Giedraitienė, J. ir Pūtys, P. (2012). *Požeminio vandens aktyviosios apytakos zonos hidrogeotermija*. Lietuvos geologijos tarnyba prie Aplinkos ministerijos.

Gong, M., & Werner, S. (2015). Exergy analysis of network temperature levels in Swedish and Danish district heating systems. *Renewable Energy*, 84, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.001>

Li, Y., Wang, L., Xu, K., Zhang, S., Zheng, H., & Dong, X. (2022). Optimization study of a novel district heating system based on large temperature-difference heat exchange. *Energy Conversion and Management*, 258, 115517. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115517>

Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. (2020). Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas (STR 2.01.02:2016). *TAR*, 2016-12-01, Nr. 27896.

Lietuvos Respublikos statybos ir urbanistikos ministerija. (1994). Statybinė klimatologija (RSN 156-94). *Valstybės žinios*, 1994-03-30, Nr. 24-394.

Longhini, M. (2015). *Next generation of refrigerants for residential heat pump systems* [Thesis to obtain the Master of Science Degree]. Tecnico Lisboa.

Lund, H., Moller, B., Mathiesen, B. V., & Dyrelund, A. (2010). The role of district heating in future renewable energy systems. *Energy*, 35(3), 1381–1390. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.11.023>

Lund, H., Østergaard, P. A., Chang, M., Werner, S., Svendsen, S., Sorknæs, P., Thorsen, E. J., Hvelplund, F., Mortensen, B. O. G., Mathiesen, B. V., Bojesen, C., Duic, N., Zhang, X., & Möller, B. (2018). The status of 4th generation district heating: Research and results. *Energy*, 164, 147–159. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.206>

Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, E. J., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. V. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, 68, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>

National energy and climate plans. (2020). *National energy and climate action plan of the Republic of Lithuania for 2021–2030*. NECP. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022-08/lt_final_necp_main_en.pdf

Østergaard, D. S., Smith, K. M., Tunzi, M., & Svendsen, S. (2022). Low-temperature operation of heating systems to enable 4th generation district heating: A review. *Energy*, 248, 123529. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123529>

Rijs, A., & Mróz, T. (2019). Exergy evaluation of a heat supply system with vapor compression heat pumps. *Energies*, 12(6), 1028. <https://doi.org/10.3390/en12061028>

Song, G., Shen, L., & Xiao, J. (2011). Estimating specific chemical exergy of biomass from basic analysis data. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(16), 9758–9766. <https://doi.org/10.1021/ie200534n>

Werner, S. (2017). International review of district heating and cooling. *Energy*, 137, 617–631. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.045>

Ziemele, J., Talcis, N., Osis, U., & Dace, E. (2021). A methodology for selecting a sustainable development strategy for connecting low heat density consumers to a district heating system by cascading of heat carriers. *Energy*, 230, 120776. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120776>

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF LOW-TEMPERATURE DISTRICT HEATING NETWORK HEAT SOURCE

J. PAPINIGIS, J. BIELSKUS

Abstract. Modern buildings have increased energy efficiencies in decreased heat demand, which enables implementation of new and change of current district heating solutions. Heat carrier can have positive effect on system energy efficiency, by improving heat generation efficiency, decreasing heat losses to surroundings and broader implementation of renewable energy sources. In this paper, theoretical district heating network thermodynamic calculations are performed in order to determine exergy efficiencies of heating networks when heating function is carried out by different heat sources – biofuel boiler and geothermal heat pump. It was determined that heat pump system has higher exergy efficiency than boiler system when low temperature heat carrier is prepared.

Keywords: low-temperature district heating, heat pump, bio-fuel boiler, thermodynamic analysis.