

Environmental engineering Aplinkos inžinerija

NEVALYTŲ NUOTEKŲ ŠILUMOS ATGAVIMO ANALIZĖ TRNSYS MODELIAVIMO APLINKOJE

Genadij GERASIMOVICH , Kęstutis ČIUPRINSKAS , Rūta MIKUČIONIENĖ 

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

- gauta 2026 m. balandžio 28 d.
- priimta 2026 m. birželio 1 d.

Santrauka. Analizuojamas šiluminės energijos išgavimo iš nuotekų potencialas Vilniaus miesto klimato sąlygomis taikant TRNSYS modeliavimo priemonę. Straipsnyje nagrinėjama, kiek šilumos galima atgauti iš buitinių nuotekų bei kokių mastu ši energija gali būti veiksmingai panaudota, prisidedant prie energinio efektyvumo didinimo ir tvirtų sprendimų įgyvendinimo. Skaitmeninis modelis buvo kalibruotas naudojant realius duomenis, gautus viešosios paskirties objekte atlikus eksperimentinius matavimus esant įvairioms klimato ir energijos suvartojimo sąlygoms. Modeliuojant atlikta parametrinė analizė, leidžianti įvertinti pradinių klimato duomenų įtaką gautiems rezultatams ir modelio jautrumą šiems veiksniams.

Reikšminiai žodžiai: modeliavimas, atsinaujinantis energijos ištekliai, energija, šilumos siurblys, nuotakynas, pastato nuotekų šuliny, TRNSYS.

✉ Autorius susirašinėti. El. paštas ruta.mikucioniene@vilniustech.lt

1. Įvadas

Energija yra būtina kasdieniam gyvenimui visame pasaulyje. Nepaisant to, ji negali būti vartojama be tam tikrų apribojimų, atsižvelgiant į senkančių išteklių ir teršiamos aplinkos pobūdį. Kol klimato kaitos sustabdyti negalima, ją galima sulėtinti. Vartojant energiją iš atsinaujinančių šaltinių, mažėja oro, vandens ir dirvožemio tarša, o tai tiesiogiai gerina žmonių sveikatą ir gamtinę aplinką (Pang et al., 2024). Siekiant išvengti blogiausių klimato kaitos pasekmių, iki 2050 m. ar anksčiau reikia pasiekti nulinį anglies dvideginio išmetimo kiekį (Soni et al., 2025). Tai reiškia, kad į atmosferą turėtų būti išmetama ne daugiau anglies dvideginio, nei pašalinama. Klimato kaitą skatina šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimas, o ne energijos vartojimas. Naudojant atsinaujinančius energijos šaltinius mažėja šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos, kurios prisideda prie visuotinio atšilimo ir ekstremalių klimato reiškinių (lungman et al., 2024). Miestai vandenį, energiją, produktus ir žaliavas gauna iš įvairių šaltinių ir išskiria kitus produktus: atliekas, nuotekas, išmetamąsias dujas ir atliekinę šilumą. Šios atliekos dažnai patenka tiesiai į aplinką. Šis procesas vadinamas „miesto metabolizmu“ dėl jo panašumo į gyvo organizmo metabolizmą (Kennedy et al., 2007). Norint sumažinti mieste vykdomos veiklos poveikį aplinkai, reikia optimizuoti miesto „medžiagų apykaitos“ struktūrą. Viena šios struktūros dedamųjų yra atliekinė šiluma.

Šilumos siurbliai ir šilumokaičiai leidžia atgauti šilumą iš buitinių nuotekų ir atliekų, o efektyvus tokių neišnaudotų energijos šaltinių naudojimas ne tik sumažina poveikį aplinkai, bet ir leidžia efektyviau panaudoti išteklius bei energiją (Zhang et al., 2023). Ankstesni tyrimai rodo, kad komunalinės nuotekos, kurioms būdinga 14–22 °C temperatūra įtekėjimo į nuotekų miesto valymo įrenginius vietoje (Bogdan & Čiuprinskas, 2022) ir aukštesnė nei 35–40 °C buitiniuose įtekėjimo iš viešosios paskirties objekto vietoje (Gerasimovič ir Čiuprinskas, 2025), yra svarbus šiluminės energijos šaltinis. Šilumos atgavimo iš buitinių nuotekų sistemos įgyvendinimo galimybių tyrime reikia atsižvelgti į kelis aspektus: potencialų šiluminį pajėgumą (priklausomai nuo nuotekų temperatūros ir srauto nagrinėjamoje teritorijoje, nuo klimato sąlygų ir nuotakyno charakteristikų), naudotojus, kurie galėtų būti prijungti (ypač jų atstumą nuo šilumos šaltinio), statybą, eksploatavimą, priežiūrą, paskirstymą ir šilumos vartojimą. Taip pat reikėtų atsižvelgti į išlaidas, susijusias su aplinkosaugos aspektais (Cipolla & Maglionico, 2014).

Nuotekų šilumos atgavimas yra atsinaujinančiosios energijos plėtros srityje palyginti nauja koncepcija, kuria siekiama maksimaliai padidinti pastatų šilumos energijos panaudojimo potencialą. Tačiau nuotekų šilumos savybės ir panaudojimo galimybės turi būti ne tik ištirtos, bet ir sumodeliuotos skaitmeninės įrangos aplinkoje (Chen et al., 2022). Buitinių nuotekų šilumos atgavimo skaitmeninis modeliavimas leidžia įvertinti realų potencialą, parinkti

efektyviausius sprendimus, sumažinti klaidų riziką, pagerinti energetinį naudingumą ir sumažinti eksploatacines bei aplinkos išteklių sąnaudas (Brough et al., 2021). Analizuojant ir parenkant energetines sistemas, be eksperimentinių tyrimų, vis dažniau taikomi kompiuteriniai modeliai. Šie modeliai leidžia imituoti įvairius sistemų veikimo režimus, tirti jų efektyvumą ir optimizuoti techninius parametrus. Siekiant, kad sistemos energetinis modelis būtų kuo tikslus, būtina surinkti išsamius duomenis apie jo veikimą ir kartais įvertinti trūkstamą informaciją (Streckienė et al., 2018). Kompiuterinis modeliavimas suteikia galimybę įvertinti platesnį derinių spektrą, nei tai būtų įmanoma vien eksperimentiniais metodais. Mokslininkai pabrėžia, kad šiuo metu pastebimas didėjantis tikslų ir išsamių modelių, kurie galėtų tiksliai atspindėti realias eksploatacijos sąlygas, poreikis. Tokie modeliai padeda sumažinti projektavimo riziką, laiko sąnaudas ir išlaidas, susijusias su bandomaisiais tyrimais. Be to, jie sudaro sąlygas lyginti alternatyvius sprendinius dar planavimo etape. Visa tai rodo, kad kompiuterinis modeliavimas tampa neatsiejama šiuolaikinio energetinių sistemų projektavimo ir tyrimų dalimi (Daugirdaitė et al., 2021).

Šio straipsnio tikslas – pateikti sudaryto nevalytų nuotekų šilumos atgavimo modelio rezultatus taikant TRNSYS programą, kai nagrinėjamas modelis kalibruojamas naudojant eksperimentinius duomenis ir atsižvelgiama į aplinkos klimato parametrus bei šilumos energijos poreikius. Remiantis tyrimo rezultatais galima atlikti kompleksinę pastato šilumos poreikio analizę, nustatyti šilumos atgavimo iš esamų šilumos srautų potencialą ir įvertinti jų praktinį panaudojimą. Tai leidžia optimizuoti energijos vartojimą, sumažinti papildomų energijos šaltinių poreikį ir prisidėti prie pastato energetinio efektyvumo didinimo bei tvarios infrastruktūros kūrimo.

2. Tyrimo objektas ir TRNSYS modelio formavimas

Tiriamajam darbui pasirinktas 1992 m. statybos 2009 m. renovuotas trijų aukštų viešosios paskirties pastatas – Baltijos ir Amerikos klinika, esanti Nemenčinės plente 54A, Vilniuje (žr. 1 paveikslą). Pastate veikia ambulatorinės sveikatos priežiūros funkcijas atliekanti klinika, papildomai įrengta kavinė, teikianti maitinimo paslaugas pacientams. Taip pat pastate veikia skalbykla, kuri tenkina klinikos poreikius ir užtikrina paslaugų atitiktį visoms reikalingoms higienos normoms. Analizuojamo pastato bendras plotas yra 3250 m², o tūris – apie 8500 m³. Trys pastato aukštai suplanuoti taip, kad galima aiškiai atskirti gydomąsias, aptarnavimo ir technines zonas. Kavinės ir skalbyklos buvimas turi įtakos pastato inžinerinėms sistemoms, ypač buitinių nuotekų sistemos temperatūrai, srautui ir apkrovai.

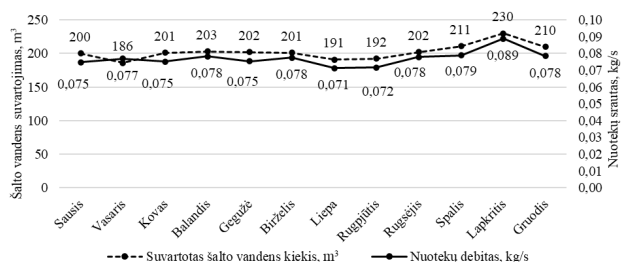
Tiriamąjį objektą nevalytų nuotekų stebėjimo ir apskaičiuoti duomenys rodo, kad analizuojamos technologijos leidžia efektyviai ir patikimai atgauti šilumą iš nuotekų. Vykdytų eksperimentų metu (2024–2025 m.) nustatyta, kad vidutinė metinė iš pastato šalinamų buitinių nuotekų



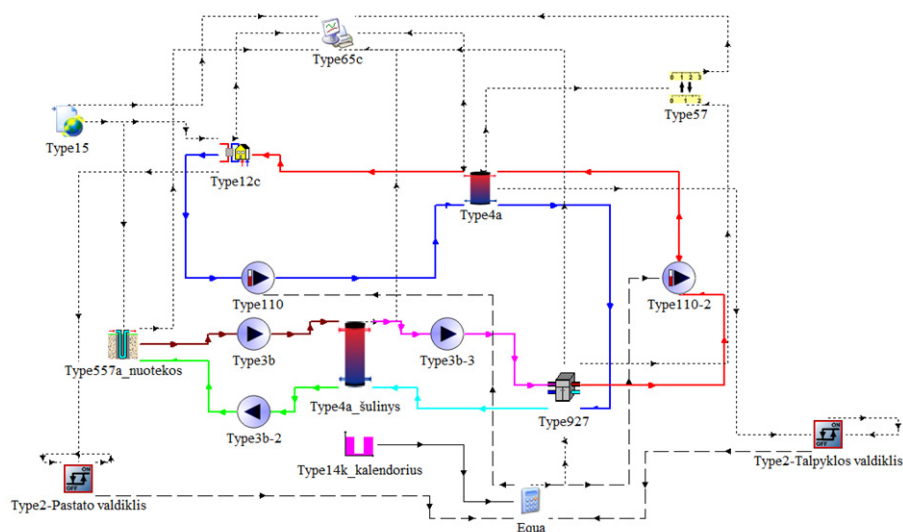
1 paveikslas. Baltijos ir Amerikos klinikos pastatas (Baltijos Amerikos klinika, 2004)

temperatūra yra apie 36,5 °C ir beveik nepriklauso nuo aplinkos (lauko oro) temperatūros svyravimų. Tiriamuoju laikotarpiu nustatytas vidutinis buitinių nuotekų srautas yra apie 0,077 [kg/s] (žr. 2 paveikslą), darant prielaidą, kad buitinių nuotekų tankis prilygsta vandens tankiui. Atliekinei šilumai atgauti panaudota šilumos siurblio su R410A šaltio agentu ir šilumokaičio technologija (Gerasimovič ir Čiuprinskas, 2025).

Šiame tyrime skaitiniam modeliavimui atlikti, kaip pagrindiniam tyrimo metodui, buvo pasitelkta imitacinio modeliavimo programa TRNSYS (Transient System Simulation Tool, n.d.). Ši programa plačiai taikoma energijos sistemų, pastatų šildymo, vėdinimo, oro kondicionavimo bei atsinaujinančių energijos šaltinių procesams tirti ir optimizuoti. TRNSYS leidžia kurti modulinis, tarpusavyje susietus modelius, imituoti realias eksploatacines sąlygas ir vertinti įvairių parametru įtaką sistemos veikimui. Taikant TRNSYS galima atlikti ilgalaikes dinamines simuliacijas, modeliuoti sezoninius svyravimus, analizuoti energijos vartojimo efektyvumą ir kurti alternatyvius sistemos sprendinius. Taigi ši programa leido sumažinti eksperimentinių tyrimų apimtį, greičiau įvertinti įvairius scenarijus ir pasirinkti optimalią šilumos atgavimo iš nuotekų sistemos konfigūraciją (Adeşanya et al., 2022). Atliekant tyrimą buvo modeliuojama šilumos energijos atgavimo iš buitinių nuotekų sistema, siekiant įvertinti jos energinį efektyvumą, galimybę sutaupyti ir įtaką bendram pastato energijos poreikiui. Suformuotas skaitmeninis modelis kalibruojamas naudojant eksperimentinius duomenis, atsižvelgiama į aplinkos klimato parametrus bei apskaičiuotus šilumos energijos po-



2 paveikslas. Pastato šalto vandens suvartojimas ir nuotekų srautas



3 paveikslas. Nevalytų nuotekų šilumos atgavimo sistemos TRNSYS modelio schema

reikius. Trečiame paveiksle pateiktas sugeneruoto modelio vaizdas TRNSYS modeliavimo aplinkoje.

TRNSYS modelio pagrindiniai komponentai yra šie: vandens šaltinio („vanduo-vanduo“) šilumos siurblys (Type927), kurio apskaičiuota šildymo galia yra 11,58 kW, elektrinė galia –2,23 kW; klimatinį duomenų įvesties komponentas (Type15), įgalinantis išnagrinėti sistemos veikimą viso šildymo sezono metu naudojant Vilniaus miesto klimato kintamųjų valandinių duomenų bazę TMY (liet. Tipiniai meteorologiniai metai) formatu; vienetų perskaičiavimo komponentas (Type57), naudojamas įrenginių galios matavimo vienetams konvertuoti; empirinės priklausomybės blokas (TypeEqua), leidžiantis modeliavimo metu aprašyti pasirinktą matematinę išraišką (algebrines lygtis, funkcijas, sąlygas), kurios nėra pateiktos standartinuose TRNSYS komponentuose; išvesties duomenų spausdintuvas (Type65c), išvedantis lauko oro, patalpos, akumuliacinės talpos, šulinio buitinių nuotekų vidutinės temperatūros vertes; šildymo sezono trukmė (Type14k_kalendorius) leidžia nustatyti šildymo sezono laikotarpį nuo spalio 1 d. iki gegužės 1 d.; šilumos energijos vartotojo valdiklis (Type2-Pastato valdiklis), nustatytas taip, kad būtų galima palaikyti 22 °C laipsnių patalpos temperatūrą ir riboti patalpos vidaus temperatūros svyravimus iki ±1 °C nuo nustatytosios temperatūros; akumuliacinės talpos valdiklis (Type2-Talpyklos valdiklis), nustatytas taip, kad būtų palaikoma 70 °C laipsnių šilumos saugyklos temperatūra, ir leidžiantis jai svyruoti iki ±5 °C siunčiant įjungimo arba išjungimo signalus cirkuliaciniams siurbliams; buitinių nuotekų temperatūros komponentas (Type557a_nuotekos), nustatantis 36,5 °C nuotakyno temperatūrą; cirkuliacinio siurblio blokas (Type3b), nustatantis 0,077 kg/s nevalytų nuotekų masinį srautą iš tiriamojo objekto; pastato nuotakyno siurblinės šulinio parametrų komponentas (Type4a_šulinys), nustatantis 113 W/K šulinio šilumos nuostolius esant 2,5 m³ minimaliam nuotekų tūriui; vartojimo kontūras (Type12c), aprašantis vartotojo šilumos nuostolius, kai

taikomi apskaičiuoti savitieji šilumos nuostoliai 138,7 W/K; akumuliacinės saugyklos komponentas (Type4a) pasirenkamas 500 l, užpildomas vandeniu, ir nustatomas saugyklos 0,368 W/m²K šilumos nuostolių koeficientas (esant aukščiausiai vandens temperatūrai talpoje 80 °C); cirkuliaciniai siurbliai (Type110, Type110_2) generuoja vandens ir kartu šilumos srautą kontūruose vartotojas-talpykla ir talpykla-šilumos siurblys.

Šilumos kiekis, išgaunamas iš nuotekų, apskaičiuojamas taikant šilumos perdavimo lygtį

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (1)$$

čia $\dot{Q}$ – atgaunamas šilumos srautas, kW; $\dot{m}$ – masinis nuotekų debitas kg/s; c_p – savitoji nuotekų šiluma, laikoma lygia 4,19 kJ/(kg·K); ΔT – nuotekų temperatūros pokytis dėl šilumos atgavimo °C.

Šilumos siurblio termodinaminio ciklo efektyvumas veikiant šildymo režimu (COP) analizuojamas pagal formulę

$$COP = \frac{Q_{KN}}{E_{KM}}, \quad (2)$$

čia Q_{KN} – šilumos siurblio kondensatoriaus atiduodamas šilumos srautas (šiluminė galia) kWh; E_{KM} – šilumos siurblio vartojama elektros galia kWh.

Modelio kalibravimo metu tiriamojo objekto buitinių nevalytų nuotekų temperatūra ir masinis srautas nustatytas iš eksperimentinių matavimų ir modeliuojamas 8760 valandoms vienos valandos laiko žingsniu.

Siekiant išvengti aukštų temperatūrų režimo įtakos bendram sistemos efektyvumo vertinimui karšto vandens ruošimas atliekant šį vertinimą nenagrinėjamas. Be to, karšto vandens poreikis stipriai priklauso nuo gyventojų skaičiaus, jų įpročių ir vartojimo režimo, todėl nėra tiesiogiai susijęs su pastato šiluminėmis savybėmis. Įtraukus karšto vandens ruošimą, rezultatai taptų priklausomesni nuo naudotojų elgsenos, o ne nuo pačios sistemos ar pastato charakteristikų.

3. Rezultatai

Skaiciavimuose naudotos Vilniaus miesto klimato sąlygos, išreikštos tipinių meteorologinių metų (TMY) duomenimis. Tiriomojo laikotarpio metu aplinkos oro temperatūros kitimas nuo sausio 1 d. iki gruodžio 31 d. pateiktas 4 paveiksle. Nagrinėjamu laikotarpiu aplinkos oro temperatūra svyravo nuo $-29,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $24,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, vidutinė oro temperatūra buvo $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

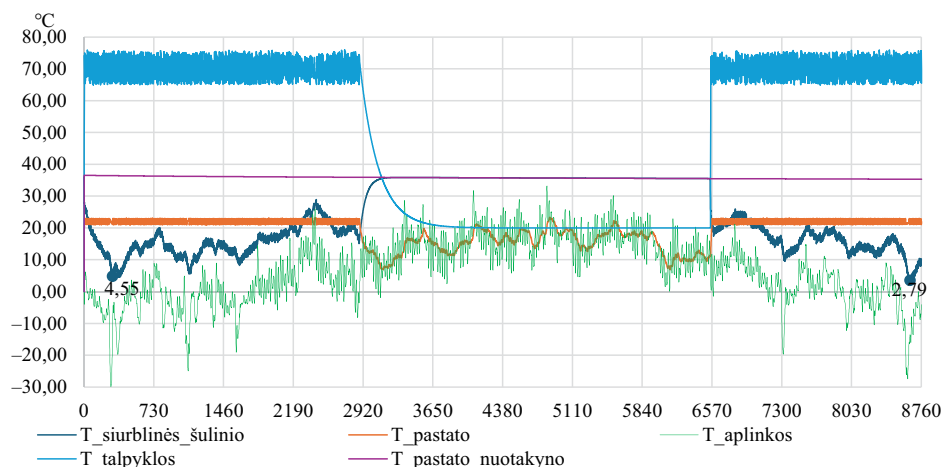
Iš pateikto modeliavimo rezultatų grafiko matyti, kad šildymo sezono metu pastato vidaus temperatūra ($T_{\text{namo Type12c}}$) išlieka pastovi, apie $21\text{--}23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Modelyje pastato temperatūros ryškesnis svyravimas paaiškinamas valdiklyje (*Type2-Pastato valdiklis*) nustatyta šios temperatūros svyravimo galimybe. Vasaros laikotarpiu, kai nuotekų šilumos atgavimas nevykdomas, pastato vidaus temperatūra nekontroliuojama. Akumuliacinės talpos ($T_{\text{talpykla Type4a}}$) temperatūros svyravimai pasiekė talpyklos valdiklio (*Type2-Talpyklos valdiklis*) nustatytus parametrus ir svyravo nuo $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tai rodo stabilų šilumos siurblio darbą (*Type927*) ir efektyvų šilumos atgavimą iš pastato nuotakyno viso šildymo sezono metu. Modeliuojant pastebėta, kad esant aplinkos oro kritinėms temperatūroms, kai lauko oro temperatūra nukrenta žemiau $-27,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, pastato vidaus temperatūra ($T_{\text{namo Type12c}}$) nemažėja ir atitinka nusta-

tytus parametrus, tačiau siurblinės šulinio nuotekų temperatūra ($T_{\text{siurblinės Type4a šulinys}}$) nukrenta iki $2,79\text{ }^{\circ}\text{C}$, artėdama prie užšalimo taško. Užšalant nuotekoms šilumos atgavimo procesas tampa neįmanomas.

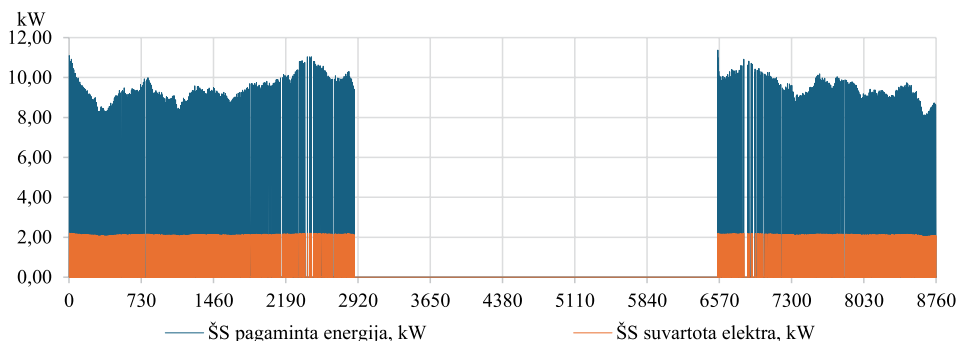
Tiriamuoju laikotarpiu šilumos siurblio momentinė šildymo galia svyravo nuo $11,58\text{ kW}$ iki $8,21\text{ kW}$ (5 paveikslas). Modeliavimo metu TRNSYS aplinkoje identifikuota, kad per šildymo sezoną šilumos siurblys pagamino $6,74\text{ MWh}$ šilumos energijos ir suvartojo $1,53\text{ MWh}$ elektros energijos.

Tyrimas atskleidė šilumos siurblio (*Type927*) šilumos galios priklausomybę nuo buitinių nuotekų temperatūros svyravimų siurblinėje ($T_{\text{talpyklos Type4a šulinys}}$). Mažėjant nuotekų temperatūrai dėl šilumos atgavimo mažėja šilumos siurblio šiluminė galia ir COP reikšmė.

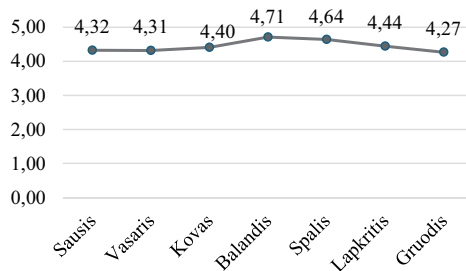
Remiantis modelio sugeneruotais duomenimis, nustatyta šilumos siurblio termodinaminio ciklo efektyvumo veikiant šildymo režimu (COP) vertė (6 paveikslas). Šeštame paveiksle vaizduojamas šilumos siurblio COP (*Coefficient of Performance*) kitimas šildymo sezono metu. Šis rodiklis parodo, kiek kartų šilumos siurblys pagamina daugiau šilumos energijos, nei suvartoja elektros energijos. Termodinaminio ciklo efektyvumas veikiant šildymo režimu net šaltuoju metų laiku išlieka gana aukštas. Tai leidžia efektyviai atgauti šilumą iš nuotakyno per visą šildymo sezoną ir nepriklausyti nuo lauko temperatūros. Palyginus apskaičiuotą



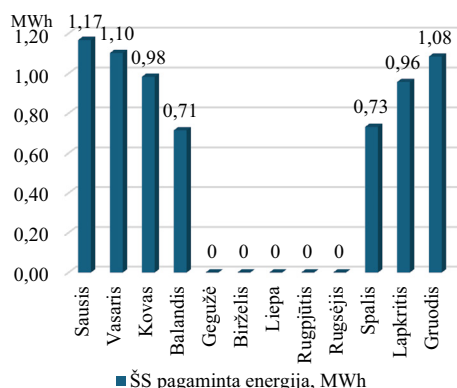
4 paveikslas. Šilumos atgavimo sistemos TRNSYS modeliavimo rezultatai



5 paveikslas. Šilumos siurblio energijos balanso grafikas TRNSYS modelyje



6 paveikslas. Šilumos siurblio termodinaminio ciklo efektyvumas veikiant šildymo režimu



7 paveikslas. Šilumos siurblio gaminamos energijos kiekiai

COP vertę 5,2 (Gerasimovič ir Čiuprinskas, 2025) su TRNSYS modeliavimo įranga gauta vertė, maksimalus nesutapimas sudarė 9,6 %. Palyginimas parodė, kad modelis gali būti toliau taikomas nevalytų nuotekų šilumos atgavimo tyrimams, nes apskaičiuotos vertės ir skaitmeninio modeliavimo rezultatų paklaida buvo mažesnė nei 10 %.

Šildymo sezono metu šilumos siurblio gaminamos energijos kiekiai nuo spalio 1 d. iki gegužės 1 d. pavaizduoti 7 paveiksle. Grafike energijos kiekiai apskaičiuojami sumuojant kiekvieno mėnesio energijos srautus.

Atsižvelgiant į tai, kad tiriamajam pastatui šildyti suvartojamos šilumos energijos poreikis yra 0,123 MWh/m² per metus ir šios skaitmeninės analizės modeliavimo metu atgautas iš nuotakyno, naudojant šilumos siurblių ir palaikant vartotojo komfortišką temperatūrą, neužšalantių buitinių nuotekų sugeneruotas šilumos kiekis yra 6,74 MWh per šildymo sezoną, nustatyta, jog, atgaunant šilumos energiją iš tiriamojo objekto buitinių nuotekų, galima palaikyti 21–23 °C komfortišką temperatūrą 54 m² tiriamojo objekto patalpoje.

4. Išvados

Išnagrinėjus TRNSYS modeliavimo programine įranga nevalytų nuotekų šilumos atgavimo rezultatus šildymo sezono metu, atsižvelgiant į aplinkos oro temperatūrą, nustatyta:

1. Atgaunant šilumos energiją iš tiriamojo objekto buitinių nuotekų galima palaikyti 21–23 °C komfortišką temperatūrą 54 m² tiriamojo objekto patalpoje.
2. Vilniaus miesto klimato sąlygomis šildymo sezono metu nuo spalio 1 d. iki gegužės 1 d. nustatyti šilumos siurblio termodinaminio ciklo efektyvumo veikiant šildymo režimu (COP) vertės svyravimai nuo 4,27 iki 4,71 ir sugeneruota 6,74 MWh šiluminės energijos suvartojant 1,53 MWh elektros energijos.
3. Išanalizuotas skaitinis modelis gali būti toliau tobulinamas siekiant jo efektyvumo ir pritaikomumo kitų veikimo schemų šilumai atgauti iš atliekinių energijos srautų.

Padėkos

Dėkoju Baltijos ir Amerikos klinikos administracijai už pagalbą rengiant straipsnį.

Literatūra

- Adesanya, M. A., Na, W. H., Rabiun, A., Ogunlowo, Q. O., Akpenpun, T. D., Rasheed, A., Yoon, Y. C., & Lee, H. W. (2022). TRNSYS simulation and experimental validation of internal temperature and heating demand in a glass greenhouse. *Sustainability*, 14(14), Article 8283. <https://doi.org/10.3390/su14148283>
- Baltijos Amerikos klinika. (2024). *Baltijos-Amerikos terapijos ir chirurgijos klinika*. https://bak.lt/?gad_source=1&gad_campaignid=20519023644&gclid=EALaIQobChMI9Y3Sg4CZjgMVCwuiAx1DqSVoEAAYASAAEgIVAvD_BwE
- Bogdan, D., & Čiuprinskas, K. (2022). Feasibility study of heat recovery from treated wastewater in wastewater treatment plant and use it in nearby object. *Mokslas – Lietuvos ateitis / Science Future of Lithuania*, 14, 1–5. <https://doi.org/10.3846/mla.2022.17237>
- Brough, D., Ramos, J., Delpech, B., & Jouhara, H. (2021). Development and validation of a TRNSYS type to simulate heat pipe heat exchangers in transient applications of waste heat recovery. *International Journal of Thermofluids*, 9, Article 100056. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100056>
- Chen, W. A., Lim, J., Miyata, S., & Akashi, Y. (2022). Methodology of evaluating the sewage heat utilization potential by modelling the urban sewage state prediction model. *Sustainable Cities and Society*, 80, Article 103751. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103751>
- Cipolla, S. S., & Maglionico, M. (2014). Heat recovery from urban wastewater: Analysis of the variability of flow rate and temperature. *Energy and Buildings*, 69, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.017>
- Daugirdaitė, G., Streckienė, G., & Kropas, T. (2021). Operation analysis of the air-source heat pump using TRNSYS simulation tool. *Mokslas – Lietuvos Ateitis / Science – Future of Lithuania*, 13, 1–6. <https://doi.org/10.3846/mla.2021.15266>
- Gerasimovič, G. ir Čiuprinskas, K. (2025). Nevalytų nuotekų šilumos atgavimo tyrimas. Iš *28-osios konferencijos „Darni aplinka“* (p. 165–170). Vilnius TECH. <https://doi.org/10.3846/da.2025.027>
- lungman, T., Khomenko, S., Barboza, E. P., Cirach, M., Gonçalves, K., Petrone, P., Erbertseder, T., Taubenböck, H., Chakraborty, T., & Nieuwenhuijsen, M. (2024). The impact of urban configuration types on urban heat islands, air pollution, CO₂ emissions,

- and mortality in Europe: A data science approach. *The Lancet Planetary Health*, 8(7), e489–e505.
[https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(24\)00120-7](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(24)00120-7)
- Kennedy, C., Cuddihy, J., & Engel-Yan, J. (2007). The changing metabolism of cities. *Journal of Industrial Ecology*, 11(2), 43–59.
<https://doi.org/10.1162/jie.2007.1107>
- Pang, L., Liu, L., Zhou, X., Hafeez, M., Ullah, S., & Sohail, M. T. (2024). How does natural resource depletion affect energy security risk? New insights from major energy-consuming countries. *Energy Strategy Reviews*, 54, Article 101460.
<https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101460>
- Soni, R., Dvivedi, A., & Kumar, P. (2025). Carbon neutrality in transportation: In the context of renewable sources. *International Journal of Sustainable Transportation*, 19(1), 1–15.
<https://doi.org/10.1080/15568318.2024.2447999>
- Streckienė, G., Motuzienė, V., Rimdžius, D., Martinaitis, V., & Bielskus, J. (2018). Simulation of annual functionality of roof turbine ventilator. *E3S Web of Conferences*, 64, Article 07002.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186407002>
- Transient System Simulation Tool. (n.d.). Retrieved December 3, 2025, from <https://www.trnsys.com/>
- Zhang, D., Fang, C., Gao, Z., Wang, X., Shen, C., & Li, H. (2023). Energy, environmental and economic assessment of wastewater heat recovery systems in hotel buildings. *Applied Thermal Engineering*, 222, Article 119949.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119949>

ANALYSIS OF RAW WASTEWATER HEAT RECOVERY IN THE TRNSYS MODELING ENVIRONMENT

Abstract. The potential for thermal energy recovery from wastewater in the climatic conditions of Vilnius city is analyzed using the TRNSYS modeling tool. The article examines how much heat can be recovered from domestic wastewater and to what extent this energy can be effectively used, contributing to increasing energy efficiency and implementing sustainable solutions. The numerical model was calibrated using real data obtained in a public facility, when experimental measurements were performed under various climatic and energy consumption conditions. Parametric analysis was performed during the modeling, allowing to assess the influence of the initial climatic data on the obtained results and the sensitivity of the model to these factors.

Keywords: modeling, renewable energy resources, energy, heat pump, sewage system, domestic sewage well, TRNSYS.