VILNIUS TECH
Vilniaus Gedimino technikos universitetas

28-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis" teminė konferencija
Proceedings of the 28th Conference for Junior Researchers "Science – Future of Lithuania"

DARNI APLINKA / SUSTAINABLE ENVIRONMENT

2025 m. balandžio 24 d., Vilnius, Lietuva
24 April 2025, Vilnius, Lithuania

ISSN 2029-7157 / eISSN 2029-7149
eISBN 978-609-476-390-8
https://doi.org/10.3846/da.2025.027

Pastatų energetika / Energy for Buildings

https://vilniustech.lt/346238

NEVALYTŲ NUOTEKŲ ŠILUMOS ATGAVIMO TYRIMAS

Genadij GERASIMOVIČ*, Kęstutis ČIUPRINSKAS*

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Aplinkos ižinerijos fakultetas, Pastatų energetikos katedra

**El. paštas *genadij.gerasimovic@stud.vilniustech.lt; *kestutis.ciuprinskas@vilniustech.lt*

Gauta 2025 m. vasario 24 d.; priimta 2025 m. kovo 17 d.

Santrauka. Iki šiol daugiau nei du trečdalius pasaulinės energijos poreikio patenkina neatsinaujinanti energija, gaunama iš gamtos išteklių. Tyrimai rodo, kad pasaulinio ir regioninio energetinio saugumo rizika didėja dėl gamtos išteklių išeikvojimo. Tuo pačiu metu pastatų modernizavimas atlieka pagrindinį vaidmenį mažinant energijos naudojimą ir poveikį aplinkai. Tyrime analizuojamas šiluminės energijos išgavimo iš nuotekų potencialas. Aptariami klausimai, susiję su aplinkosaugos, ekonominiais ir praktiniais suvaržymais, kaip realiai galima atgauti šią energiją, galimybės sumažinti anglies pėdsaką. Šiame straipsnyje nagrinėjama aprūpinimo energija alternatyva, kiek šilumos būtų galima atgauti iš nuotekų ir ar ši šiluma gali būti veiksmingai panaudota.

Reikšminiai žodžiai: atsinaujinantys energijos ištekliai, energija, šilumos siurblys, nuotakynas, vidaus nuotekų šulinys.

1. Įvadas

Pasaulyje, kuriame gamtos ištekliai yra riboti ir energijos poreikiai yra dideli, tampa vis svarbiau suprasti energijos ir išteklių naudojimą mažinančius mechanizmus ir kurti sistemingus metodus sistemoms tobulinti ir taip sumažinti poveikį aplinkai (Pang et al., 2024). Miestai išmeta maždaug 75 % viso pasaulio CO_2 emisijų, o tai labai prisideda prie visuotinio atšilimo intensyvėjimo ir tikimasi, kad iki 2050 m. pasaulio urbanizacijos lygis išaugs iki 68 % (Iungman et al., 2024). Didžiausia energijos poreikio dalis gyvenamuosiuose pastatuose atitenka pastatams šildyti, vėsinti ir karštam vandeniui tiekti. Paprastai šiems poreikiams tenkinti naudojamas iškastinis kuras (Krajčík et al., 2023). Daugelis išsivysčiusių šalių priėmė įsipareigojimus sumažinti šiltnamio dujų emisiją. Norint pasiekti šį tikslą, nemažinant ekonomikos augimo, yra būtinas efektyvus energijos naudojimas ir vis platesnis atsinaujinančių energijos išteklių integravimas į esamas ir planuojamas energetines sistemas (Ohanu et al., 2024). Remiantis Jungtinių Tautų nuotekų plėtros ataskaita (UNWDR), kasmet sunaudojama apie 3857×10^{12} m^3 gėlo vandens, o žemės ūkis maždaug 44 % šio vandens sunaudoja pasėliams drėkinti. Likę 56 % išleidžiami kaip nuotekos, į kurias įeina 628×10^{12} m^3 pramoninių nuotekų ir 314×10^{12} m^3 buitinių nuotekų (Qadir et al., 2020). Į valyklą patenkančios nuotekos turi didelį energijos kiekį, sudarantį pakankamas sąlygas biologiniams procesams, tačiau nepanaudojant jose esančios energijos praeina per sistemą ir išleidžiamos į priimantį vandens telkinį, sukeldamos šilumos taršą. Jei šiluma būtų atgauta, ją būtų galima panaudoti keliems tikslams. Šilumos regeneravimas gali būti atliekamas trimis skirtingais būdais: tiesiai prie šaltinio, nuotakyne arba iš valytų nuotekų valymo įrenginių nuotekų.

Pastaraisiais metais pastatų energinis naudingumas, bent jau naujų statybų atžvilgiu, tikrai pagerėjo (Ohanu et al., 2024). Tačiau ankstesniuose tyrimuose daugiausia dėmesio buvo skiriama šildymo ir vėsinimo sistemoms, o į kitus aspektus, pavyzdžiui, susijusius su vandens naudojimu, buvo nepakankamai atsižvelgiama. Šveicarijoje atlikti tyrimai parodė, kad 15 % pastatams tiekiamos šiluminės energijos prarandama per nuotakyno sistemą. Ši vertė išauga iki 30 % gerai izoliuotuose pastatuose. Tai įrodo, kad šiandien nuotakynas yra beveik didžiausias šilumos nuostolių šaltinis pastatuose (Liu et al., 2010).

Didelė dalis šilumos energijos patenka į nuotekas. Neefektyvus šilumos energijos naudojimas prisideda prie šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos ir kitų ekologinių problemų. Efektyvus energijos atgavimas gali sumažinti šias emisijas. Be to, energijos kainos nuolat

© 2025 Autoriai. Leidėjas Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Šis straipsnis yra atvirosios prieigos straipsnis, turintis Kūrybinių bendrijų (Creative Commons) licenciją (CC BY 4.0), kuri leidžia neribotą straipsnio ar jo dalių panaudą su privaloma sąlyga nurodyti autorių ir pirminį šaltinį.

kyla, todėl bet koks energijos atgavimo sprendimas gali padėti sumažinti išlaidas, susijusias su šildymu ir kitais energijos naudojimo procesais. Šilumos siurblių ir šilumokaičių naudojimas leidžia atgauti šilumą iš nuotekų.

Tyrimu siekiama išnagrinėti potencialą sumažinti energijos sunaudojimą, CO_2 emisijas ir šiluminę taršą, atgaunant šilumą iš nevalytų nuotekų. Atgauta šiluma gali būti naudojama įvairiems tikslams, pavyzdžiui, šaltam vandeniui pašildyti ir net pastatų vėdinimo sistemoms. Pavyzdžiui, esant šaltam klimatui, nuotekų šilumos regeneravimo integravimas su geotermine, saulės energija gali žymiai sumažinti pastatui vėdinti, šildyti reikalingos energijos poreikį (Nourozi et al., 2019).

Straipsnio tikslas – atlikti pasirinkto objekto nevalytų nuotekų šilumos atgavimo analizę, siekiant nustatyti nuotekų šilumos energijos potencialą. Tyrimo rezultatai gali būti taikomi analizuojant pastatui reikalingą šilumos energijos kiekį, kurį galima atgauti iš jau egzistuojančių šilumos srautų, tokių kaip atliekinė šiluma be papildomų energijos generavimo šaltinių.

2. Šilumos atgavimo technologijų analizė

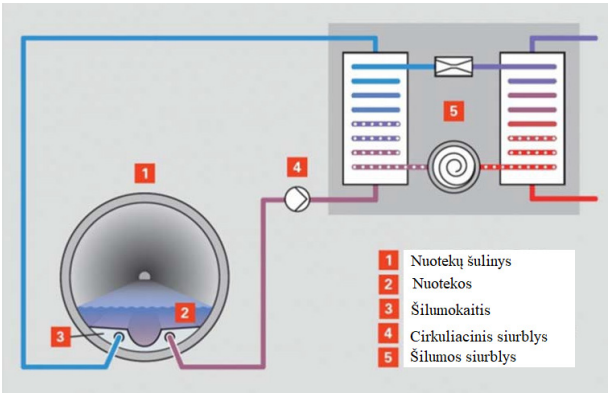
Vidaus nuotekos gali būti laikomos skirtingų energijos rūšių šaltiniu. Elektros energija generuojama iš bioelektrocheminio nuotekų valymo procesų arba panaudojant nuotekų kinetinę energiją, montuojant žemo slėgio hidroelektrinę. Biodujos gaminamos iš anaerobinio pūdymo. Be to, tvarus atsinaujinantis kuras gaunamas perdirbant liekamąjį dumblą. Taip pat vidaus nuotekos turi gerą šilumos energijos potencialą (Cecconet et al., 2019). Labiau prieinama technologija yra šilumos energijos atgavimas iš nuotekų naudojant šilumokaičius, sumontuotus tiesiai į nuotekų surinkimo sistemą (1 paveikslas). Šilumokaitis prijungiamas prie šilumos siurblio. Tokiose sistemose šilumos energijos atgavimas labai priklauso nuo nuotekų temperatūros ir debito (Cipolla & Maglionico, 2014).



1 paveikslas. Vidaus nuotekų šulinys (Cipolla & Maglionico, 2014)

Užteršimas yra pagrindinė šilumokaičių veikimo problema, kuri atsiranda, kai ant paviršiaus nusėda kietosios medžiagos, o mikroorganizmai naudoja nuotekose esančias maistines medžiagas ir nusėda vandeninėje terpėje ant kietų paviršių. Mikroorganizmai gamina bioplėvelės matricą ant išorinio šilumokaičio paviršiaus. Dėl užsiteršimo šilumos perdavimo koeficientas sumažėja 20–50 %, todėl procesas tampa mažiau efektyvus. Bioplėvelės susidarymas turi didelę įtaką šilumokaičio šiluminei galiai. Bioplėvelė padidina šilumokaičio šiluminę varžą ir sumažina bendrą šilumos perdavimo koeficientą. Norint kompensuoti šį sumažėjimą, reikia padidinti šilumokaičio šilumos perdavimą. Bioplėvelės susidarymo nuotakyne negalima išvengti ir jis visada įvyksta. Bioplėvelės susidarymas ir jos storis šilumokaityje priklauso nuo debito ir nuotekų srauto sudėties (Culha et al., 2015). Siekiant sumažinti šilumokaičio užteršimo efektą naudojamos integruotos sistemos, dažniausiai tai šilumokaičio vamzdžiai, integruoti į nuotekų šulinį statybos metu (Zhong Zhou et al., 2004).

Pastaraisiais metais susidomėjimo sulaukė miesto nuotekų ir buitinio / pramoninio vandens šilumos siurblio technologija. Ši technologija leidžia sumažinti pastatų energijos sunaudojimą ir taikyti naują energijos šaltinį. Vidaus nuotekų šilumos energijos atgavimo schema pateikiama 2 paveiksle (Culha et al., 2015).

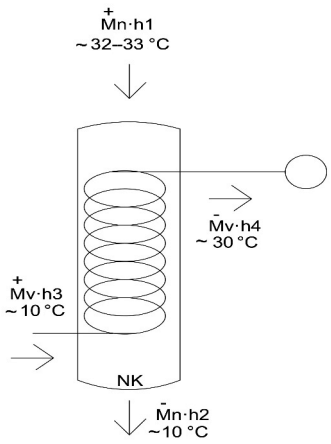


2 paveikslas. Vidaus nuotekų šilumos energijos atgavimas naudojant šilumos siurblio technologiją (Culha et al., 2015)

Nepriklausomai nuo nuotekų sistemos tipo, šilumos energijai atgauti gali būti naudojami du pagrindiniai komponentai: šilumokaitis ir šilumos siurblys. Kai kuriais atvejais šilumą galima atgauti tik naudojant šilumokaitį, paprastai, kai vidutinė nuotekų temperatūra yra aukštesnė nei 25 °C (3 paveikslas). Šilumokaitis yra įtaisas, kuris palengvina vidinės šiluminės energijos perdavimą tarp dviejų skysčių, išvengiant jų maišymosi. Tai pasyvi technologija, kuriai nereikia jokio išorinio energijos šaltinio (cirkuliacinių siurblių). Nuotekų šilumai atgauti dažniausiai naudojami šilumokaičių tipai apima dviejų vamzdžių lygiagretų srautą, dviejų vamzdžių priešpriešinį srautą, apvalkalą ir vamzdį bei plokštelinį ir rėminį šilumokaitį (Culha et al., 2015).

Straipsnyje apie vidaus nuotekų, kaip energijos nešlio, potencialą pateikiama kiekybinė energijos atgavimo ir generavimo iš vandens ciklo galimybių apžvalga. Be

to, nagrinėjama galimybė naudoti nuotakyno vandenį kaip alternatyvų šilumos šaltinį (Frijns et al., 2013).



3 paveikslas. Nevalytų nuotekų šilumos atgavimas naudojant šilumokaitį (Culha et al., 2015)

2012 m. straipsnyje mokslininkai iš pietų Anglijos ištyrė, kiek šilumos būtų galima atgauti iš nuotekų valymo įrenginių pietų Anglijos klimato sąlygomis. Buvo ištirtos keturios nuotekų valymo vietos pietų Anglijoje ir kiekybiškai įvertinta turima šiluma. Nustatytas tikrasis šiluminės energijos išgavimo iš nuotekų potencialas Anglijos sąlygomis ir ekonominės galimybės sumažinti nuotekų valymo operacijų anglies pėdsaką (Hawley & Fenner, 2012).

2022 m. Lietuvos mokslininkai atliko analitinius skaičiavimus analizuojant Vilniaus nuotekų valykloje išvalytų nuotekų šilumos panaudojimo galimybes. Straipsnyje išnagrinėti Vilniaus miesto valymo įrenginiuose išvalytų nuotekų temperatūros ir debito svyravimai, nustatytas teorinis šiluminis potencialas. Apskaičiuotas DEPO komercinio pastato šilumos poreikis ir šilumos siurblio parametrai (Bogdan & Čiuprinskas, 2022).

Taip pat Vengrijos mokslininkai 2018 m. ištyrė žemos temperatūros šilumos (nuotekų šilumos) šaltinio galimybių panaudojimą centralizuotam šildymui. Tyrime aptariami penki scenarijai, pagal kuriuos regeneruota šiluma būtų transportuojama į jau esamą centralizuoto šilumos tiekimo stotį. Teigiama, kad šilumos regeneravimas gali būti atliekamas trimis skirtingais būdais: tiesiai prie šaltinio, nuotakyne arba iš valymo įrenginių valytų nuotekų. Rezultatai rodo, kad efektyviausias būdas šilumai regeneruoti būtų atliekamas tiesiai prie šaltinio. Nuotekų savybės priklauso nuo žmogaus veiklos ir vietinių oro sąlygų. Šių parametrų kintamumas lemia didelius nuotekų charakteristikų svyravimus srauto ir temperatūros požiūriu, į kuriuos reikia atsižvelgti atliekant nuotekų energijos regeneravimo procesus. Kalbant apie atsinaujinančius energijos šaltinius, tikslus energijos šaltinio modeliavimas yra būtina sąlyga norint jį integruoti į energijos paklausos valdymo sistemą (Somogyi et al., 2018).

Nuolat vystantis pasaulio ekonomikai, energijos gamybos paklausa auga visame pasaulyje. Tačiau energijos gamyba šiuo metu vis dar labai priklauso nuo iškastinio kuro deginimo, o tai kenkia aplinkai. Energijos atgavimas iš nuotekų gali ne tik efektyviai šalinti atliekas, sumažinti aplinkos taršą, bet ir padėti atgauti išteklius bei energiją, taip pasiekiamas uždaro ciklo energijos panaudojimo kelias (Zhang et al., 2023). Didelį šilumos energijos potencialą turi negyvenamieji pastatai, kuriuose susidaro daug nuotekų, pavyzdžiui, skalbykla, viešbučiai ir restoranai, maisto perdirbimo pramonė. Šia kryptimi reikėtų skirti daugiau tyrimų (Nagpal et al., 2021).

Tolesniuose tyrimuose būtų racionalu įvertinti galimybę panaudoti saulės kolektorius su nuotekų šilumos atgavimo technologija.

3. Tyrimo objektas

Darbo tyrimui atlikti pasirinktas 3 aukštų viešosios paskirties Baltijos Amerikos klinikos pastatas, esantis Nemenčinės plente 54A, Vilniuje (4 paveikslas). Klinikoje yra teikiamas platus chirurgijos, terapijos bei reabilitacijos paslaugų spektras, ambulatorinė pacientų priežiūra ir stacionarus gydymas. Be klinikoje veikiančios kavinės, kuri teikia maitinimo paslaugas pacientams, veikia skalbykla, teikianti skalbimo paslaugas klinikai, užtikrinant visas reikalingas higienos normas atitinkančias paslaugas. Analizuojamo pastato plotas 3250 m^2 ir tūris – 8500 m^3.



4 paveikslas. Baltijos Amerikos klinikos pastatas (Baltijos Amerikos klinika, 2004)

Buitinės nuotekos, susidarančios klinikos patalpose, valgykloje ir skalbykloje, patenka į nuotakyno kolektorius. Per nuotakyno vamzdžius nuotekos iš šulinių patenka į nuotekų siurblinę. Iš nuotekų siurblinės nevalytos nuotekos nukreipiamos į miesto nuotakyno sistemą. Maksimalus projektinis siurblinės nuotekų debitas yra 5,7 l/s, tačiau tyrimo metu nustatytas realus kiekis apie 0,077 l/s.

Pastato nuotekų siurblinė skirta nevalytoms nuotekoms transportuoti iš vietinės nuotekų sistemos į Vilniaus miesto nuotekų sistemą. Siurblinėje sumontuoti du 2 kW siurbliai. Taip pat yra nevalytų nuotekų 4 m^3 rezervuaras arba nuotekų saugojimo talpykla.

4. Tyrimo metodika

Nuotekų srauto ir temperatūros charakteristikos yra labai svarbios nustatant šilumos energijos potencialą. Didesnės srauto ir temperatūros reikšmės lemia didesnį šilumos atgavimą. Nuotekų temperatūra ir debitas yra glaudžiai susiję su galutinio naudojimo vandens temperatūra ir srautu. Jei yra informacijos apie galutinį naudojimą, pagal tai galima apskaičiuoti nuotekų srautą ir temperatūrą (Hadengue et al., 2020).

Šilumos kiekis, skirtas išgauti iš nuotekų, gali būti apskaičiuojamas taikant šilumos perdavimo lygtį:

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

čia $\dot{Q}$ – atgautas šilumos kiekis per laiko vienetą arba momentinė galia, 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 kiekis, sukauptas (akumuliuotas) nevalytų nuotekų siurblinėje, apskaičiuojamas taip:

$$\dot{Q} = G \times \rho \times c_p \times \Delta T / 3600, \quad (2)$$

čia $\dot{Q}$ – atgautas šilumos kiekis per laiko vienetą, kWh; G – siurblinės tūris, 4 m^3; c_p – savitoji nuotekų šiluma, laikoma lygia 4,19 kJ/(kg·K); ρ – nuotekų tankis, laikomas lygiu ρ – 1000 kg/m^3; ΔT – nuotekų temperatūros pokytis dėl šilumos atgavimo, °C.

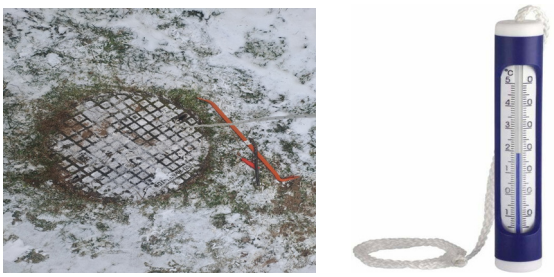
Vandens temperatūra, naudojant šilumos atgavimo technologiją tiesiai iš šilumokaičio, apskaičiuojama taip:

$$t_4 = \left(\frac{Q_{pot.} \times \varepsilon}{\dot{m} \times c_p} \right) + t_3, \quad (3)$$

čia $Q_{pot.}$ – šilumos potencialas, kW; ε – šilumokaičio efektyvumas; $\dot{m}$ – masinis vandens suvartojimo debitas, kg/s; c_p – savitoji nuotekų šiluma, laikoma lygia 4,19 kJ/(kg·K); t_3 – šalto vandens temperatūra į šilumokaitį, °C; t_4 – šalto vandens temperatūra iš šilumokaičio, °C.



5 paveikslas. Baltijos Amerikos klinikos įvadinė šalto vandens apskaita



6 paveikslas. Nevalytų nuotekų temperatūros matavimai

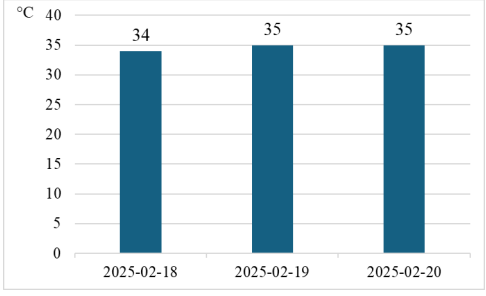
Nevalytų nuotekų srautas apskaičiuotas pagal „Vilniaus vandenų“ pastato įvadinio šalto vandens sunaudojimo skaitiklį DS-TRP-TCM142/08-4604, esant matavimo paklaidai ±0,0001 m^3 ir tikslumo klasei 2 (5 paveikslas).

Nuotekų temperatūrai matuoti pastato nuotakyno siurblinėje panaudotas vandens termometras TFA, esant matavimo paklaidai ±1 °C (6 paveikslas).

Naudojantis pastato įvadinio šalto vandens skaitiklio rodmenimis ir vandens termometru vertinamas galimas atgauti iš nuotekų šilumos kiekis bei matuojama nuotekų temperatūra.

5. Rezultatai

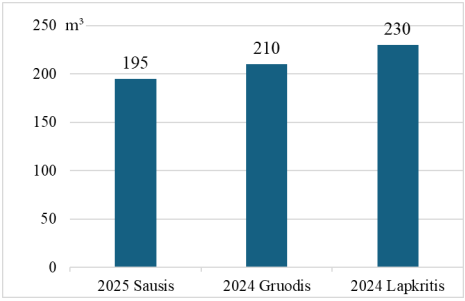
Naudojant vandens termometrą TFA, esant matavimo paklaidai ±1 °C, buvo išmatuota nevalytų nuotekų temperatūra nuotekų siurblinėje. TFA termometras skirtas vandens temperatūrai matuoti ir yra specializuotas prietaisas, dažnai naudojamas akvariumuose, baseinuose, vandens rezervuaruose ir kituose vandens telkiniuose. Temperatūra buvo išmatuota rankiniu būdu naudojant valandinį tiesioginį kontaktą su nuotekomis. Rezultatai parodyti 7 paveiksle.



7 paveikslas. Nevalytų nuotekų temperatūra siurblinėje

Temperatūros matavimai atlikti nuo 2025 m. vasario 18 dienos iki 2025 m. vasario 20 dienos 14:30 val. ir svyravo nuo 34 °C iki 35 °C, vidutiniškai 34,5 °C.

Nevalytų nuotekų srautas apskaičiuotas pagal „Vilniaus vandenų“ pastato įvadinio šalto vandens sunaudojimo skaitiklio duomenis su matavimo paklaida ± 0,0001 m^3. Matavimo duomenys pateikiami 8 paveiksle.



8 paveikslas. Pastato vandens sunaudojimas

Per tris mėnesius sunaudota 635 m^3 šalto vandens, vidutiniškai 212 m^3 per mėnesį. Iš šalto vandens sunaudojimo duomenų apskaičiuotas nevalytų nuotekų debitas – 0,077 l/s.

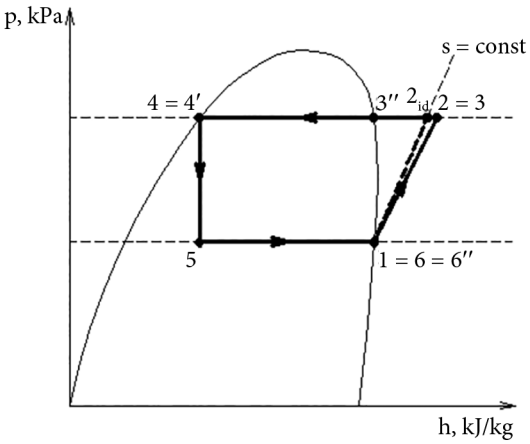
Momentinis šilumos kiekis (šilumos potencialas), skirtas išgauti iš nuotekų, apskaičiuojamas taikant šilumos perdavimo lygtį (1). Taikant prielaidą, kad nevalytų nuotekų tankis prilygsta vandens tankiui ir nuotekų temperatūra bus sumažinta iki 5 °C, apskaičiuota momentinė galia (šilumos potencialas) – 9,7 kW.

Taikant skaičiavimo lygtį (2) rezultatai rodo, kad nevalytų nuotekų siurblinėje (šulinyje) akumuliuota 140 kWh šilumos.

Taikant prielaidą, kad miesto centralizuoto tiekimo šalto vandens temperatūra yra 10 °C, nuotekų šilumos energijos atgavimo šilumokaičio efektyvumas 92 %, ir esant 0,077 l/s karšto vandens sunaudojimui apskaičiuota, kad naudojant nuotekų šilumos atgavimo šilumokaitį galima padidinti šalto vandens temperatūrą nuo 10 °C iki 30 °C. Temperatūra apskaičiuota pagal (3) formulę.

Taikant „CoolPack“ programinę įrangą buvo apskaičiuoti šilumos siurblio parametrai. Toliau pateikta šilumos siurblio diagrama (9 paveikslas).

Šilumos siurblio termodinaminio ciklo efektyvumas esant šildymo režimui (angl. *coeficient of performance* (COP) – 3,68, kompresoriui (šaldymo agentui suspausti) reikalinga suteikti elektros srovės galia – 3,61 kW, garintuvo paimamas šilumos srautas (šiluminė galia) – 9,7 kW, garintuvo paimamas savitasis šilumos srautas – 155,3 kJ/kg, šaldymo agento masinis debitas – 0,062 kg/s, kondensatoriaus atiduodamas šilumos srautas (šiluminė galia) – 13,31 kW, kondensatoriaus atiduodamas savitasis šilumos srautas – 213,32 kJ/kg.



9 paveikslas. Šilumos siurblio p ir h diagrama

6. Išvados

1. Tiriamojo objekto nevalytų nuotekų stebėjimo ir apskaičiuoti duomenys rodo, kad analizuojamos technologijos leidžia efektyviai ir patikimai atgauti šilumą iš nuotekų. Atgautas šilumos energijos kiekis gali sumažinti bendrą energijos sunaudojimą.

2. Laikotarpiu nuo 2025-02-18 iki 2025-02-20 nevalytų nuotekų siurblinėje temperatūra siekė 34–35 °C, pagal šalto vandens sunaudojimą apskaičiuotas nevalytų nuotekų debitas – 0,077 l/s, nustatyta, kad nevalytų nuotekų siurblinėje (šulinyje) akumuliuota 140 kWh.

3. Tolesniuose tyrimuose būtų racionalu įvertinti galimybę panaudoti saulės kolektorius su nuotekų šilumos atgavimo technologija.

Padėka

Dėkoju Baltijos Amerikos klinikos administracijai už pagalbą rengiant straipsnį.

Literatūra

Baltijos Amerikos klinika. (2024, gruodžio 11). *Baltijos-Amerikos terapijos ir chirurgijos klinika*. https://bak.lt/?gad_source=1&gad_campaignid=20519023644&gclid=EAIaIQobChMI9Y3Sg4CZjgMVCwuiAx1DqSVoEAAYASAAEgIVAvD_BwE_

Bogdan, D., & Čiuprinskas, K. (2022). Feasibility study of heat recovery form treated wastewater in wastewater treatment plant and use it in nearby object. *Science Future of Lithuania*, *14*, 1–5. https://doi.org/10.3846/mla.2022.17237

Cecconet, D., Raček, J., Callegari, A., & Hlavínek, P. (2020). Energy recovery from wastewater: A study on heating and cooling of a multipurpose building with sewage-reclaimed heat energy. *Sustainability*, *12*(1), 116. https://doi.org/10.3390/SU12010116

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

Culha, O., Gunerhan, H., Biyik, E., Ekren, O., & Hepbasli, A. (2015). Heat exchanger applications inž. wastewater source heat pumps for buildings: A key review. *Energy and Buildings*, *104*, 215–232. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.013

Frijns, J., Hofman, J., & Nederlof, M. (2013). The potential of (waste)water as energy carrier. *Energy Conversion and Management*, *65*, 357–363. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.08.023

Hadengue, B., Scheidegger, A., Morgenroth, E., & Larsen, T. A. (2020). Modeling the water-energy nexus in households. *Energy and Buildings*, *225*, Article 110262. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110262

Hawley, C., & Fenner, R. (2012). The potential for thermal energy recovery from wastewater treatment works in southern England. *Journal of Water and Climate Change*, *3*(4), 287–299. https://doi.org/10.2166/wcc.2012.013

Iungman, T., Khomenko, S., Barboza, E. P., & Cirach, M. (2024). The impact of urban configuration types on urban heat islands, air pollution, CO_2 emissions. *The Lancet Planetary Health*, *8*(7), e489–e505. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(24)00120-7

Krajčík, M., Arıcı, M., & Ma, Z. (2023). Trends in research of heating, ventilation and air conditioning and hot water systems in building retrofits: Integration of review studies. *Journal of Building Engineering*, *76*, Article 107426. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107426

Liu, L., Fu, L., & Jiang, Y. (2010). Application of an exhaust heat recovery system for domestic hot water. *Energy*, *35*(3), 1476–1481. https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.12.004

Nagpal, H., Spriet, J., Murali, M. K., & McNabola, A. (2021). Heat recovery from wastewater—a review of available resource. *Water*, *13*(9), Article 1274. https://doi.org/10.3390/w13091274

Nourozi, B., Wang, Q., & Ploskić, A. (2019). Maximizing thermal performance of building ventilation using geothermal and wastewater heat. *Resources, Conservation and Recycling*, *143*, 90–98. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.025

Ohanu, C. P., Rufai, S. A., & Oluchi, U. C. (2024). A comprehensive review of recent developments in smart grid through renewable energy resources integration. *Heliyon*, *10*(3), Article e25705. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25705

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

Qadir, M., Drechsel, P., Jiménez Cisneros, B., Kim, Y., Pramanik, A., Mehta, P., & Olaniyan, O. (2020). Global and regional potential of wastewater as a water, nutrient and energy source. *Natural Resources Forum*, *44*(1), 40–51. https://doi.org/10.1111/1477-8947.12187

Somogyi, V., Sebestyén, V., Energy, E. D. (2018). Assessment of wastewater heat potential for district heating in Hungary. *Energy,163*, 712–721. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218314543?casa_token=7Vr-7JRIT7oYAAAAA:0BVyDRUfUmBWsGVTtdiTs6L1oum-CeRaw9TTLYXbfucRs5WL0eErW2zF0Kb3zwU1H7YUT-BJ-Naw

Zhang, C., Guo, X., Royon, L., & Chatellier, P. (2023). Heat transfer analysis of sewer system and its potential role in thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, *61*, Article 106799. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106799

Zhong Zhou, W., Xing Li, J., Zhou, orderlihtml, Zhong, W., Xing, J., & Zhou, W. (2004). *Sewage heat source pump system's application examples and prospect analysis in China*. https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1733&context=iracc

RAW WASTEWATER HEAT RECOVERY STUDY

G. GERASIMOVIČ, K. ČIUPRINSKAS

Abstract. More than two-thirds of the world's energy needs are met by non-renewable energy from natural resources. Research shows that the risk to global and regional energy security is increasing due to the depletion of natural resources. At the same time, building modernization plays a key role in reducing energy consumption and environmental impact. The study analyses the potential of thermal energy recovery from wastewater. Issues related to environmental, economic and practical constraints, how this energy can be realistically recovered, and the possibilities for reducing the carbon footprint are discussed. This article examines the alternative energy supply, how much heat could be recovered from wastewater and whether this heat can be effectively used.

Keywords: domestic sewage, energy, heat, heat pumps, renewable energy sources.