

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS

JŪRATĖ MONTVILAITĖ

**ŠILUMOS ATGAVIMO POTEČIALAS UAB „KAUNO
VANDENYS“ NUOTEKŲ VALYKLOJE**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
prof. dr. Linas Kliučininkas

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS

**ŠILUMOS ATGAVIMO POTECIALAS UAB „KAUNO
VANDENYS“ NUOTEKŲ VALYKLOJE**

Baigiamasis magistro projektas
Aplinkosaugos inžinerija (kodas 621H17001)

Vadovas

prof. dr. Linas Kliučininkas

Recenzentas

doc. Viktoras Račys

Projektą atliko

Jūratė Montvilaitė

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Cheminės technologijos fakultetas

(Fakultetas)

Jūratė Montvilaitė

(Studento vardas, pavardė)

Aplinkosaugos inžinerija 621H17001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Šilumos atgavimo potencialas UAB „Kauno vandenys“ nuotekų valykloje”

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. birželio 02d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Jūratės Montvilaitės**, baigiamasis projektas tema „Šilumos atgavimo potencialas UAB „Kauno vandenys“ nuotekų valykloje” yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjusi.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardas ir pavardė)

(parašas)

Turinys

ĮVADAS.....	11
1 LITERATŪROS APŽVALGA	13
1.1 Nuotekų samprata.....	13
1.2 Nuotekos – išteklių šaltinis	13
1.3 Nuotekų šilumos atgavimą įtakojantys veiksniai, atgavimo aktualumas.....	14
1.4 Šilumos atgavimo iš nuotekų būdai ir šilumos atgavimas nuotekų valykloje.....	15
1.4.1 Kauno nuotekų valyklos apžvalga.....	16
1.4.1.1 Nuotekų valymo ūkis	17
1.4.1.2 Dumblo ūkis	20
1.4.2 Šilumos atgavimo vietų identifikavimas Kauno nuotekų valykloje.....	21
1.5 Nuotekų šilumos atgavimo technologijos	23
1.5.1 Šilumokaičiai.....	23
1.5.2 Šilumos siurbliai.....	25
1.6 Hidroterminės energijos atgavimas – svarbi priemonė mažinant šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją	27
1.7 Literatūros apžvalga	28
2 METODINĖ DALIS	29
2.1 Darbo metodologija.....	29
2.2 Technologinio proceso monitoringas ir duomenų analizė Kauno nuotekų valykloje	29
2.3 Šilumos kiekio skaičiavimas nuotekose	30
2.4 Netiesioginio poveikio vertinimo metodika šiltnamio efektą sukeliančioms anglies dioksido dujoms nustatyti.....	31
2.5 Anglies dioksido, azoto oksidų ir anglies monoksido metinės emisijos	32
2.6 Šilumos atgavimo iš nuotekų technologijos taikymas dumblo ūkyje	33
2.6.1 Analitinis bendrų šilumokaičio projektavimo sąlygų vertinimas.....	34
2.7 Šilumos siurblio parinkimas išvalytų nuotekų išleidimo vietoje	34
3 TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS.....	35
3.1 Šilumos atgavimo potencialo įvertinimas	35

3.2 Anglies dioksido emisijos įvertinimas	38
3.3 Sąlyginio išmetamų teršalų į atmosferą sumažėjimo įvertinimas	40
3.4 Šilumos atgavimo technologinės sistemos įdiegimas Kauno nuotekų valykloje.....	41
3.4.1 Šilumokaičio technologinė sistema dumblo ūkyje.....	41
3.4.1.1 Pagrindinių šilumokaičio projektavimo sąlygų įvertinimas.....	42
3.4.2 Šilumos siurblio parinkimas.....	43
3.5 Atgautos šilumos panaudojimo galimybių įvertinimas.....	44
IŠVADOS.....	48
LITERATŪRA.....	49

Montvilaitė Jūratė. Šilumos atgavimo potencialas UAB „Kauno vandenys“ nuotekų valykloje. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Linas Kliučininkas; Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas.

Mokslu kryptis ir sritis: Bendroji inžinerija, Technologijos mokslai.

Raktiniai žodžiai: nuotekos, šilumos atgavimas, šilumokaičiai, šilumos siurbliai, nuotekų valykla.

Kaunas, 2017. 52 p.

SANTRAUKA

Nuotekos yra vienos potencialiausių šiluminės energijos atgavimo šaltinių. Šilumos energijos atgavimui dažnai pasirenkamos buitinės, komunalinės, gamybinės ir kt. nuotekos. Šiame darbe buvo naudojamos Kauno nuotekų valyklos nuotekos. Šilumos atgavimui pasirinkta naudoti dumblo ūkyje esančias nuotekas, kurių temperatūra priklausomai nuo sezoniškumo kinta 24–28 °C ribose ir į Nemuną išleidžiamas išvalytas nuotekas, kurių vidutinė temperatūra – 14 °C. Šie nuotekų srautai – potencialus šiluminės energijos atgavimo šaltinis. Jose esantis šilumos kiekis atgautas taikant dvigubo vamzdžio šilumokaičio ir šilumos siurblio technologijų sistemas. Skaičiavimų duomenimis iš susidarančio metinio srauto yra atgaunama 116233 GJ šilumos.

Šilumos atgavimo technologijų diegimas nuotekų valykloje yra svarbus ne tik energetiniu požiūriu, bet ir aplinkosauginiu, kadangi mažinama šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisija. Naudojant šias technologijas, pastebimi į atmosferą išmetamų teršalų, tokių kaip anglies dioksido, azoto oksidų ir anglies monoksido sumažėję kiekiai. Tam pačiam energijos kiekiui sugeneruoti (116233 GJ), kai dideliuose kurą deginančiuose įrenginiuose yra deginamos gamtinės dujos, anglies dioksido metinė emisija yra lygi 6614 t, azotų oksidų – 3,47 t ir anglies monoksido – 0,03 t. Gautas teršalų emisijos įrodas, kad pasirinkta šilumos atgavimo iš nuotekų technologija ne tik sumažina šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją, bet taip pat yra sėkmingas darnios energijos vystymosi pagrindas. Energijos suvartojimas ar dalis jo gali būti kompensuojamas tikslingai panaudojant nuotekose susidariusią hidroterminę energiją.

Montvilaitė Jūratė. Heat Recovery Potential at JSC “Kauno vandenys” Wastewater Treatment Plant. *Master’s thesis* / supervisor prof. dr. Linas Kliučininkas. The Faculty of Chemical Technology, Kaunas University of Technology.

Research area and field: General Engineering, Technological studies.

Key words: wastewater, heat recovery, heat-exchangers, heat pumps, wastewater treatment plant.

Kaunas, 2017. 52 p.

SUMMARY

Wastewater is one of the most potential heat recovery sources. The domestic, municipal, industrial, etc. wastewater are selected for heat recovery in the most cases. The wastewater of Kaunas wastewater treatment plant has been used in this case of study. The wastewater from the sludge household has been decided to use for the heat recovery. The temperature of it is between 24–28 °C and depends on a seasonal prevalence. The treated wastewater which is released to Nemunas has been used as another heat source for heat recovery. The annual average temperature of this stream is 14 °C. These streams of wastewater are a potential sources of recovered heat energy. The existing amount of heat inside of it has been recovered by double-pipe heat exchanger and heat pump. According to calculations has been recovered 116233 GJ of heat from the annual stream of wastewater.

Implementation of heat recovery technologies in the wastewater treatment plant is an important approach not only to energy but to environmental approach as well because the emissions of greenhouse gases decrease. The reduction of carbon dioxide, nitrogen oxides, and carbon monoxide emissions are noticeable in the atmosphere. In the large combustion plants when the natural gas is used to generate the same amount of energy (116233 GJ) the annual emission of carbon dioxide is 6614 t, nitrogen oxides – 3.47 t and carbon monoxide – 0.03 t. The emissions of pollutants approve that the technology which has been chosen does not only reduce the greenhouse gas emission. It is also a successful foundation for sustainable energy development. Energy consumption or part of it can be compensated by formed hydrothermal energy of wastewater.

PADĖKA

Nuoširdžiai dėkoju UAB „Kauno vandenys“ nuotekų valyklos praktikos vadovui Jonui Matulevičiui už pagalbą, bendradarbiavimą, perduotas žinias ir naudingas konsultacijas baigiamojo darbo metu.

Taip pat dėkoju baigiamojo darbo vadovui prof. dr. Linui Kliučininkui už vertingus patarimus, kantrybę bei konsultacijas.

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Nuotekų srautų monitoringo duomenys dumblo ūkyje	30
2.2 lentelė. Emisijų faktoriai dideliems kurą deginantiems įrenginiams, deginant įvairių rūšių kurą [32, 33, 37]	32
3.1 lentelė. Gamtinių dujų kiekiai šiluminės energijos generavimui dideliuose kurą deginančiuose įrenginiuose	38
3.2 lentelė. Sąlyginiai išmetamų teršalų į atmosferą sumažėjimai	40
3.3 lentelė. Išmetamų teršalų kiekių palyginimas	40

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Šilumos atgavimo būdai: individualiame namų ūkyje (a), kanalizacijos sistemoje (b) arba nuotekų valykloje (c) [7]	15
1.2 pav. Kauno miesto nuotekų valyklos technologinė schema [26].....	19
1.3 pav. Kauno nuotekų valyklos dumblo ūkio technologinė schema.....	20
1.4 pav. Mikroorganizmų populiacijos augimo greičio priklausomybės nuo temperatūros [27]	22
1.5 pav. Šilumokaitis integruotas nuotekų vamzdyno viduje [28]	23
1.6 pav. Nuotekų vamzdyno rekonstrukcija, įterpiant šilumokaičio sistemą [28].....	23
1.7 pav. Šilumokaičių tipai: a) nerūdijančio plieno šilumokaitis įmontuojamas vamzdžio apatinėje dalyje; b) šilumokaitis integruotas konkrečioje nuotekų vamzdžio sienelės dalyje; c) šilumokaitis su nuotekų vamzdžiu specialiai integruotame izoliaciniame vamzdyje; d) dvigubo vamzdžio šilumokaitis [29]	24
1.8 pav. Šilumos siurblio sistema nuotekų valykloje [32].....	25
1.9 pav. Globalus šiltnamio efektą sukeliančių dujų vertinimas[30].....	27
2.1 pav. Dumblo ūkio vamzdynų sistemos dalis Kauno nuotekų valykloje; L – vamzdynų ilgis, d_1 – vidinis skersmuo (150 mm); d_2 – išorinis skersmuo (153 mm)	33
3.1 pav. Dumblo debito ir temperatūrinių svyravimų priklausomybės nuo metų laiko dumblo ūkyje	35
3.2 pav. Ištekantių išvalytų nuotekų debitų prieš jų išleidimą į Nemuną ir temperatūrinių svyravimų priklausomybės nuo metų laiko.....	36
3.3 pav. Šilumos kiekių ir temperatūrų pokyčių priklausomybės nuo metų laiko.....	37
3.4 pav. Anglies dioksido emisija, kai dideliuose kurą deginančiuose įrenginiuose naudojamos gamtinės dujos.....	39
3.5 pav. Dvigubo vamzdžio šilumokaičio principinė schema	42
3.6 pav. Iš dumblo ūkio nuotekų atgaunamos šilumos panaudojimo galimybės principinė schema	45
3.7 pav. Kauno nuotekų valyklos teritorija ir potencialūs šilumos, atgautos iš nuotekų, vartotojai (M 1:10000) [45].....	47

ĮVADAS

Kasdien į mus supančią aplinką yra išmetami dideli šilumos kiekiai. Įvairių pramoninių procesų metu susidariusi šiluminė energija yra išmetama tiesiai į atmosferą. Prie šios taršos prisideda kiekvienas pramoninis sektorius. Vienas iš tokių – miestų nuotekų valyklos.

Nuotekų valymo įmonės pasauliniu mastu pasižymi kaip pramoniniai sektoriai, kurie sueikvoja apie 0,1–0,3 % bendros sugeneruojamos energijos kiekviename mieste [1]. Dėl šios priežasties nuotekų valyklos daugiau ar mažiau yra priklausomos nuo vietinių šilumos tinklų. Šiame dešimtmetyje atlikti moksliniai tyrimai rodo, kad ateityje didės energijos suvartojimas nuotekų valymui dėl augančios žmonių populiacijos, griežtesnių nuotekų valymo reikalavimų, išleidžiant jas į vandens telkinius, nusidėvinčios techninės infrastruktūros ir dėl naujų teršalų vykdytinos kontrolės (pvz., farmacinių produktų taršos reguliavimas nuotekose) [1, 2]. Didėjantis energijos vartojimas skatina ieškoti alternatyvių energijos atgavimo šaltinių. Vienas jų – nuotekos, kurios laikomos potencialiu energijos atgavimo šaltiniu [3, 4]. Šilumos atgavimas iš nuotekų propaguoja darnios energijos vystymosi ideologiją [5].

Šiluminės energijos atgavimo iš nuotekų praktika sėkmingai vykdoma tokiose šalyse kaip Danija, Norvegija, Vokietija, Jungtinės Amerikos Valstijos, Kanada, Kinija, Japonija. Šiose valstybėse hidroterminės energijos atgavimui iš nuotekų dažniausiai naudojamos šilumokaičių ir šilumos siurblių technologijos [2, 6, 7, 8, 9, 10]. Lietuvoje nėra viena nuotekų valykla, tame tarpe ir UAB „Kauno vandenys“, savo veikloje netaiko šilumos atgavimo iš nuotekų technologijos. Kauno nuotekų valykloje vykdomų procesų metu, susidariusi šiluminė energija yra nepanaudojama, todėl patiriami dideli šilumos nuostoliai. Metinis išvalomų nuotekų kiekis siekia daugiau nei 20 mln. m³. Tai rodo, kad ši valykla išsiskiria dideliais nuotekų srautais įmonės viduje ir yra perspektyvi, vykdant šilumos atgavimą iš nuotekų.

Hipotezė: Kauno miesto nuotekos yra potencialus šilumos atgavimo iš nuotekų šaltinis.

Darbo tikslas – įvertinti šilumos atgavimo potencialą UAB „Kauno vandenys“ nuotekų valykloje ir parinkti technologinę sistemą hidroterminės energijos atgavimui.

Tyrimo objektas – šilumos atgavimas iš bendrųjų nuotekų ir pūdymui skirto dumblo.

Darbo uždaviniai:

- ✓ išanalizuoti mokslinę literatūrą darbo tema;
- ✓ atlikti šilumos srautų analizę ir identifikuoti nuotekų apdorojimo etapą, kuriame galimas efektyviausias šilumos atgavimas;
- ✓ įvertinti šilumos atgavimo potencialą;
- ✓ įvertinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų pokytį hidroterminės energijos atgavimo metu;

- ✓ įvertinti hidroterminės energijos atgavimo metu susidarantių šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį ir gautus duomenis palyginti su Kauno šiluminėje elektrinėje susidarantiomis teršalų emisijomis;
- ✓ parinkti hidroterminės energijos atgavimo technines priemones;
- ✓ numatyti atgautos šilumos panaudojimo sritis.

1 LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Nuotekų samprata

Namų ūkyje, gamyboje vartotas ar kitaip atsiradęs nereikalingas arba teritorijos paviršiumi, stogais tekėjęs (lietaus, polaidžio, gatvių plovimo) vanduo – vadinamas nuotekomis. Būtent taip nuotekos suprantamos daugelio pasaulio kultūrų iki šių dienų [2, 5].

XXI a. pr. išryškėja nuotekų samprata, paremta darnaus vystymosi ideologija, kai nuotekų sąvoka suprantama kaip atsinaujinantis išteklius. Visuomenė nuotekas suvokia kaip medžiagų atgavimo, pakartotinio panaudojimo šaltinį. Pagrindiniai iš nuotekų atgaunami produktai yra vanduo, įvairūs nuotekų dumblo produktai (pvz., trąšos, plastikai ir kt.) ir energija¹ [5].

Šių dienų paradigma – nuotekos visuomenėje laikomos naudingą dariniu, kurį galima panaudoti žmonių gyvenimo kokybei pagerinti, taikant įvairias išteklių atgavimo sistemas.

1.2 Nuotekos – išteklių šaltinis

Dažniausiai iš nuotekų atgaunami ištekliai:

- ✓ vanduo;
- ✓ biomasė;
- ✓ metanas;
- ✓ trąšos;
- ✓ šiluminė (hidroterminė) energija.

Vanduo yra laikomas vienu svarbiausių atgavimo šaltinių iš nuotekų. Kaip buvo minėta anksčiau, išvalytas nuotekų vanduo regeneruojamas ir panaudojamas dar kartą arba, papildomai jį perdirbus, suteikiamos platesnės vandens panaudojimo sritys. Dažnai nuotekų valykloje išvalytas vanduo panaudojamas žemės ūkyje, kraštovaizdžio drėkinimui ar pakeičia įprastą vandenį tualetuose [11].

Valomose nuotekose gausu biomasės – nuotekų dumblo, kuris yra laikomas atsinaujinančiu energijos šaltiniu [12]. Nuotekų dumblui apdoroti naudojamos įvairios technologijos: pūdymas, terminis džiovinimas, atviras kompostavimas, deginimas ir kt. [13]

Kitas galimas nuotekų (tiksliau pūdyto nuotekų dumblo) išteklius – metanas (CH₄). Dažniausia energijos gavybos iš nuotekų forma. Šios dujos susidaro palaikant anaerobines sąlygas dumblo puvimo metu. Visame pasaulyje dumblo pūdyimo procesai dažniausiai vykdomi specialiuose anaerobiniuose reaktoriuose (metantankuose) [14]. Dažnai pagamintos metano

¹Energija termodinamikos moksle suprantama kaip šiluminė energija, t. y. šiluma, kuri laikoma viena iš energijos formų.

dujos panaudojamos šilumos ar elektros energijos gamybai. Aplinkosauginiu požiūriu CH₄ yra galingos, šiltnamio efektą sukeliančios dujos, darančios didesnę poveikį globaliniam atšilimui negu anglies dioksido emisijos [15].

Dar vienas nuotekų išteklius – trąšos. Vis plačiau žemės ūkyje yra panaudojamos organinės medžiagos perdirbtos iš nuotekų, ypač trąšos, kurios plačiai naudojamos Jungtinėse Valstijose, Europos šalyse [16].

Nuotekos – puiki terpė ne tik organinėms trąšoms, vandeniui, bet taip pat ir šilumai atgauti. Į nuotekų valyklą sutekėjusios nuotekos yra potencialus energijos atgavimo šaltinis [4, 5, 17].

1.3 Nuotekų šilumos atgavimą įtakojantys veiksniai, atgavimo aktualumas

Šilumos atgavimo iš nuotekų pradžia yra laikomi 1987 m., kai Tokijuje (Japonija) buvo pastatyta pirmoji nuotekų valykla su šilumos atgavimo iš nuotekų technologija. Atgauta šiluma buvo panaudojama esamų administracinių patalpų kondicionavimui užtikrinti [2, 18]. Nuotekos yra laikomos koncentruotu šilumos šaltiniu [19], kadangi vanduo turi didelę šiluminę talpą (4200 J/(kg·°C)) ir tankį (1000 kg/m³).

Svarbiu įvykiu, kuris paskatino efektyviai taikyti šilumos atgavimo iš nuotekų sistemas, tapo JAV Aplinkos apsaugos agentūros 2007 m. paskelbta ataskaita², kuri identifikuoja šilumos atgavimo galimybes ir naudą šilumą atgaunant nuotekų valyklose [20]. Atlikti moksliniai tyrimai nurodo šilumos atgavimą iš nuotekų sąlygojančius veiksnius, kurie reikšmingi energetiniu, ekonominiu ir aplinkosauginiu požiūriais [1, 3, 21, 22, 23]:

- ✓ atgauta šiluma visiškai arba dalinai kompensuoja nuotekų valyklos išlaidas, skiriamas šiluminiams procesams³ užtikrinti;
- ✓ atsinaujinančios energijos propagavimas, t. y. energijos atgavimas iš nuotekų yra laikomas aplinkai draugišku procesu;
- ✓ tikslingai prisidedama prie bendrai sugeneruojamo energijos kiekio pramoniniame sektoriuje (šiuo atveju nuotekų valykloje);
- ✓ sumažinama šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisija ir kt. oro tarša, nes reikalingas mažesnis tiekiamos elektros kiekis (reikalingas terminių procesą užtikrinimui) iš vietinės elektrinės, kuri energijos generavimui naudoja iškastinį kurą (gamtinės dujas, mazutą ar akmens anglį).

² Oficialus 2007 metų ataskaitos pavadinimas “The Opportunities for and Benefits of Combined Heat and Power at Wastewater Treatment Facilities”. Ataskaitos el. variantą galima rasti per internetinę prieigą: <<https://www.epa.gov/environmental-topics/water-topics>>.

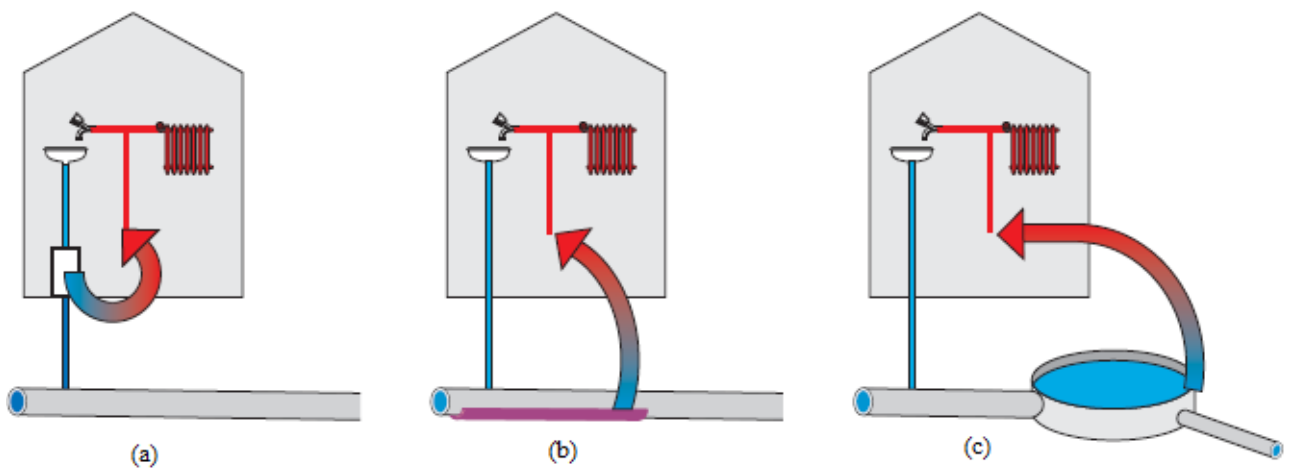
³ Nuotekų valyklose dažniausiai pasitaikantys terminiai procesai yra nuotekų ar dumblo temperatūros kėlimas arba palaikymas.

Šiame dešimtmetyje atlikti tyrimai įrodo, jog ateityje didės nuotekų kiekis ir jų valymui reikalinga energija. Pagrindiniai veiksniai įtakojantys nuotekų augimą yra auganti žmonių populiacija, griežtesni išleidimo reikalavimai ir naujų teršalų privalomoji kontrolė [1]. Siekiant tvaraus išteklių naudojimo, paminėti veiksniai skatina naujų energijos išgavimo šaltinių paiešką ir technologijų taikymą miestų nuotekų valyklose. Vienas naujesnių energijos atgavimo šaltinių – nuotekos, iš kurių atgaunama šiluminė energija.

Vis daugiau įvairių pasaulio valstybių įmonių sėkmingai naudoja šilumos atgavimo iš nuotekų technologijas. Nemaža dalis šių įmonių – miestų nuotekų valyklos [2]. Tuo tarpu nė viena Lietuvos nuotekų valykla neturi įsidiegusi efektyvios šilumos atgavimo sistemos.

1.4 Šilumos atgavimo iš nuotekų būdai ir šilumos atgavimas nuotekų valykloje

Šilumos atgavimas iš nuotekų yra vykdomas trimis būdais [2, 7, 6]. Pirmasis būdas – šiluma atgaunama individualiame namų ūkyje, antrasis – pasirinktoje kanalizacijos sistemos atkarpoje ir trečiasis – nuotekų valykloje. Pastarieji būdai pavaizduoti 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Šilumos atgavimo būdai: individualiame namų ūkyje (a), kanalizacijos sistemoje (b) arba nuotekų valykloje (c) [7]

Pirmuoju ir antruoju 1.1 paveikslo atvejais (a ir b) šiluminė energija atgaunama iš nuotekų srauto, o trečiuoju – iš išvalytų nuotekų (c).

Individualaus sektoriaus (gyvenamasis pastatas ar komercinis paslaugų) ir kanalizacijos sistemomis cirkuliuojantis nuotekų debitas yra paprastai nefiksuojamas [2]. Vandens vartojimo apskaitos sistemoje fiksuojamos tik sunaudojamo geriamojo vandens (tiek šilto, tiek šalto) kiekis. Tuo tarpu į nuotekų valyklą atitekančios nuotekos visada kontroliuojamos, t. y. sisteminami atitekančių srautų debitai – vienas iš šilumos atgavimo privalumų nuotekų valykloje

[24]. Žinant atitekančio debito kiekį, galima paskaičiuoti šilumos kiekį nuotekose pagal 2.1 ir 2.2 formules (žr. 2 skyriuje) [2].

Nuotekų valyklose šilumos atgavimas iš nuotekų kompensuoja elektros energijos suvartojimą, kuris, kaip buvo minėta anksčiau, reikalingas nuotekų valymo įrenginių funkcijai atlikti. Taip pat šios šilumos atgavimo strategija – puikus tvaraus energijos naudojimo teisinės sistemos tobulinimo pagrindas [25].

Pastaruoju metu pastebima tendencija daugelyje pasaulio miestų – didėjantis nuotekų kiekis [11]. Susidarančių nuotekų didėjimas pastebimas ir Lietuvos miestuose. Puikus to pavyzdys – Kaunas. Lyginant 2014–2016 m. duomenis. UAB "Kauno vandenys" nuotekų valykloje išvalyta:

- ✓ 2016 m. 25,90 mln. m³ arba 14,71 % daugiau nei 2015 m. nuotekų;
- ✓ 2015 m. 22,09 mln. m³ arba 0,3 % daugiau nei 2014 m. nuotekų;
- ✓ 2014 m. 22,02 mln. m³.

Kasmet Kauno nuotekų valykla išvalo vis didesnę susidarančių nuotekų kiekį. Išvalytos nuotekos išleidžiamos į netoliese esantį vandens telkinį – Nemuną.

1.4.1 Kauno nuotekų valyklos apžvalga

Šiame poskyryje visa informacija surinkta UAB „Kauno vandenys“ nuotekų valykloje atliktos praktikos metu.

UAB „Kauno vandenys“ nuotekų valykla įsikūrusi pietvakarinėje miesto teritorijoje, Marvelės g. 199A, LT-46201. Oficialus objekto statybos atidarymas įvyko 1992 m. pavasarį. Tačiau tik 2008 m. nuotekų valykla pradėjo efektyviai valyti nuotekas, įdiegus naują biologinio valymo su azoto ir fosforo šalinimu nuotekų valymą. Ši naujovė iš esmės pagerino ekologinę padėtį Kaune ir pagaliau šis miestas išbrauktas iš Baltijos jūros teršėjų sąrašo⁴.

Nuotekų valymo ir dumblo apdoravimo technologiniai procesai yra automatizuoti. Jų stebėjimai sekami iš nuotekų valymo centrinio valdymo pulto, kuris laikomas pagrindine darbo stotimi valykloje. Stotyje įdiegta valdymo ir informacinė SCADA sistema, vizualiai atvaizduojanti nuotekų valymo įrenginius, jų tarpusavio ryšius ir matavimo prietaisų informaciją. Įdiegta sistema palengvina įmonės valdymą, kadangi visi technologiniai procesai, jiems kontroliuoti reikalingi parametrai ir jų kitimo grafikai laiko bėgyje matomi centriniam valdymo

⁴ Kovai su Baltijos jūros tarša 1974 m. buvo pasirašytas Helsinkio konvencijos tekstas, kuris atnaujintas 1992 m. ir kuriame nurodytas didžiausias Baltijos teršėjų sąrašas. Tarp 146 sąraše paminėtų miestų kaip „karštasis taškas“ įtrauktas ir Lietuvos miestas Kaunas.

pulte. Ši programinio valdymo sistema taip pat ruošia paros, mėnesio valyklos darbo ataskaitas, jas archyvuoja ir pagal poreikį spausdina.

Kauno mieste nėra lietaus surinkimo sistemos tinklo, todėl po lietaus visas nutekantis vanduo suteka į bendrą nuotekų sistemą. Kritulių vandens srautas atitinkamai praskiedžia įprastas miesto nuotekas. Susidaręs bendras nuotekų srautas yra valomos Kauno nuotekų valykloje. Dėl šios priežasties į valyklą atitekančių nuotekų debitas priklauso nuo meteorologinių sąlygų (kritulių kiekio). Siekiant Kauno miesto nuotekų srauto optimizavimo, ateityje turėtų būti svarstoma apie atskirą kritulių surinkimo sistemos įdiegimą mieste.

1.4.1.1 Nuotekų valymo ūkis

Yra išskiriami du pagrindiniai nuotekų valymo sektoriai, kuriuose vykstantys procesai pavaizduoti technologinėse schemose: nuotekų valymo ūkis [26] ir dumblo ūkis (žr. 1.2 pav. ir 1.3 pav.).

Miesto nuotekos į valyklą atiteka trimis vamzdžiais. Kiekvieno vamzdžio skersmuo yra 1,2 m. Stambūs nešmenys (apie 250 t/metus) yra sulaikomi grotose, kurių tankumas 3 mm. Smėlis yra nusodinamas aeruojamose smėliagaudėse. Nešmenys nusauginami presu, o smėlis separatoriumi (apie 190 t/metus). Visos šios nusausintos atliekos specialiomis mašinomis išvežamos į Lapių sąvartyną.

Kauno miesto nuotekos mechanškai yra valomos 2 pirminiuose sėsdintuvuose (abiejų diametras po 40 m, gylis – 3 m, o bendras sėsdintuvų tūris – 7536 m³). Susidaręs pirminis (arba žalias) dumblas (apie 250 m³/d) iš sėsdintuvų šalinamas siurbliais į metantankų siurblynėje esantį rezervuarą. Plaukiojančios medžiagos nuo sėsdintuvų paviršiaus šalinamos siurbliais į nuotekų valyklos priėmimo kamerą.

Biologinį valymą sudaro 4 lygiagrečios technologinės linijos. Kiekvienoje jų yra 1674 m³ talpos biologinio fosforo šalinimo reaktorius ir vienalaikės nitrifikacijos–denitrifikacijos reaktorius, kurio talpa yra 15165 m³. Bendras aerotankų tūris – 67356 m³. Projektinė aktyviojo dumblo koncentracija – 4,8 g/l (prie 81890 m³/d paros nuotekų debito). Į šiuos reaktorių, kuriuose palaikomas anaerobinės sąlygos, patenka jau susimaišęs su nuotekomis cirkuliacinis veiklusis dumblas. Dumblas maišomas lėtaeigėmis maišyklėmis. Pagrindinė fosforo dalis virsta ištirpusiais fosfatais, kuriuos tolesniam valymo procese įsisavina veiklusis dumblas.

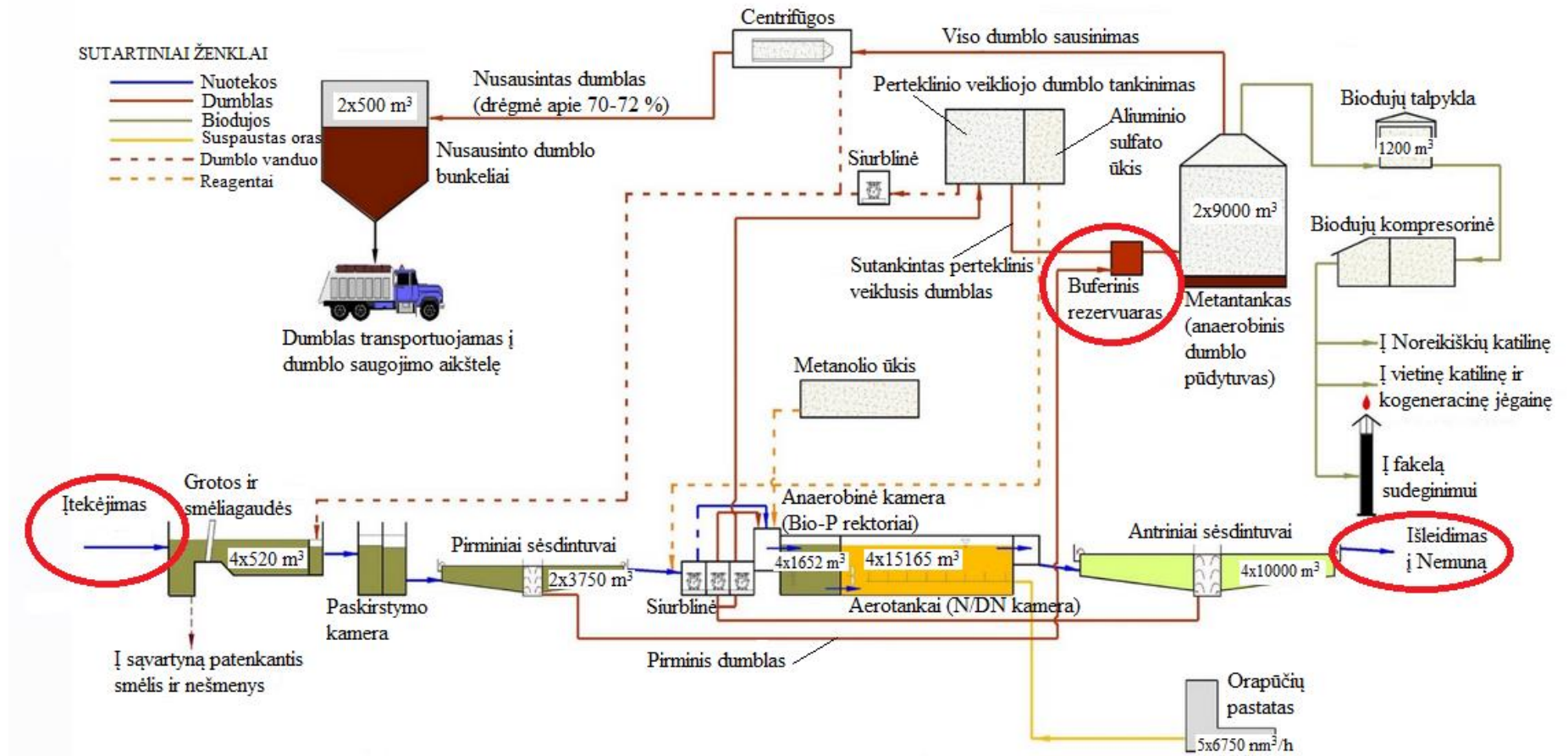
Nitrifikacijos–denitrifikacijos reaktoriuose (aerotankuose) vyksta organinių ištirpusių teršalų skaidymas ir azoto šalinimas (nitrifikacija ir denitrifikacija lygiagrečiai). Tam, kad būtų užtikrintos tiek nitrifikacijos, tiek denitrifikacijos sąlygos, reikalinga palaikyti optimalią ištirpusio deguonies koncentraciją (apie 0,15–0,3 g/l). Kiekviename reaktoriuje matuojama

veikliojo dumblo koncentracija, optimali ištirpusio deguonies koncentracija ir nuotekų temperatūra.

Paskirstymo pastate – siurblinėje sumontuoti nuotekų pakėlimo ir cirkuliacinio veikliojo dumblo pakėlimo siurbliai, kurių pajėgumas 1800–2200 m³/h. Kai atitekančių nuotekų debitas viršija 5855 m³/h, šį dydį viršijantis kiekis teka tiesiai į išleidimą.

Denitrifikacijos procese nitratai skyla iki dujinio azoto ir deguonies. Susidaręs deguonis sunaudojamas lengvai skaidomų organinių junginių (numatyta naudoti metanolį) biocheminei oksidacijai. Metanolis saugomas 30 m³ plieninėje talpoje. Projekte nurodyta metanolio dozė – 1,4 t/parą, esant 81890 m³/d nuotekų kiekiui.

Antrinių sėsdintuvų funkcijas atlieka buvę pirminiai sėsdintuvai, atlikus tam tikrą jų rekonstrukciją. Vieno sėsdintuvo sėsdinimo zonos tūris yra apie 8000 m³. Antriniuose sėsdintuvuose sutankėjęs veiklusis dumblas yra atgal tiekiamas į paskirstymo pastatą – siurblinę. Cirkuliacinio dumblo koncentracija būna apie 8–11 g/l. Sėsdintuvuose atsiradusios plaukiojančios medžiagos nuvedamos į valymo įrenginių veikimo pradžios etapą.



1.2 pav. Kauno miesto nuotekų valyklos technologinė schema [26]

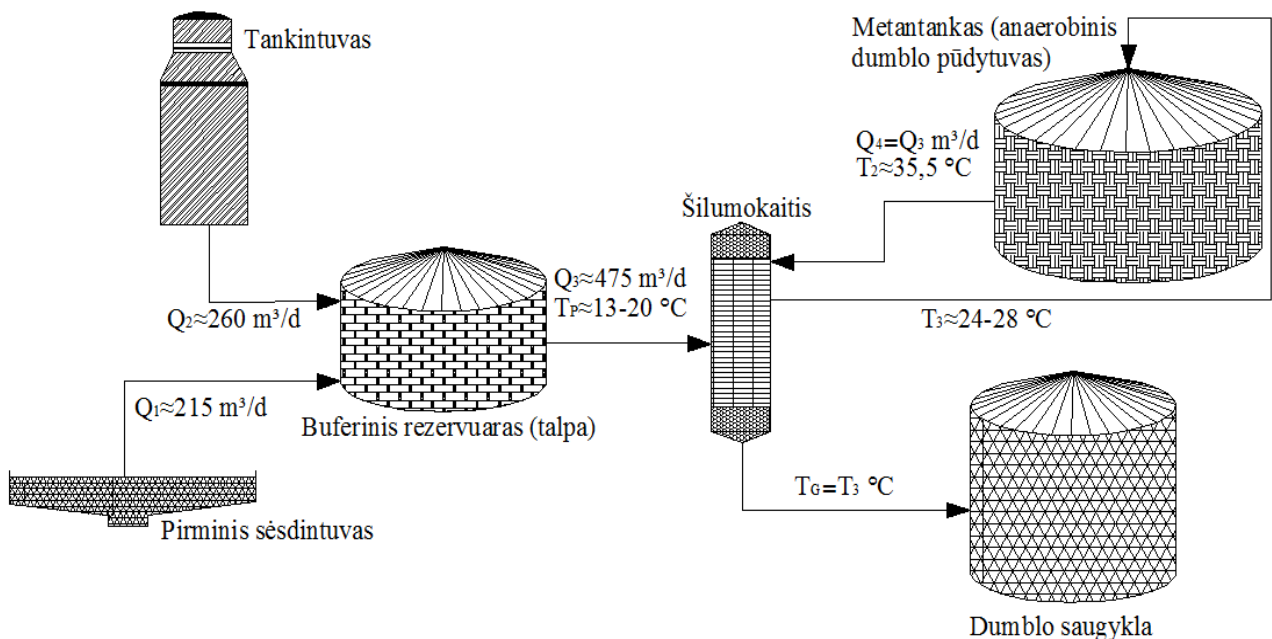
1.4.1.2 Dumblo ūkis

Biologiniu būdu valant nuotekas susidaro perteklinis veiklusis dumblas. Prieš paduodant jį į pūdymą, reikalinga dumblą sutankinti, t. y. padidinti jo koncentraciją, o taip pat sumažinti tūrį nuo 4,5 iki 6,0 kartų. Dumblo sutankinimui pastatyti 3 tankintuvai. Kiekvieno jų našumas yra iki $50 \text{ m}^3/\text{val.}$ Prieš tankinimą į dumblą įvedamas katijoninis neaukšto polimerizacijos laipsnio flokuliantas. Dumblo tankinimo procese atsiskyres filtratas per vietinę siurblinę nukreipiamas į valymo įrenginių priekį.

Dumblo pūdymui yra naudojami 2 metantankai. Vieno metantanko tūris siekia 8800 m^3 . Atlikusio dumblo laikymui įrengtos dvi dumblo saugyklos, kurių bendras tūris 9000 m^3 . Komplexo aptarnavimui naudojama dumblo siurblinė. Sulaikytas pirminiuose sėsdintuvuose ir sutankintas perteklinis dumblas siurbliais tiekiamas į dumblo siurblinės rezervuarą, kuri dar vadinamas bufertanku. Iš šio rezervuaro dumblas patenka į dirbantį metantanką, kuriame vykdomas anaerobinis pūdymo procesas. Optimali mezofilinio pūdymo temperatūra yra $34\text{--}35 \text{ }^\circ\text{C}$. Reikiama temperatūra palaikoma šilumokaičiu „dumblas / vanduo“ pagal automatinio valdymo programą. Dumblas dalinai pašildomas naudojant išpūdytą dumblą bei taikant „dumblas / dumblas“ šilumokaičius. Paprastai temperatūra yra pakeliama $7\text{--}12 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dumblo sausinimui sumontuotos 4 centrifūgos. Nusausinto dumblo drėgmė, sausinant pirminio ir perteklinio dumblo mišinį, siekia apie $73\text{--}75 \%$.

Kauno nuotekų valykloje esanti dumblo ūkio technologinė schema su atitinkamomis srautų temperatūromis pavaizduota 1.3 paveiksle.



1.3 pav. Kauno nuotekų valyklos dumblo ūkio technologinė schema

Paveiksle (žr. 1.3 pav.) pavaizduoti vidutiniai paros debitai ir jų srautų temperatūros dumblo ūkyje. Dumblo ūkio sistemos veikimo principas:

1. Tuo pačiu metu į buferinį rezervuarą yra paduodami du dumblo srautai. Iš pirminių sėsdintuvų paduodamas apie $215 \text{ m}^3/\text{d}$ žaliojo dumblo Q_1 kiekis ir iš dumblo tankintuvų rezervuaro paduodamas apie $260 \text{ m}^3/\text{d}$ sutankinto perteklinio aktyviojo dumblo Q_2 kiekis. Žaliojo dumblo koncentracija pagal sausas medžiagas yra 45 g/l , o sutankinto perteklinio aktyviojo dumblo – 39 g/l .
2. Iš bufertanko apie $475 \text{ m}^3/\text{d}$ dumblo skirto pūdymui Q_3 yra paduodama į šilumokaitį, kur pūdymui skirto dumblo temperatūra T_P kinta $13\text{--}20 \text{ }^\circ\text{C}$ ribose. Temperatūros kitimą įtakoja sezoniškumas. Šilumokaityje dėl iš metantanko paduodamo šilto dumblo srauto Q_4 , kurio temperatūra T_2 yra pastovus dydis $35,5 \text{ }^\circ\text{C}$, yra pakeliama T_P dumblo temperatūra.
3. Atgal į metantanką paduodamas toks pat dumblo srautas, koks buvo tiekiamas pūdymui skirto dumblo temperatūrai pakelti. Nepanaudojamo dumblo dalis yra transportuojama į dumblo saugyklą. Į saugyklą transportuojamo dumblo ir atgal į metantanką tiekiamo dumblo srautų temperatūros lygios, t. y. T_G lygus T_3 ir priklausomai nuo sezoniškumo kinta nuo $24 \text{ }^\circ\text{C}$ iki $28 \text{ }^\circ\text{C}$ ribose.
4. Šilumos atgavimo procesas yra vykdomas iš pakankamai aukštos temperatūros ($24\text{--}28 \text{ }^\circ\text{C}$) dumblo srauto, kuris vėliau atsiduria dumblo saugykloje.

1.4.2 Šilumos atgavimo vietų identifikavimas Kauno nuotekų valykloje

Siekiant atrasti šilumos atgavimo vietas nuotekų valykloje, dažnai kyla klausimų, kokiais kriterijais remtis ar į ką reikėtų atsižvelgti, parenkant optimaliausią šilumos atgavimo tašką nuotekų valykloje, ar kurioje vietoje tikslingiausia projektuoti šilumos atgavimo įrenginį? Vietų, kuriose galėtų vykti šilumos atgavimo procesai iš nuotekų, yra keletas, todėl svarbu įvertinti tokius kriterijus: atitekančių nuotekų temperatūrą, atstumą tarp pagrindinių miesto kanalizacijos centrų ir nuotekų valykloje naudojamą valymo būdą.

UAB „Kauno vandenys“ nuotekų valykloje galimos kelios šilumos atgavimo vietos, kurias pažymėtos 1.2 paveiksle. Pirmoji šilumos atgavimo vieta – atitekančių į valyklą nuotekų vamzdis, antroji – dumblo ūkis, trečioji – išvalytų nuotekų išleidimo į Nemuną vieta.

Toliau pateikiami detalesni kriterijų aprašai, kuriais vadovaujantis išskiriama optimali Kauno nuotekų valyklos vieta, kurioje rekomenduojama statyti įrenginius hidrotermininei energijai atgauti.

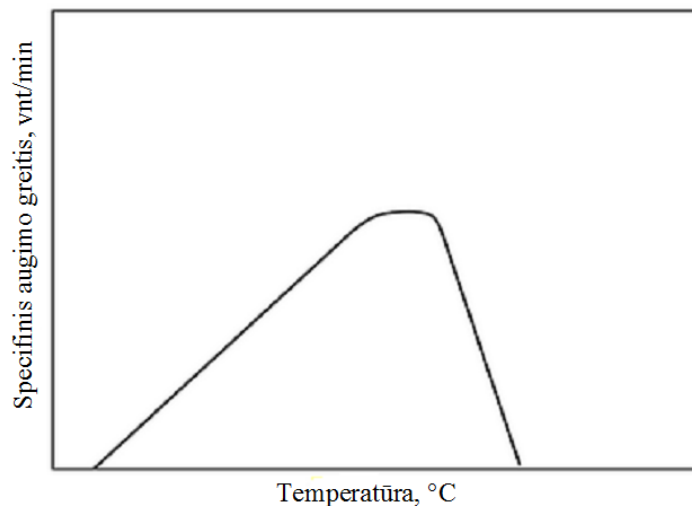
Nuosekliai analizuojat Kauno nuotekų valyklos technologinę schemą (žr. 1.2 pav.), pirmoji galima šilumos atgavimo vieta – nuotekų atitekėjime. Šioje vietoje į Kauno nuotekų valyklą

atitekančių nuotekų vidutinė temperatūra yra apie 15 °C. Tokią atitekančių nuotekų temperatūrą lemia tai, kad šaltos ir karštos nuotekos iki šiol miestų nuotekų tinkluose išleidžiamos į bendrą kanalizacijos sistemą [2]. Vartotojams yra tiekiamas 40–50 °C temperatūros karštas vanduo [24], kuris dažniausiai naudojamas dušo kabinose, voniose, indaplovių ir skalbimo mašinų darbui užtikrinti ir kitur. Karšto vandens buityje sunaudojama apie 60 %, todėl viena iš buitines nuotekas charakterizuojančių savybių yra sąlyginai aukšta temperatūra [2].

Kauno mieste yra naudojama bendra miesto nuotekų surinkimo sistema. Dėl šios priežasties, esant dideliame kritulių kiekiu, bendra nuotekų temperatūra gali nukristi keletą laipsnių. Šaltas kritulių nuotekų srautas praskiedžia žymiai aukštesnės temperatūros miesto nuotekas. Kauno nuotekų valykla yra įsikūrusi miesto teritorijoje, kas itin naudinga, siekiant mažesnių nuotekų šilumos nuostolių.

Atitekančio nuotekų srauto dydis priklauso nuo vartotojų sunaudojamo vandens kiekio. Šis sunaudojimas skiriasi darbo ir poilsio dienomis, keičiantis klimatinėms sąlygoms, ilgujų atostogų metu ir kt. [2, 19].

Kauno nuotekų valykla naudoja biologinio valymo technologiją, kurios metu mikroorganizmai suskaido ir maistui sueikvoja nuotekose esančius organinius teršalus ir mineralines medžiagas. Tokiu būdu vykdomas vandens valymas. Biologinio valymo efektyvumą įtakoja pradinė nuotekų temperatūra. Keliant temperatūrą, reakcijos greitis atitinkamai didėja iki tol, kol galiausiai yra pasiekama maksimali temperatūra, kuri pradeda neigiamai veikti mikroorganizmų ląstelių struktūrą [27]. Prasideda ląstelių irimo etapas. Mikroorganizmų augimo priklausomybė nuo temperatūros pateikiama 2.4 paveiksle.



1.4 pav. Mikroorganizmų populiacijos augimo greičio priklausomybės nuo temperatūros [27]

Siekiant efektyvaus biologinio valymo proceso, stengiamasi išlaikyti kuo aukštesnę valomų nuotekų temperatūrą, todėl nerekomenduojama šilumos atgavimo iš nuotekų technologijos taikyti prieš biologinio valymo etapą.

1.5 Nuotekų šilumos atgavimo technologijos

Nuotekose esanti šiluma (hidroterminė energija) gali būti panaudojama atsinaujinančios energijos gamybai, naudojant šilumokaičius, šilumos siurblius ar komplektuotas jų technologijas.

1.5.1 Šilumokaičiai

Šilumokaičiai pagal šilumos atgavimo iš nuotekų būdą skirstomi į dvi grupes: vidinius (įrengiami nuotekų vamzdyno viduje) ir išorinius. Nuotekų vamzdynų viduje įrengtos šilumokaičių konstrukcijos pateiktos 1.5 ir 1.6 paveiksluose.



1.5 pav. Šilumokaitis integruotas nuotekų vamzdyno viduje [28]



1.6 pav. Nuotekų vamzdyno rekonstrukcija, įterpiant šilumokaičio sistemą [28]

Šilumokaičių, kurie integruoti nuotekų vamzdynų sistemose, optimaliam veikimui ir ilgai eksploatacijai užtikrinti keliami šie reikalavimai [7]:

- ✓ visa konstrukcija gaminama iš nerūdijančio plieno;
- ✓ užtikrinamas nenutrūkstamas nuotekų srautas;
- ✓ vamzdynų sistemos yra sujungiamos nuosekliai arba serijiniu būdu, naudojant tarpines grandis;
- ✓ vamzdžio, kuriuo teka nuotekos, skersmuo turi būti ne mažesnis kaip 800 mm;
- ✓ pratekančio srauto kiekis ne mažesnis kaip 30 l/s;
- ✓ nuotekų srautu padengtas kanalizacijos vamzdžio paviršiaus plotas sudaro ne mažiau kaip 0,8 m² metrui kanalizacijos ilgio.

Pastarosios technologijos privalumai [7, 28]:

- ✓ mažesnis pagalbinės elektros energijos suvartojimas;

- ✓ surenkami betoniniai vamzdžių elementai, kuriuose integruoti šilumokaičiai, gali būti panaudojami naujų projektų įgyvendinimui.

Išorinių šilumokaičių privalumai [7]:

- ✓ didesnės pritaikymo galimybės, kadangi skerspjūvio skersmuo ir nuotekų vamzdinių sistemos nuolydis nedaro jokios įtakos technologijos efektyvumui;
- ✓ paprastesnė įrenginio eksploatacija;
- ✓ šilumos perdavimo galia gali siekti daugiau nei 50 MW.

Šilumokaičiai gali būti įmontuojami į seniai veikiančias arba naujai projektuojamas nuotekų vamzdinių sistemas.

Įvairių tipų šilumokaičiai yra naudojami siekiant iš nuotekų atgauti hidroterminę energiją. Jie klasifikuojami pagal konstrukcijos ir lokalizacijos ypatumus (žr. 1.7 pav.) [29]:

- ✓ šilumokaitis įmontuotas nuotekų vamzdyje;
- ✓ šilumokaitis integruotas konkrečioje nuotekų vamzdžio sienelės dalyje;
- ✓ šilumokaitis su nuotekų vamzdžiu specialiai integruotame izoliaciniame vamzdyje;
- ✓ dvigubo vamzdžio šilumokaitis.



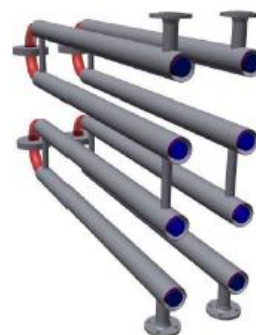
(a)



(b)



(c)



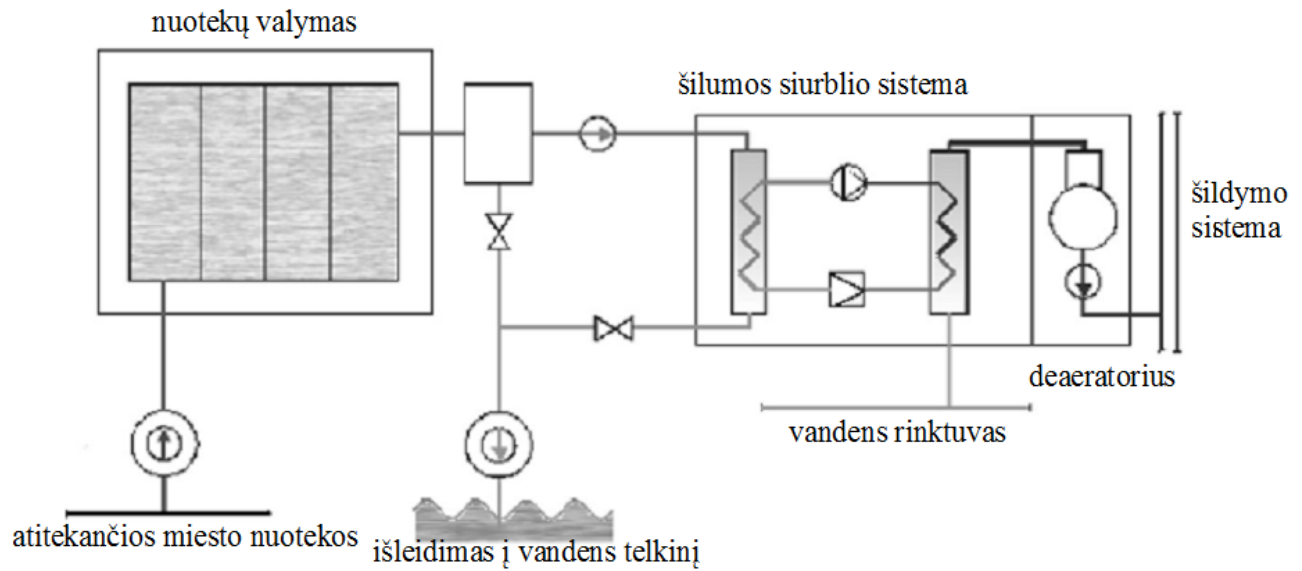
(d)

1.7 pav. Šilumokaičių tipai: a) nerūdijančio plieno šilumokaitis įmontuojamas vamzdžio apatinėje dalyje; b) šilumokaitis integruotas konkrečioje nuotekų vamzdžio sienelės dalyje; c) šilumokaitis su nuotekų vamzdžiu specialiai integruotame izoliaciniame vamzdyje; d) dvigubo vamzdžio šilumokaitis [29]

Šilumos atgavimo technologijos pasirinkimas konkrečiu Kauno nuotekų valyklos atveju aptariamas antrame skyriuje („Metodinė dalis“). Šiame skyriuje pateikiamas pasirinktos technologijos aprašymas, pagrindinės sąlygos.

1.5.2 Šilumos siurbliai

Šilumos siurbliu yra vadinamas įrenginys, kuris šiluminę energiją iš jos šaltinio perduoda į paskirties vietą (vartotojui) [30]. Šilumos siurblio sistema pavaizduota 1.8 paveiksle.



1.8 pav. Šilumos siurblio sistema nuotekų valykloje [32]

Pagrindiniai šilumos siurblio sistemos komponentai [30, 32]:

- ✓ kompresorius;
- ✓ kondensatorius;
- ✓ garintuvas;
- ✓ išsiplėtimo vožtuvas.

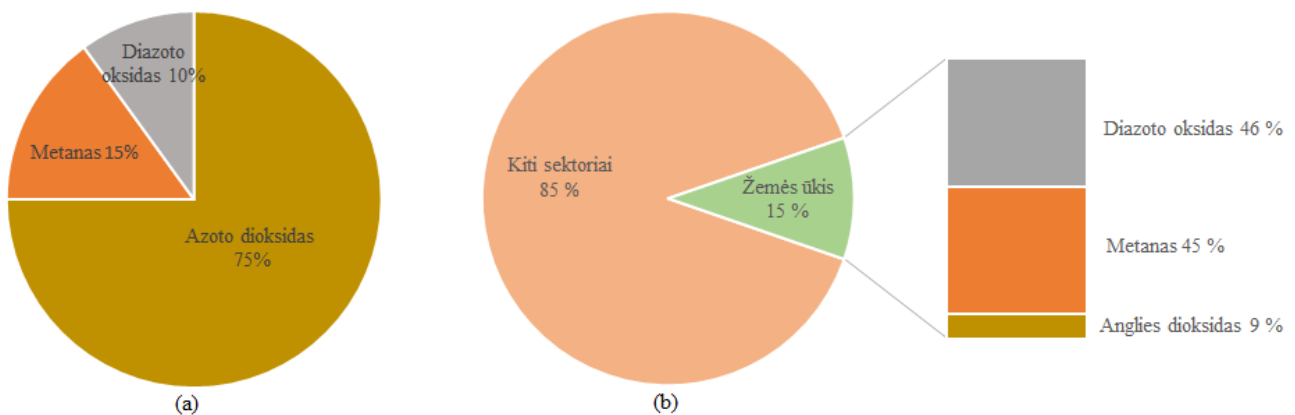
Šilumos siurblius charakterizuojantis dydis – naudingumo koeficientas, kuris dažnai dar vadinamas šildymo efektyvumo koeficientu (COP). Šis koeficientas įvertina, kiek kartų išsiskyręs šilumos srautas yra didesnis už jam suteiktą darbą siurblio ciklui įvykdyti [2], t. y. parodo, kiek pagamintos šilumos (kW) tenka 1 kW sunaudotos elektros energijos. Nuotekų šilumos siurblių sistemų COP reikšmė priklauso nuo nutekamojo vandens srautų temperatūros. Atliktų tyrimų metu [31] buvo įvertinta, kad COP reikšmė nuotekose praktiškai nesikeičia, kadangi jų temperatūros svyravimai yra nedideli. Žiemos metu šilumos siurblių sistemų COP kinta 1,77–10,63 ribose, o vasaros metu ši reikšmė kinta tarp 2,23–5,35 [30]. Efektyvumo koeficientų reikšmė didėja mažėjant temperatūrų skirtumui tarp dviejų šaltinių [2].

Pramoninių nuotekų temperatūra dažniausiai siekia 30–40 °C. Tokių nuotekų COP reikšmė siekia 7–8 šilumos siurblių sistemose. Didžiausi trūkumai projektuojant šilumokaičių siurblių sistemas pramoninio tipo nuotekose: šio tipo nutekamuosiuose vandenyse dažnai pasitaiko korozijos procesą sukeliančių komponentų, nuotekų kiekiai nėra tokie dideli kaip miestų nuotekų valyklose, kur suteka visos atitinkamo miesto nuotekos, todėl atgaunamos šilumos kiekiai yra mažesni [31, 32].

Miesto nuotekose dėl didelio vandens srauto kaupiasi žymiai didesnis šilumos kiekis. Paprastai miestų nuotekų temperatūra žiemos laikotarpiu siekia 10–15 °C. Tokių nuotekų COP reikšmė neviršija 3,5–4 [30]. Kitu atveju, kai nuotekų temperatūra yra apie 10 °C, COP reikšmė siekia nuo 3,25 iki 3,5. Temperatūrai tendencingai kylant kas 2 °C, COP reikšmė taip pat padidėja 0,3 [2].

1.6 Hidroterminės energijos atgavimas – svarbi priemonė mažinant šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją

Pagrindinės šiltnamio efektą sukeliančios dujos, atsiradusios dėl antropogeninio poveikio yra anglies dioksidas (CO_2), metanas (CH_4) ir diazoto oksidas (N_2O). Šios dujos turi skirtingą globalinio šiltėjimo potencialą⁵, kurį lemia dujų absorbcinės savybės (absorbuojant saulės energiją) ir dujų gyvavimo trukmė atmosferoje. CO_2 globalinis šiltėjimo potencialas yra lygus 1, CH_4 – 25, o N_2O – 298. Pagrindinė CO_2 emisijos priežastimi yra laikoma iškastinio kuro naudojimas, kai tuo tarpu CH_4 ir N_2O – žemės ūkio veikla [33]. Globalus šiltnamio efektą sukeliančių dujų vertinimas pavaizduotas 1.9 paveiksle.



1.9 pav. Globalus šiltnamio efektą sukeliančių dujų vertinimas: a) globalus šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos profilis lyginant su anglies dioksido ekvivalentu; b) žemės ūkio įtaka šiltnamio efektui ir žemės ūkio šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų profilis pagal anglies dioksido ekvivalentą [30]

Į atmosferą išmetami CO_2 kiekiai sudaro net 75 % šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos. Didžiausius CO_2 išmetimus lemia iškastinio kuro naudojimas pasaulyje, todėl ypač svarbu optimizuoti visas šio kuro panaudojimo sritis. Plačiausia iškastinio kuro panaudojimo sritis yra energetikos pramonė, kur, deginant iškastinį kurą, generuojami elektros ir šiluminės energijos kiekiai [30]. Siekiant sumažinti iškastinio kuro panaudojimą, reikiamas energijos poreikis gali būti kompensuojamas tikslingai pritaikant gamybinio proceso metu į aplinką išmetamą hidroterminę energiją. Hidroterminės energijos panaudojimas yra svarbi priemonė mažinant šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją [2, 6, 7, 34]. Pasauliniu mastu dideli hidroterminės energijos (šilumos) kiekiai susidaro nuotekų valyklose. Ne išimtis – Kauno nuotekų valykla, kurioje dideli šilumos kiekiai kaupiasi nuotekų srautuose ir iki šiol nėra atgaunami.

⁵ Globalinis šiltėjimo potencialas (GWP) - rodiklis, apibūdinantis šiltnamio efektą įtakančių dujų sukeliama klimato šiltėjimo potencialo vertę, lyginant su anglies dioksido ekvivalentu. GWP apskaičiuojamas pagal vieno kilogramo dujų sukeliama šiltėjimo potencialą, lyginant su vienu kilogramu CO_2 , per šimto metų laikotarpį.

1.7 Literatūros apžvalga

Griežtėjantys išvalyto vandens kokybės reikalavimai ir didėjantis susidarančių miesto nuotekų kiekis yra pagrindiniai veiksniai, darantys įtaką augančioms energijos sąnaudoms ir kylančiai vandens išvalymo kainai. Dėl to pradedama ieškoti alternatyvių energijos atgavimo šaltinių. Vienas jų – nuotekos, kurios apibūdinamos kaip koncentruotu šilumos šaltiniu. Šilumai iš nuotekų atgauti yra naudojami šilumokaičiai arba šilumos siurblių technologijų sistemos. Dažnai šios technologijos taikomos nuotekų valyklose, kur cirkuliuoja dideli nuotekų srautai su ganėtinai aukšta temperatūra. Šilumos atgavimo galimybė nagrinėjama UAB „Kauno vandenys“ nuotekų valykloje. Įmonės duomenimis 2014–2016 m. laikotarpyje išvalytų nuotekų kiekis padidėjo 4 mln. m³. Augančių nuotekų kiekis, patenkantis į Kauno nuotekų valyklą, sąlygoja didesnius sueikvojamos energijos kiekius, kurie reikalingi siekiant užtikrinti efektyvų nuotekų valymo įrenginių eksploatavimą.

Remiantis atlikta analize galima teigti, kad nėra vieno universalaus metodo, pagal kurį būtų parenkama šilumos atgavimo įrenginio tinkamiausia vieta nuotekų valyklos technologiniame procese. Šiam tikslui rekomenduotina atsižvelgti į 2.4.2 poskyryje nurodytus kriterijus. Jais remiantis, nerekomenduojama Kauno nuotekų valykloje šilumos atgavimo technologijas taikyti prieš nuotekų valymą. Kadangi biologinio valymo procesą, svarbiausią nuotekų valymo etapą, gerina aukštesnė nuotekų temperatūra. Optimalus sprendimas – šilumos atgavimo iš nuotekų technologijų sistemas taikyti buferiniame rezervuare (dumblo ūkyje) ir prieš išvalytų nuotekų išleidimą į Nemuną. Šilumos iš nuotekų atgavimo proceso metu siekiama susigrąžinti išmetamo dumblo nuotekose esančią šilumą, kuri susidaro dėl pakankamai aukštos 24–28 °C dumblo temperatūros, ir išleidžiamose išvalytose nuotekose esančią šilumą. Dėl atgavimo proceso būtų išvengta didelių šilumos nuostolių.

Hidroterminės energijos atgavimas ir saugojimas – svarbus įrankis mažinant šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją. Taikant šilumos atgavimo iš nuotekų technologijas, labiausiai sumažinami anglies dioksido išmetimai į atmosferą. Svarbu optimizuoti pagaminamos energijos kiekius, kuriam pagaminti yra deginamas iškastinis kuras. Reikiamas energijos poreikis ar dalis jo gali būti kompensuojamas tikslingai panaudojant nuotekų valyklose susidariusią hidroterminę energiją.

2 METODINĖ DALIS

2.1 Darbo metodologija

Tyrimo metodika šilumos atgavimo potencialui įvertinti UAB „Kauno vandenys“ nuotekų valykloje remiasi nuotekų valymo technologinių procesų ir šilumos atgavimo metodų mokslinės literatūros analize. Tiriamojo darbo metu buvo atliekama:

- ✓ Kauno nuotekų valyklos debitų, vyraujančių srautų temperatūrų ir kt. parametru sistemimas;
- ✓ nuotekų valyklos svarbiausių parametru, kurie turi įtakos šilumos kiekio skaičiavimams nustatyti, statistinis vertinimas pagal 2016 metų valyklos technologinius procesus ir šilumos srautų analizę;
- ✓ hidroterminės energijos kiekio skaičiavimas;
- ✓ CO₂ emisijos sumažėjimo įvertinimas remiasi netiesioginio poveikio vertinimo metodika [32]. Šios emisijos sumažėjimą lemia iš nuotekų atgautos hidroterminės energijos panaudojimas, kai Kauno nuotekų valykloje veikia šilumos atgavimo technologinė sistema. Naudojant šią technologiją yra atgaunamas apskaičiuotas hidroterminės energijos kiekis valykloje.
- ✓ metiniai anglies dioksido, azoto oksidų ir anglies monoksido teršalų emisijų sumažėjimų apskaičiavimas;
- ✓ šilumos atgavimo iš nuotekų įrenginio parinkimas [29] ir modeliavimas Kauno nuotekų valykloje.

Visi skaičiavimai buvo atlikti remiantis realiais Kauno nuotekų valyklos ataskaitiniais (2016 metų) duomenimis.

2.2 Technologinio proceso monitoringas ir duomenų analizė Kauno nuotekų valykloje

Kauno miesto nuotekų valykloje nuolatos vykdomas nuotekų monitoringas. Nuotekų valymo ir dumblo apdorojimo technologiniai procesai yra pilnai automatizuoti. Procesus nuolat sistemina anksčiau minėta SCADA valdymo informacinė sistema. Jų stebėjimas ir valdymas vykdomas iš nuotekų valyklos centrinio valdymo pulto. Viso tyrimo metu buvo remtasi Kauno nuotekų valyklos monitoringo (2016 metų) duomenimis.

Siekiant apskaičiuoti atgaunamą šilumos kiekį Kauno nuotekų valyklos dumblo ūkyje ir išvalytų nuotekų išleidimo vietoje, svarbu įvertinti pagrindinius parametrus atitinkamu atveju. Pirmiausia įvertinami parametrai dumblo ūkyje: nuotekų dumblo debitai Q_3 ir jų temperatūros (t. y. pradinė dumblo temperatūra T_P iš bufertanko ir dumblo, patenkančio į dumblo saugyklą,

temperatūra T_G) svyravimai 2016 m. laikotarpyje (žr. 1.3 pav.). Šie monitoringo duomenys pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Nuotekų srautų monitoringo duomenys dumblo ūkyje

Mėnuo	Debitas Q_3 , m ³ /mėn.	Dumblo srauto temperatūros, °C	
		Pradinė T_P	Galutinė T_G
Sausis	13883,31	13,5	24,5
Vasaris	13720,60	13,8	24,6
Kovas	15715,54	13,6	24,6
Balandis	16307,18	13,6	24,5
Gegužė	17437,95	16,0	25,8
Birželis	16454,27	19,7	27,6
Liepa	18672,67	20,3	27,9
Rugpjūtis	18758,41	18,9	27,2
Rugsėjis	16024,81	20,7	28,1
Spalis	13733,62	17,4	26,4
Lapkritis	12014,76	14,7	25,1
Gruodis	14459,71	13,1	24,3

Lentelėje nurodyti Kauno nuotekų valykloje susisteminti duomenys, naudojami nustatant atgaunamą šilumos kiekio potencialą iš nuotekų dumblo ūkio sektoriaus.

2.3 Šilumos kiekio skaičiavimas nuotekose

Šilumos kiekio skaičiavimas individualaus atvejo metu gali būti naudingas atrandant ir žymint potencialias terminės energijos atgavimo vietas nuotekų valyklose prieš projektuojant šilumos atgavimo iš nuotekų sistemas.

Šilumos kiekis dumblo ūkyje ir ištekančių išvalytų nuotekų sraute apskaičiuojamas naudojant formulę:

$$Q = c \cdot m \cdot (T_G - T_P) \quad (2.1)$$

čia: Q – atgautos šilumos kiekis per mėnesį, J; c – savitoji šiluma, J/(kg·°C); m – kūno masė, kg; T_P – pradinė dumblo temperatūra, °C; T_G – galutinė temperatūra, °C.

Skaičiuojant šilumos kiekį dumblo ūkyje, pradinė temperatūra yra laikoma dumblo temperatūra iš bufertanko, o galutinė – dumblo, patenkančio į dumblo saugyklą, temperatūra. Kitu atveju, t. y. kai skaičiuojamas šilumos kiekis ištekančių nuotekų sraute, tai pradinė

temperatūra yra laikoma į nuotekų valyklą įtekančių nuotekų temperatūra (lygi 15 °C), o galutinė – ištekančių išvalytų nuotekų temperatūra (lygi 14 °C).

Šilumos kiekis tyrimo metu apskaičiuotas įsivedus papildomus parametrus. Naudojama formulė:

$$Q = c \cdot V \cdot \rho \cdot (T_G - T_P) \quad (2.2)$$

čia: Q – atgautos šilumos kiekis per mėnesį, J; c – savitoji vandens šiluma, J/(kg·°C) (4200 J/(kg·°C)); V – mėnesinis debitas, m³; ρ – vandens tankis, kg/ m³ (1000 kg/ m³); T_P ir T_G – pradinė ir galutinė temperatūros, °C.

Skaičiuojant šilumos kiekį dumblo ūkyje, mėnesiniu debitu yra laikomas nuotekų dumblo srautas atitinkamo mėnesio periode. Kitu atveju, t. y. kai skaičiuojamas šilumos kiekis ištekančių nuotekų sraute, tai mėnesiniu debitu yra laikomas ištekančių išvalytų nuotekų srautas.

2.4 Netiesioginio poveikio vertinimo metodika šiltnamio efektą sukeliančioms anglies dioksido dujoms nustatyti

Sumažėjus ar padidėjus elektros arba šilumos energijos sąnaudoms, reikia įvertinti netiesioginį poveikį aplinkai.

Vienas iš tiriamojo darbo uždavinių – įvertinti, kokios šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos būtų išvengta Kauno nuotekų valykloje, įdiegus šilumos atgavimo technologijų sistemas potencialiose šilumos atgavimo vietose ir atgaunant visą potencialų hidroterminės energijos kiekį. Šiam uždaviniui atlikti buvo remtasi Europos Parlamento ir tarybos direktyva 2003/87/EB [35].

CO₂ emisija yra nustatoma skaičiavimų arba matavimų metu. Skaičiavimai atliekami pagal Komisijos sprendimą, nustatantį šiltnamio dujų išmetimo monitoringo ir ataskaitų teikimo gaires (2004/156/EB) [36]. Naudojama netiesioginio poveikio vertinimo metodika [32].

Darbo metu buvo priimama, kad energija gaminama deginant gamtines dujas. Kuro rūšių aplinkos apsaugos rodikliai (emisijų faktoriai) dideliems kurą deginantiesiems įrenginiams pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Emisijų faktoriai dideliems kurą deginantiems įrenginiams, deginant įvairių rūšių kurą [32, 33, 37]

Deginamas kuras	Kaloringumas ⁶ , GJ/t	Teršalų emisijos faktoriai		
		CO ₂ , kg/GJ	NO _x , g/kg	CO, g/kg
Gamtinės dujos	33,49	56,90	1,00	0,01
Mazutas	39,98	78,00	5,00	0,002
Akmens anglis	25,12	95,00	4,50	0,03

Išmetamas CO₂ kiekis apskaičiuojamas pagal netiesioginio poveikio aplinkai vertinimo metodiką [32]⁷ naudojant formulę:

$$E_{CO_2} = V_D \cdot E_F \cdot O_K \quad (2.3)$$

čia: E_{CO_2} – išmetamas CO₂ kiekis, t; V_D – veiklos duomenys, t. y. per ataskaitinį laikotarpį sunaudoto kuro grynas energijos kiekis. Apskaičiuojamas dauginant suvartoto kuro kiekį iš kuro žemutinės šiluminės vertės; E_F – CO₂ tonų skaičius iš vieno vieneto grynojo energijos kiekio kure (žr. 2.2 lentelę); O_K – oksidacijos koeficientas. Skysčiams ir dujoms šis dydis yra lygus 0,995, o kietam kurui – 0,99.

2.5 Anglies dioksido, azoto oksidų ir anglies monoksido metinės emisijos

Vienos iš pagrindinių šiltnamio efektą sukeliančių dujų yra laikomos CO₂, NO_x ir CO. Kasmetiniai jų išmetimai į atmosferą yra griežtai reglamentuoti. Hidroterminės energijos atgavimo technologijų diegimas nuotekų valyklose yra viena iš šių teršalų išmetimų optimizavimo priemonių. Atliekami skaičiavimai, kurie parodo, kokios metinės CO₂, NO_x ir CO emisijos būtų sumažinta Kauno nuotekų valykloje atgaunant visą potencialų šilumos kiekį (paskaičiuotą pagal 2.1 ir 2.2 formules), kuris kaupiasi nuotekose

Skaičiavimai atlikti remiantis atitinkamų teršalų emisijos faktoriais E_F , kurie pateikiami 2.1 lentelėje. Atliktų skaičiavimų seka:

- ✓ įvertinamas nesudegintų gamtinių dujų kiekis, žinant gamtinių dujų kaloringumą (33,49 GJ/1000 nm³).
- ✓ naudojant atitinkamo teršalo emisijos faktorius, apskaičiuojami sąlyginiai CO₂, NO_x ir CO metiniai emisijos sumažėjimai.

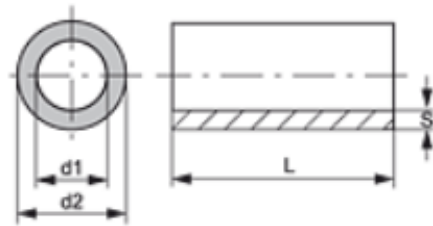
⁶ 1 MWh yra lygi 3,6 GJ.

⁷ Netiesioginio poveikio aplinkai vertinimo metodika pateikiama nurodytos literatūros IV priede, 644 puslapyje.

2.6 Šilumos atgavimo iš nuotekų technologijos taikymas dumblo ūkyje

Optimaliam šilumos atgavimo iš nuotekų technologijos taikymui įvertinamos pagrindinės dumblo ūkyje esančios sąlygos:

- ✓ vidiniai vamzdžių skersmenys, dominuojantys dumblo ūkyje (buferiniame rezervuare), yra 150 mm ilgio (žr. 2.1 pav.). Šilumokaičio parinkimo etape būtina įvertinti vidinį vamzdžio skersmenį;
- ✓ nuotekų dumblo srauto, iš kurio planuojamas šilumos atgavimo procesas, temperatūra siekia 24–28 °C;
- ✓ pratekantis dienos dumblo nuotekų srauto debitas siekia 500 m³/h (žr. 1.3 pav.), o tai atitinka 6 l/s;
- ✓ dumblo nuotekų tekėjimo greitis gali kisti 0,3–1,1 m/s ribose, kai dumblo ūkio siurblio pajėgumas siekia nuo 20 m³/h iki 70 m³/h.



2.1 pav. Dumblo ūkio vamzdynų sistemos dalis Kauno nuotekų valykloje; L – vamzdynų ilgis, d_1 – vidinis skersmuo (150 mm); d_2 – išorinis skersmuo (153 mm)

Į šias sąlygas atsižvelgiama renkantis šilumos atgavimo įrenginį Kauno nuotekų valykloje. Detalesnis projektuojamos šilumos atgavimo sistemos aprašymas, pagrindinės sąlygos ir skaičiavimai pateikiami 3 skyriuje.

2.6.1 Analitinis bendrų šilumokaičio projektavimo sąlygų vertinimas

Projektuojant šilumokaičio sistemas būtina atsižvelgti į jų tipą, nes kiekvienam šilumokaičiui yra būdingas atitinkamas nuotekų srauto tekėjimo greitis (žr. 2.3 lentelę).

2.3 lentelė. Tipinio šilumokaičio techniniai rodikliai [38]

Šilumokaičių tipai		Srauto tekėjimo greitis, m/s	Šilumos perdavimo koeficientas (W/m ² ·K)	Nuotekų šilumos atgavimo patikimumas
Dvigubo vamzdžio		1,00	800	geras
Įmontuoti nuotekų vamzdinių viduje	Įmontuotas apatinėje vamzdžio sienelėje	1,4–2,8	800–850	geresnis
	Kartu su nuotekų vamzdžiu specialiai integruotame izoliaciniame vamzdyje	0,13	120	priimtinas

Prieš projektuojant šilumos atgavimo sistemą iš nuotekų taip pat svarbu įvertinti [29]:

- ✓ atstumą tarp atgautos energijos vartojimo sistemų ir šilumos atgavimo vietas;
- ✓ kuo pastovesnę nuotekų temperatūrą, kuriai esant planuojamas šilumos atgavimo procesas;
- ✓ nuotekų srautą;
- ✓ nuotekų vamzdžio skersmenį;
- ✓ vamzdžiuose dominuojantį slėgį;
- ✓ nuotekų tekėjimo greitį vamzdyje. Rekomenduojama, kad nuotekų tekėjimo greitis būtų kuo didesnis. Mažiausias tikėtinas greitis – 1 m/s. Esant didesniam tekėjimo greičiui yra mažesnė sedimentacijos galimybė.

2.7 Šilumos siurblio parinkimas išvalytų nuotekų išleidimo vietoje

Vadovaujantis statybos techniniu reglamentu [40] yra nustatoma šildymo sistemos šilumos šaltinio projektinė galia, t. y. siurblio galia. Šilumos siurblio galia yra apskaičiuojama pagal formulę:

$$P = \frac{A}{t} \quad (2.4)$$

čia: A – atliktas darbas, MWh; t – trukmė, val.

3 TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

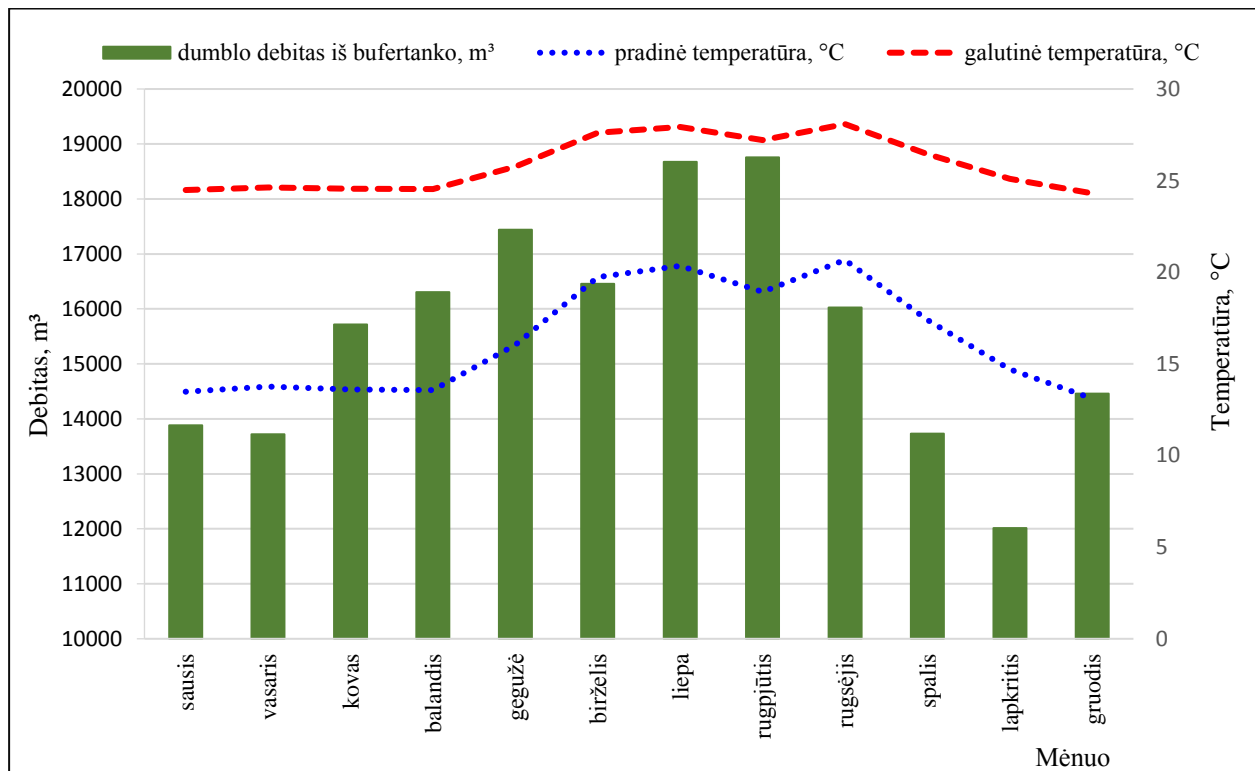
3.1 Šilumos atgavimo potencialo įvertinimas

Tyrimo tikslams registruoti 2016 metų, t. y. sausio – gruodžio mėnesiais į Kauno nuotekų valyklą atitekančių miesto nuotekų pagrindiniai parametrai: debitai nuotekų valymo ir dumblo ūkio sektoriuose, temperatūriniai svyravimai.

Siekiant įvertinti didžiausią šilumos potencialą dumblo ūkyje (žr. 1.2 pav.), visų pirma yra atliekamas tarpinis duomenų (žr. 2.1 lentelės) apdorojimas, kurio metu identifikuojami pagrindiniai dumblo nuotekų parametrų kitimai šiame etape. Pagrindiniai parametrai:

- ✓ mėnesiniai dumblo debitai iš buferinio rezervuaro (bufertanko)⁸ Q_B , m³;
- ✓ atitinkamo mėnesio dumblo temperatūros iš bufertanko, t. y. pradinė temperatūra T_P , °C;
- ✓ dumblo, tiekiamo į saugyklą, temperatūra, t. y. galutinė temperatūra T_G , °C.

Analizuojant 3.1 paveiksle pateiktus monitoringo duomenis, matyti, kad nuotekų debitas iš bufertanko, dumblo srauto temperatūra iš bufertanko ir dumblo, tiekiamo į saugyklą, temperatūra kinta visame 2016 m. laikotarpyje.

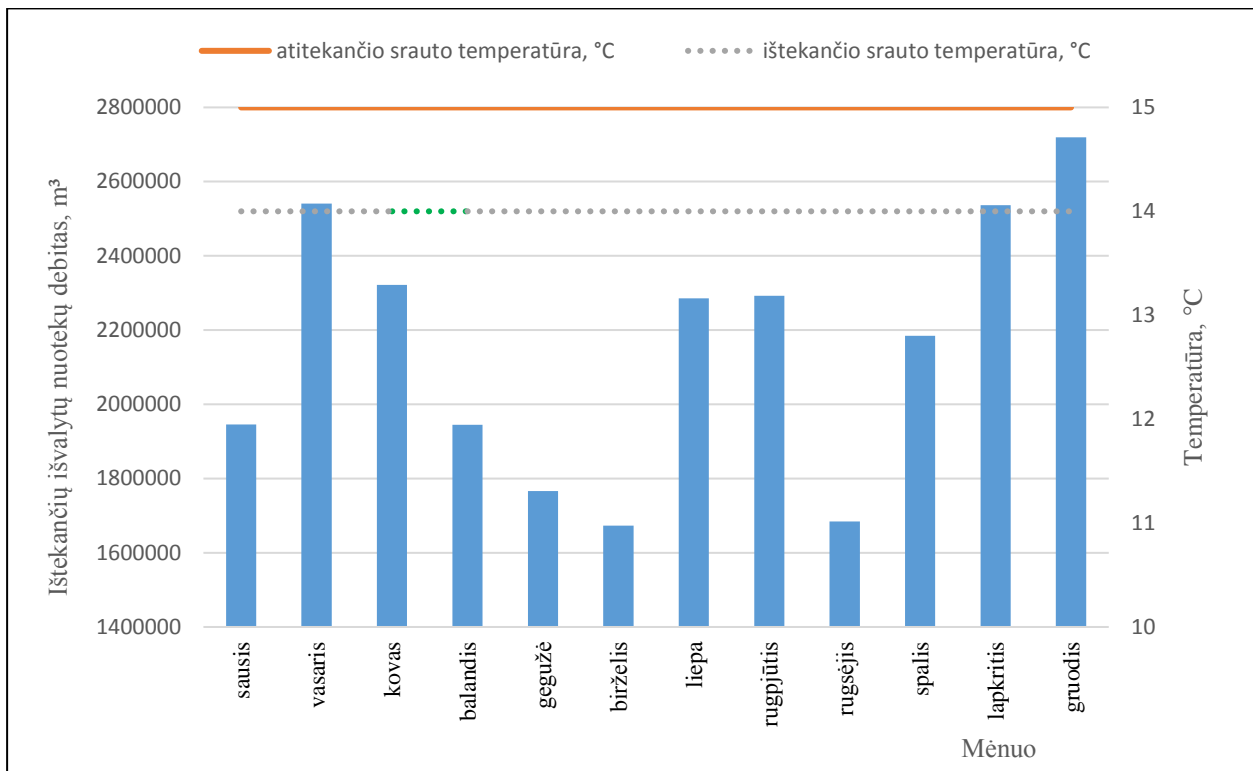


3.1 pav. Dumblo debito ir temperatūrinių svyravimų priklausomybės nuo metų laiko dumblo ūkyje

⁸ Buferiniam rezervuare sumaišomas dviejų tipų dumblas ir gaunamas žalio dumblo, atitekėjęs iš pirminių sėsdintuvų ir sutankinto perteklinio aktyviojo dumblo mišinys.

Aukščiausia dumblo nuotekų temperatūra bufertanke (16–21 °C) užfiksuota gegužės–rugsėjo mėnesiais (3.1 pav.). Tų pačių mėnesių laikotarpyje dumblo debitas iš bufertanko taip pat didžiausias. Tuo tarpu žiemos laikotarpiu, t. y. gruodžio–vasario mėnesiais dumblo nuotekų temperatūra bufertanko rezervuare siekia tik 13–14 °C. Abiem atvejais galutinė temperatūra svyruoja 24–28 °C ribose (3.1 pav.).

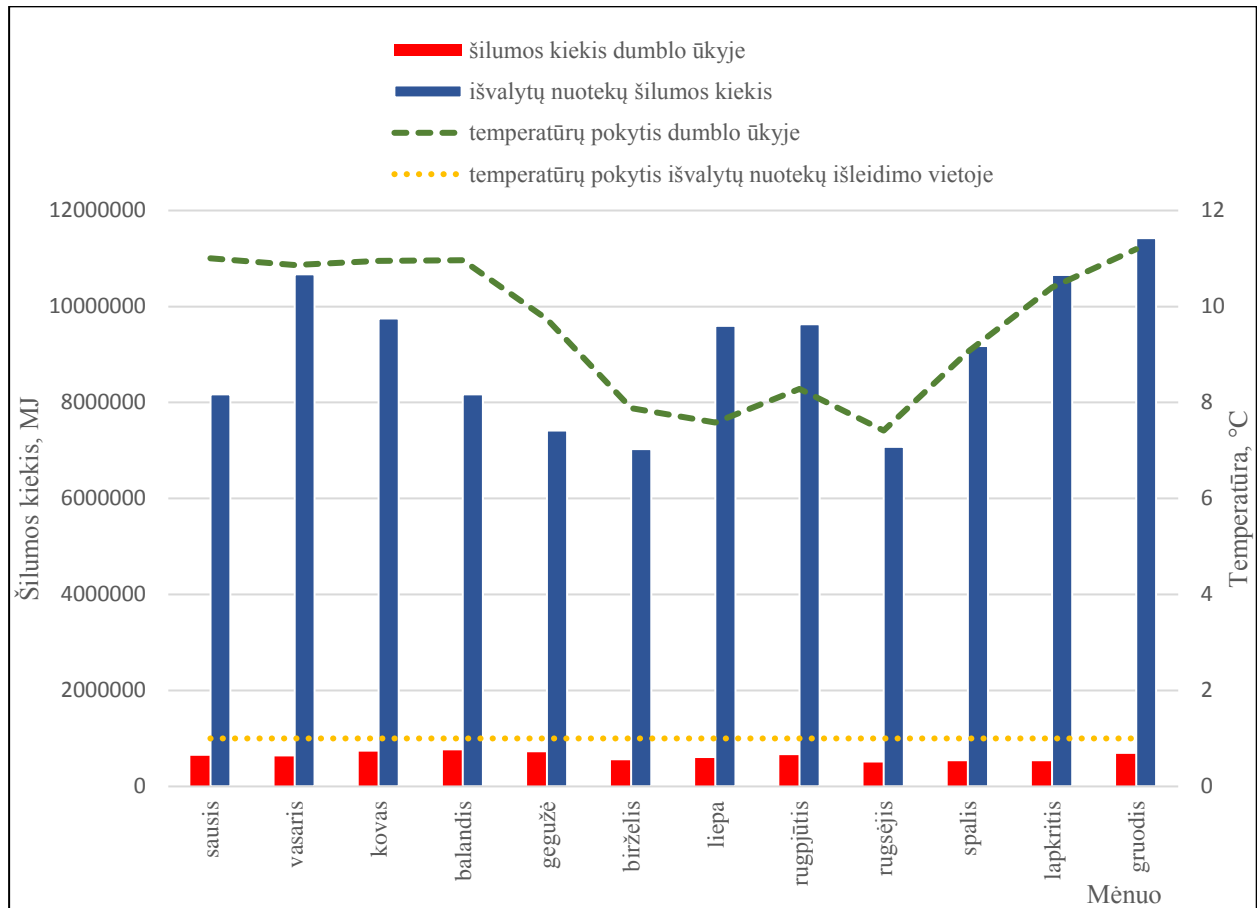
Šilumos potencialas taip pat įvertinamas kitoje potencialioje šilumos atgavimo iš nuotekų vietoje, t. y. prieš jas išleidžiant į Nemuną (žr. 1.2 pav.), kur tiriamasis objektas šiuo metu yra išvalytų nuotekų šilumos kiekis. Kaip ir prieš tai buvusiu atveju, pirmiausia yra atliekas tarpinis duomenų apdorojimas, kurio metu identifikuojami pagrindiniai ištekančių išvalytų nuotekų parametrų kitimai 2016 m. laikotarpyje (žr. 3.2 pav.).



3.2 pav. Ištekančių išvalytų nuotekų debitų prieš jų išleidimą į Nemuną ir temperatūrinių svyravimų priklausomybės nuo metų laiko

Metiniai duomenys apie Kauno miesto įtekančių ir ištekančių išvalytų nuotekų temperatūrų kitimą yra nekaupiami. Todėl tiriamajame darbe buvo priimta vidutinę metinę įtekančių ir ištekančių nuotekų temperatūras laikyti tokias, kokios buvo užfiksuotos praktikos metu, kuri vyko 2017 m. sausio mėnesį. Paveiksle 3.2 nurodyta, kad į nuotekų valyklą atiteka 15 °C nuotekos, o į Nemuną ištekančių nuotekų temperatūra yra 14 °C. Mažiausias į Nemuną išleidžiamų išvalytų nuotekų srautas užfiksuotas birželį ($1,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$), didžiausias – gruodį ($2,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$).

Pateikiami 2016 m. laikotarpyje pagal 2.1 ir 2.2 formules apskaičiuoti hidroterminės energijos (šilumos kiekio) rezultatai. Analizuojant šias formules matyti, kad atgaunamos šilumos kiekis priklauso nuo nuotekų debitų, jų pradinių ir galutinių temperatūrinių svyravimų (temperatūros pokyčio). Paveiksle 3.3 pateikti šilumos kiekiai, kurie kaupiasi nuotekų dumble (dumblo ūkyje) ir ištekančiose į Nemuną išvalytose nuotekose, 2016 m. laikotarpyje.



3.3 pav. Šilumos kiekių ir temperatūrų pokyčių priklausomybės nuo metų laiko

Paveikslo 3.3 duomenimis didžiausias atgaunamos šilumos kiekis dumblo ūkyje yra pasiekiamas balandžio mėnesį ($7,5 \cdot 10^5$ MJ), kai temperatūros pokytis lygus 11 °C, o mažiausias – rugsėjo ($5,0 \cdot 10^5$ MJ). Metinis atgaunamos šilumos kiekis siekia $7,5 \cdot 10^6$ MJ.

Paveikslo 3.3 duomenimis didžiausias atgaunamos šilumos kiekis išvalytų nuotekų sraute yra pasiekiamas gruodžio mėnesį ($11,4 \cdot 10^6$ MJ), o mažiausias – birželio ($7,0 \cdot 10^6$ MJ), kai temperatūros pokytis 2016 m. laikotarpyje lygus 1 °C. Metinis atgaunamos šilumos kiekis siekia $10,9 \cdot 10^7$ MJ.

3.2 Anglies dioksido emisijos įvertinimas

Lyginant atskiras pramonės šakas, energetikos pramonė užima pirmąją vietą pagal didžiausias anglies dioksido emisijas. Šios pramonės šalutinių produktų išmetimai į atmosferą daro didžiulę įtaką šiltnamio efektui [30].

Naudojantis netiesioginio poveikio aplinkai vertinimo metodika buvo atlikti skaičiavimai, kuriais remiantis nustatomas CO₂ emisijos sumažėjimas. Darbo metu buvo priimama, kad energija gaminama deginant gamtines dujas. Kuro pasirinkimas aktualus Kauno miestui, kadangi elektros ir šiluminei energijai aprūpinanti Kauno miesto katilinė kaip pagrindinį kurą naudoja gamtines dujas, o mazutas – rezervinis [39].

Norint apskaičiuoti anglies dioksido emisiją, visų pirma pagal tikslus šilumos kiekio atgavimo skaičiavimo duomenis (3.1 lentelė) būtina apsiskaičiuoti, kiek tonų gamtinių dujų reikėtų sudeginti (t. y. sunaudoto kuro kiekis), norint sugeneruoti tokį patį šiluminės energijos kiekį, veikiant dideliems kurą deginantiems įrenginiams, koks buvo atgautas Kauno nuotekų valykloje, vykdant šilumos atgavimo procesą iš nuotekų. Skaičiavimo rezultatai pateikiami 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Gamtinių dujų kiekiai šiluminės energijos generavimui dideliuose kurą deginančiuose įrenginiuose

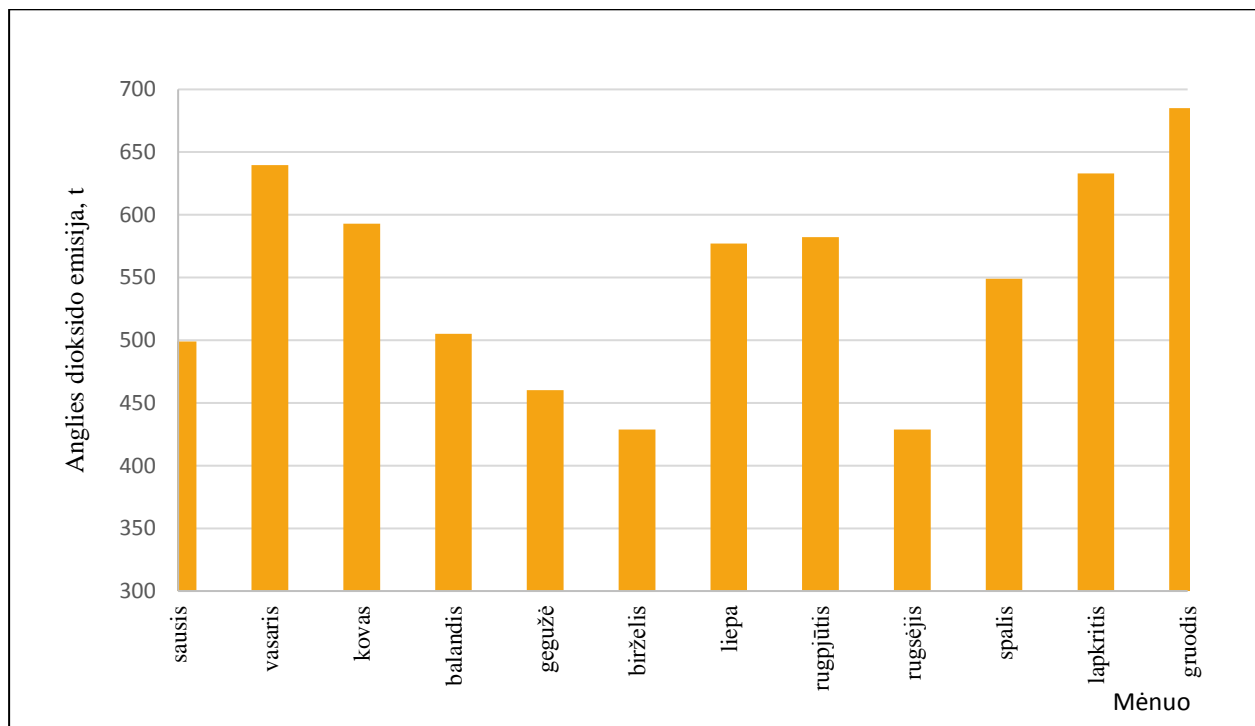
Metų mėnuo	Bendras atgaunamos šilumos kiekis, MJ	Sunaudotas gamtinių dujų kiekis, t	Gamtinių dujų kaloringumas, GJ/t
Sausis	8812279,7	263,1	33,49
Vasaris	11298883,3	337,4	
Kovas	10472671,3	312,7	
Balandis	8919759,4	266,3	
Gegužė	8129715,1	242,8	
Birželis	7573624,5	226,1	
Liepa	10193512,7	304,4	
Rugpjūtis	10281228,9	307,0	
Rugsėjis	7572532,7	226,1	
Spalis	9699000,9	289,6	
Lapkritis	11178625,5	333,8	
Gruodis	12101461,9	361,3	
Iš viso:	116 233 295,7	3470,7	

Pastaba: Bendras atgaunamos šilumos kiekis yra lygus dumblo ūkyje ir išvalytose nuotekose susidarančių šilumos kiekių sumai atitinkamą mėnesį (MJ).

Iš 3.1 lentelės pateiktų duomenų matyti, kad dideliuose kurą deginančiuose įrenginiuose norint pagaminti 116233 GJ energijos kiekį būtų reikalinga sudeginti daugiau nei 3470 tonų gamtinių dujų.

Lentelės 2.1 duomenimis mazuto kaloringumas yra 1,2 karto didesnis už gamtinių dujų. Esant didesniam mazuto kaloringumui, tam pačiam energijos kiekiui sugeneruoti (t. y. 116233 GJ) dideliuose kurą deginančiuose įrenginiuose reikėtų sudeginti apie 2907 t mazuto. Sudeginamo kuro kiekis būtų žymiai mažesnis negu gamtinių dujų, tačiau dėl didesnių kenksmingų dujų išmetimų į atmosferą mazutas Kauno šiluminėje naudojamas tik įvykus techniniams gedimams [35] ar atsiradus kt. nenumatytais problemoms.

Sekančiame etape pagal netiesioginio poveikio aplinkai vertinimo metodiką (žr. 2.3 formulę) įvertinami CO₂ mėnesiniai išmetimai į aplinką. Rezultatų duomenys pateikiami 3.4 paveiksle. Remianti 3.4 paveikslu galima įvertinti aplinkosauginę naudą, t. y. kokios CO₂ emisijos būtų išvengta atgaunant visą nuotekose susidariusią šiluminės energijos kiekį (žr. 3.3 pav.) UAB „Kauno vandenys“ nuotekų valykloje.



3.4 pav. Anglies dioksido emisija, kai dideliuose kurą deginančiuose įrenginiuose naudojamos gamtinės dujos

Didžiausia CO₂ emisija buvo užfiksuota gruodžio mėnesį (685 t). Šį mėnesį šilumos atgavimai iš nuotekų taip pat didžiausi, t. y. $12,1 \cdot 10^6$ MJ. Mažiausia CO₂ emisija pastebima rugsėjo mėnesį (429 t), kai atgaunamos šilumos kiekis visų metų laikotarpyje yra mažiausias ir sudaro $7,6 \cdot 10^6$ MJ. (žr. 3.1 lentelę).

3.3 Sąlyginio išmetamų teršalų į atmosferą sumažėjimo įvertinimas

Įdiegus šilumos atgavimo technologijos sistemą dumblo ūkyje yra sutaupoma 7472 GJ, o nuotekų išleidimo vietoje 108761 GJ šiluminės energijos kiekio per metus. Norint sugeneruoti tokį patį šilumos kiekį, veikiant dideliems kurą deginantiesiems įrenginiams (kuro deginimo metu), į atmosferą yra išmetami CO₂, NO_x, CO atitinkami kiekiai. Šiame poskyryje įvertinama, kokios teršalų emisijos atsisakoma (emisijos sumažėjimas), kai Kauno nuotekų valykla naudoja šilumos atgavimo technologijos sistemą.

Šiame darbe priimta, kad energija gaminama deginant gamtines dujas.

Įvertinus gamtinių dujų emisijų faktorius (žr. 2.2 lentelėje), jo kaloringumą (33,49 GJ/t) ir bendrą atgautą šilumos kiekį (116233 GJ/metus), kurio rezultatai nurodyti 3.3 paveiksle, įvertintas nesudegusių gamtinių dujų kiekis. Šis dydis 2016 m. laikotarpyje lygus 223121 nm³.

Naudojant CO₂, NO_x, CO emisijų faktorius (žr. 2.1 lentelę) buvo apskaičiuojamos sąlyginės teršalų metinės emisijos. Rezultatai pateikiami 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Sąlyginiai išmetamų teršalų į atmosferą sumažėjimai

Teršalas	Teršalų emisijos faktoriai		Bendras atgautas energijos kiekis GJ	Nesudegintų gamtinių dujų kiekis nm ³	Emisijos sumažėjimas t
	kg/GJ	g/nm ³			
CO ₂	56,90		116233	3,47·10 ⁶	6613,70
NO _x	-	1,00			3,47
CO	-	0,01			0,03

Gautieji sąlyginiai teršalų emisijos sumažėjimų duomenys pateikti 3.2 lentelėje. Šioje lentelėje nurodyti emisijų sumažėjimai pasiekia atitinkamą reikšmę tik tada, kai UAB „Kauno vandenys“ nuotekų valykloje bus vykdomas šilumos atgavimo iš nuotekų procesas. Šios emisijos palyginamos su UAB „Kauno termofikacinė elektrinė“ 2016 m. išmetamų teršalų realiomis vertėmis.

3.3 lentelė. Išmetamų teršalų kiekių palyginimas 2016 metais

Sugeneruojama produkcija, GWh ⁹		Perpumpuota termofikato, mln. m ³	Išmetamų teršalų kiekiai, t		
elektros energija	šilumos energija		CO ₂	NO _x	CO
Realūs UAB „Kauno termofikacinės elektrinė“ duomenys					
41	194,8	4,4	48060	64,8	13,3
Atgaunamos šilumos kiekis Kauno nuotekų valykloje ir išmetamų teršalų sumažėjimas					
-	32	0,2	6613,7	3,47	0,03

⁹ 1 MWh yra lygi 3,6 GJ.

Naudojantis atitinkamo teršalo emisijos faktoriaus duomenimis apskaičiuoti NO_x ir CO išmetamų teršalų kiekiai. Išmetamo anglies dioksido kiekis paskaičiuotas pagal netiesioginio poveikio aplinkai vertinimo metodiką. Lyginant 3.3 lentelės duomenis dėl atgaunamo šilumos kiekio iš nuotekų CO_2 išmetimų kiekis Kauno termofikacinėje elektrinėje sumažėtų apie 14 %, NO_x – apie 5 %, o CO išmetimai – 0,2 %.

Iš 3.3 lentelės pateiktų duomenų matyti, kad hidroterminės energijos panaudojimas yra svarbi priemonė mažinant šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją. Pasauliniu mastu dideli hidroterminės energijos (šilumos) kiekiai susidaro nuotekų valyklose [37]. Analizuojant šios lentelės duomenis, ne išimtimi laikoma ir Kauno nuotekų valykla, kurioje dideli šilumos kiekiai kaupiasi nuotekų srautuose ir iki šiol nėra atgaunami. Šie dumblo srautai cirkuliuoja dumblo ūkyje, kuriame ganėtinai aukštos temperatūros (24–28 °C) dumblas transportuojamas į dumblo saugojimo talpyklas. Kita šilumos potencialas – ištekančias išvalytų nuotekų srautas. Nepanaudotas ir prarastas hidroterminis energijos kiekis, kuris galėtų būti atgautas iš aukštos temperatūros nuotekų srauto, yra traktuojamas kaip šilumos nuostoliai.

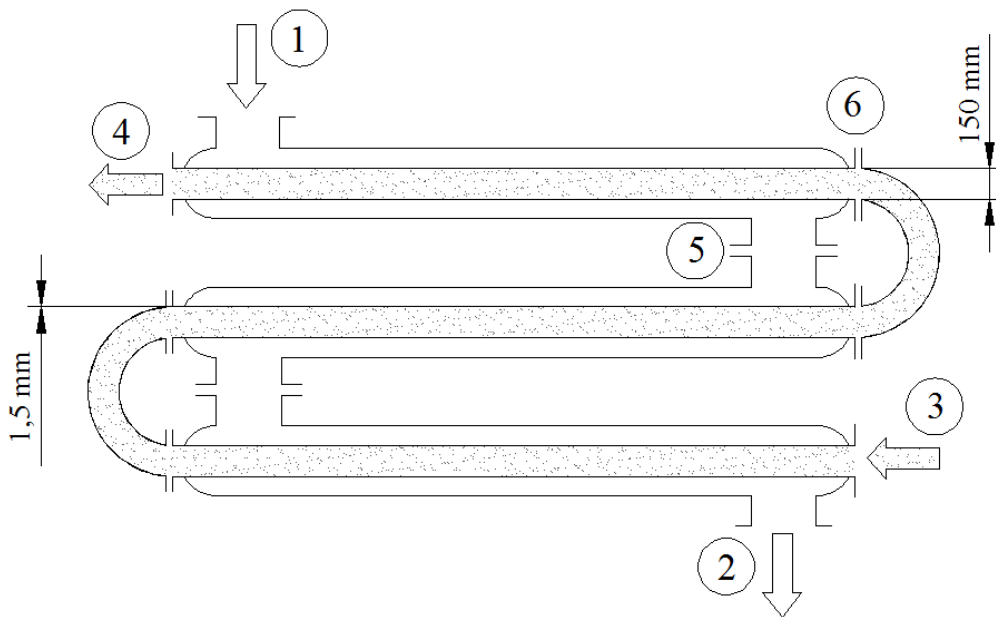
Šilumos atgavimo technologijų diegimas nuotekų valyklose yra ypač svarbus energetiniu ir aplinkosauginiu požiūriais. Vertinant energetinį aspektą, svarbu paminėti sumažėjusį tiekiamos energijos poreikį iš didelių kurą deginančių įrenginių, nes dalį reikiamos energijos kompensuoja iš nuotekų atgauta šiluma. Tokiu būdu nuotekų valyklos energetinė priklausomybė nuo vietinės šilumos ir elektros ūkio bendrovių yra sumažinama. Aptariant aplinkosauginę šilumos atgavimo iš nuotekų technologijos naudą svarbiausia atkreipti dėmesį į teršalų emisijos pokyčius. Kadangi šių technologijų pritaikymas turi didelę reikšmę šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos mažinimui. Didžiausi sumažėjimai dėl hidroterminės energijos saugojimo procesų įgyvendinimo ypač pastebimi CO_2 išmetimuose (žr. 3.2 lentelę).

3.4 Šilumos atgavimo technologinės sistemos įdiegimas Kauno nuotekų valykloje

3.4.1 Šilumokaičio technologinė sistema dumblo ūkyje

Kauno nuotekų valyklos dumblo ūkyje nuspręsta taikyti dvigubo vamzdžio šilumokaičio technologiją, kuri vaizduojama 3.5 paveiksle. Grafinis technologijos modeliavimas atliktas *AutoCAD* automatizuota projektavimo sistema.

Atsisakyta taikyti tokių šilumokaičių technologijas kaip: nuotekų vamzdyje įmontuotų šilumokaičių, ant konkrečios vamzdžio sienelės dalies integruotų šilumokaičių ir šilumokaičio su nuotekų vamzdžiu specialiai integruotame izoliaciniame vamzdyje. Dumblo ūkio vamzdynų sistema nepritaikyta šių šilumokaičių rūšių projektavimui.



3.5 pav. Dvigubo vamzdžio šilumokaičio principinė schema

Principinėje šilumokaičio schemoje, kuri vaizduojama 3.5 paveiksle, sunumeruoti svarbiausi sistemoje vyraujantys srautai:

- 1 – šaltas vanduo paduodamas į šilumokaitį;
- 2 – šilumokaičio sistema išteka pašildytas vanduo, kuris jau paruoštas vartojimui;
- 3 – į šilumokaitį paduodamas dumblo nuotekų srautas. Vyraujanti dumblo nuotekų temperatūra 24–28 °C;
- 4 – atvėšęs dumblo nuotekų srautas tiekiamas į dumblo saugyklas.
- 5 ir 6 – konstrukcijos apvadas / briauna. Paskirtis – sustiprinti, apsaugoti konstrukciją nuo pažeidimų, kylančių dėl slėgio veikimo ar kt.

3.4.1.1 Pagrindinių šilumokaičio projektavimo sąlygų įvertinimas

Siekiant optimaliai suprojektuoti šilumokaičio įdiegimo technologiją, visų pirmiausia atliekamas pagrindinių parametų nustatymas

Siekama, kad vamzdynais transportuojamų nuotekų srauto temperatūra būtų kuo pastovesnė. Nagrinėjamu Kauno nuotekų valyklos atveju atgaunamo dumblo nuotekų srauto temperatūra kinta nuo 24 °C iki 28 °C. Metinis nuotekų srautas sudaro 187200 m³. Vamzdžio, kuriuo tiekiamas dumblo nuotekų srautas, vidinis skersmuo siekia 150 mm. Rekomenduojama, kad nuotekų srauto greitis būtų ne mažesnis nei 1 m/s, siekiant išvengti sedimentacijos proceso. Dumblo ūkyje esančių dumblo nuotekų tekėjimo srautą reguliuoja *NETZSCH* vokiški siurbliai, kurie priklausomai nuo poreikio gali tiekti nuo 20 m³/h iki 70 m³/h srauto kiekį. Žinant vidinio vamzdžio skersmenį buvo apskaičiuotas dumblo nuotekų srauto greitis. Nustatyta, kad esant

siurblio galingumui $20 \text{ m}^3/\text{h}$, tekančio srauto greitis siekia tik $0,3 \text{ m/s}$. Kai dumblo galingumas siekia $70 \text{ m}^3/\text{h}$, tai dumblo nuotekų srauto tekėjimo greitis lygus $1,1 \text{ m/s}$.

Siekiant užtikrinti optimalų šilumos atgavimo procesą dumblo ūkyje, būtina užtikrinti efektyvų *NETZSCH* siurblių veikimą, t. y. palaikomas $70 \text{ m}^3/\text{h}$ dumblo nuotekų srauto tiekimo režimas šilumokaičio sistemoje (žr. 3.5 pav.).

3.4.2 Šilumos siurblio parinkimas

Šilumos kiekis 2016 m. laikotarpyje išvalytose nuotekose siekia 108760 GJ (žr. 3.3 pav.). Ši šiluma apskaičiuota iš išvalytų ir išleidžiamų į Nemuną Kauno miesto nuotekų, kurių metiniai kiekiai apytiksliai siekia $26 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

2016 m. laikotarpyje Kauno nuotekų vidutinė temperatūra siekė $15 \text{ }^\circ\text{C}$, esant tokiai temperatūrai šilumos siurblio efektyvumo koeficientas COP pagal [30, 32] yra lygus 4. Esant tokiam efektyvumo koeficientui elektros sąnaudų ir šilumos santykis 1:4. Sunaudojus dalį elektros visa likusi nauda, kurią per visą veikimo laiką sugeneruoja šilumos siurblys, yra gaunamas iš aplinkos (šiuo atveju iš išvalytų Kauno miesto nuotekų).

Nustatoma šilumos siurblio galia P . Vadovaujantis statybos techniniu reglamentu [40] yra nustatoma šildymo sistemos šilumos šaltinio projektinė galia, t. y. siurblio galia. Šio įrenginio galia nustatoma atsižvelgiant į tai, kad šilumos siurblio eksploatacijos laikas yra ne mažesnis už modeliavimo periodą, t. y. 2016 m. laikotarpį. Kompresoriaus (šilumos siurblio sistemos komponentas) darbo laikas yra prilyginamas šilumos siurblio eksploataavimo laikui. Priimame kad kompresorius veikia ištisus metus 24 val. per parą. Esant tokiai sąlygai, kompresoriaus ir šilumos siurblio eksploataavimo trukmės yra vienodos ir siekia 8760 valandų 2016 m. laikotarpyje.

Apskaičiuotas šilumos kiekis esantis išvalytuose nuotekose yra $108760,97 \text{ GJ}$, o tai atitinka $30211,38 \text{ MWh}^{10}$. Reikalingas šilumos siurblio galingumas P yra apskaičiuojamas pagal 2.4 formulę ir lygus $3448,79 \text{ kW}$.

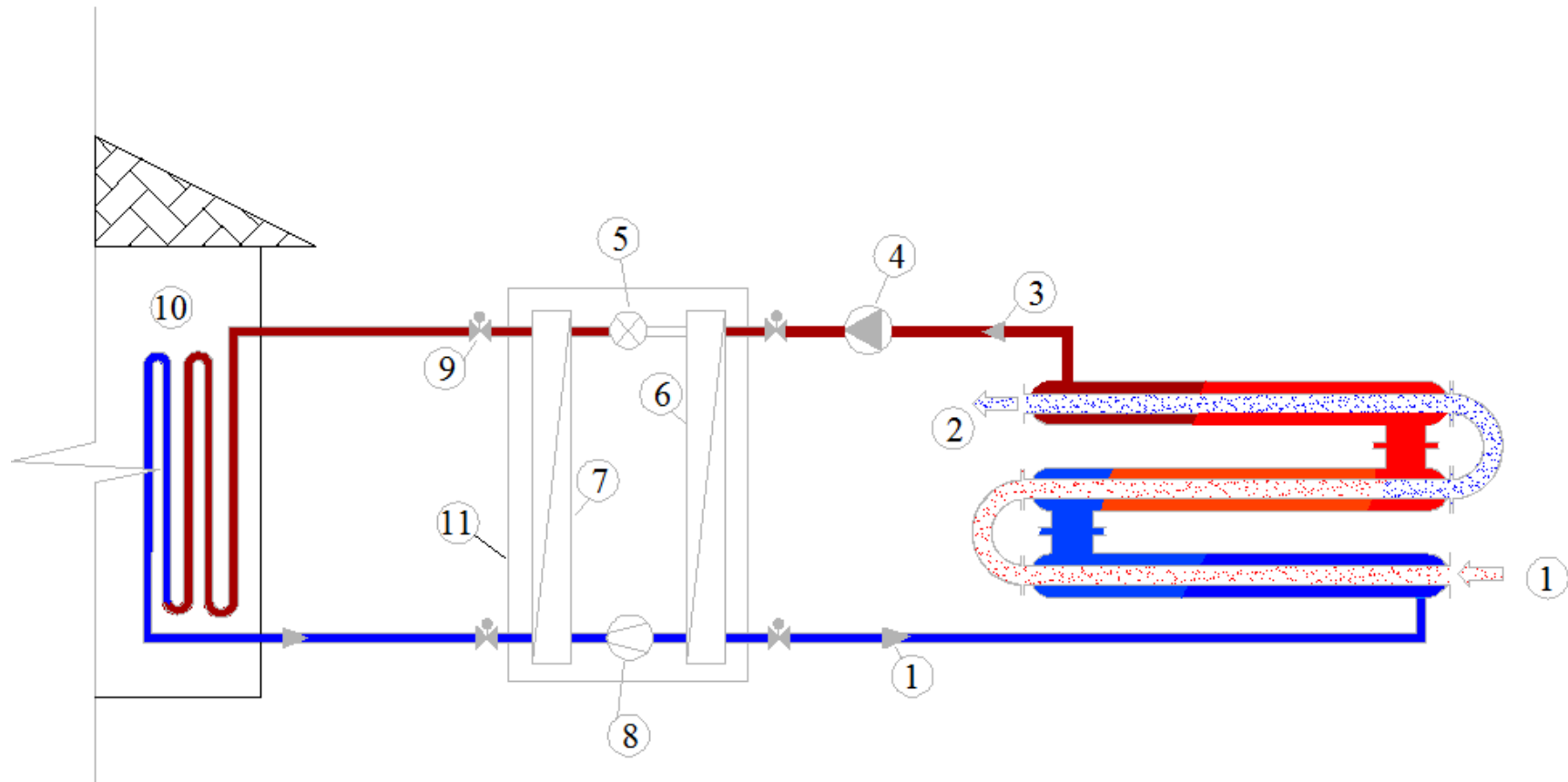
Apskaičiuotą šilumos siurblio galingumą priimu lygų 3500 kW , o COP kaip buvo minėta anksčiau lygus 4. Vadinasi valandinės šilumos siurblio elektros sąnaudos bus lygios 875 kW . Šis rodiklis yra vienas iš svarbiausių, kuris parodo šilumos siurblio efektyvumą. Kuo aukštesnis COP prie žemesnės lauko temperatūros, tuo mažesni kaštai bus šaltomis žiemos dienomis.

Remiantis Alekseiko Leonid N. ir kt. [32] tyrimu, Rusijoje egzistuoja keturių tipų nuotekų šilumos siurblių sistemos, kurios pasižymi 14 kW , 100 kW , 300 kW ir 8500 kW galingumais. Didesniam išvalytų nuotekų srautui apdoroti naudojami didesniu galingumu pasižymintys šilumos siurbliai.

¹⁰ 1 MWh yra lygus $3,6 \text{ GJ}$.

3.5 Atgautos šilumos panaudojimo galimybių įvertinimas

Dumblo ūkyje atgautos šilumos panaudojimo principinė schema nurodyta 3.6 paveiksle. Grafinis principinės schemos modeliavimas atliktas naudojanti *AutoCAD* automatizuota projektavimo sistema. Analogiška 3.6 paveiksle pavaizduota schema gali būti pritaikoma UAB „Kauno vandenys“ nuotekų valyklos administracinių patalpų šildymui ir vėdinimui. Lauri Mikkonen tyrime [41] aprašoma Švedijos nuotekų valykla, kurioje iš nuotekų atgaunamos šilumos kiekiai yra laikomi didžiausiais visame pasaulyje. Šiluma atgaunama iš išvalytų nuotekų, veikiant 7 šilumos siurbliams. Kasmetinis atgaunamas šilumos kiekis (1235 GWh) panaudojamas 95000 gyvenamiesiems namams apšildyti. Dar vienas sėkmingai panaudotas šilumos atgavimas iš nuotekų aprašomas Tekes tyrime [37]. Šiuo atveju šiluma iš nuotekų atgaunama naudojant šilumokaičio technologiją. Siekiant didžiausio šilumos atgavimo, šioje sistemoje įdiegtas ir šilumos siurblys. Iš nuotekų atgauta šiluma yra šildomi gyvenamieji pastatai. Atgautos šilumos kiekio užtenka padengti daugiau negu 50 procentų energijos suvartojimo kiekio.



3. 6 pav. Iš dumblo ūkio nuotekų atgaunamos šilumos panaudojimo galimybės principinė schema

Šilumos atgaunamos iš dumblo ūkio nuotekų panaudojimo galimybės principinės schemos elementai (žr. 3.5 pav.):

- 1 – nuotekų srautas tiekiamas į šilumokaičio sistemą (įtekančio srauto temperatūra priklausomai nuo sezoniškumo yra lygi 24–28 ribose °C);
- 2 – atvėsusio dumblo nuotekų srautas, kuris transportuojamas į dumblo saugyklą;
- 3 – pašildyto vandens išėiga iš šilumokaičio sistemos, kuri paduodama į cirkuliacinį siurbį;
- 4 – cirkuliacinis siurblys;
- 5 – išsiplėtimo vožtuvas;
- 6 – garintuvas;
- 7 – kondensatorius;
- 8 – pneumatinis siurblys;
- 9 – srautų reguliavimo skendės ar vožtuvai;
- 10 – pastato šildymo sistema (viena iš atgaunamo šilumos panaudojimo galimybių);
- 11 – šilumos siurblys.

Ieškant inovatyvių iš nuotekų atgautos šilumos pritaikymo būdų, atgautas šilumos kiekis gali būti panaudojamas verslo kūrimui. Viena iš verslo įgyvendinimo idėjų – žuvininkystė. Pasauliniu mastu dėl mažėjančių žuvininkystės plotų žuvis imta auginti uždaroje recirkuliacinėse sistemose [42, 43]. Uždara cirkuliacinė sistema – tai uždaras rezervuaras, kuriame komerciniais tikslais auginamo įvairios žuvys. Žuvims augti yra sukuriamos optimalios sąlygos tokios kaip reikiama švaraus vandens temperatūra. Vandens kokybės užtikrinimui naudojami biologinio valymo įrenginiai [42]. Optimali rezervuarų vandens temperatūra yra apie 24 °C.

Iš dumblo nuotekų atgautos šilumos pritaikymo galimybės žuvininkystėje

Darbe pagal 2.2. formulę buvo apskaičiuotas šiluminės energijos poreikis rezervuaruose esančio vandens temperatūrai pakelti iki 24 °C. Rezervuarai gaminami įvairaus dydžių ir formų, tačiau dažniausiai yra naudojami apvalūs, kurių talpa siekia 5000–10000 litrų [44]. Buvo priimta, kad pradinio vandens temperatūra yra 10 °C. Tokiu atveju apskaičiuota, kad vandens temperatūrai pakelti nuo 10 °C iki 24 °C yra reikalingas $5,9 \cdot 10^8$ J šilumos kiekis.

Atsižvelgiant į mažiausiu per mėnesį atgaunamo šilumos kiekį dumblo ūkyje (t. y. 499061 MJ atgauti rugsėjo mėnesį pagal 4.2 pav.), apskaičiuota keliems rezervuarams (kai vieno tūris lygus 10000 l) pakaktų šio šilumos kiekio, norint pakelti juose esančio vandens temperatūrą iki 24 °C.

Paskaičiuota, kad rugsėjo mėnesį atgautos šilumos kiekio užtenką temperatūrą pakelti 27 rezervuaruose, kai vieno tūris lygus 10m^3 , t. y. 10000 l).

Šilumos tiekimas artimiausiais objektams

Kauno nuotekų valykloje šilumą iš išvalytų nuotekų galima atgauti naudojant šilumos siurblių, kurio galia siekia 3448,79 kW. Išvalytų nuotekų metinis srautas (2016 m.) siekia 26 mln. m³, iš kurio naudojant šilumos siurblių galima atgauti 108760 GJ šilumos per metus, o tai atitinka 30,2 GWh¹¹. Šis šilumos kiekis gali aprūpinti šalia nuotekų valyklos esančius objektus šilumine energija (žr. 3.7 pav.).



3.7 pav. Kauno nuotekų valyklos teritorija ir potencialūs šilumos, atgautos iš nuotekų, vartotojai
(M 1:10000) [45]

Paveiksle 3.7 yra nurodyti šalia Kauno nuotekų valyklos esantys artimiausi objektai: vos už 200 m yra įsikūręs žirgynas, betonų mišinių įmonė UAB „Autokausta“, Noreikiškių gyvenvietė, kuri prasideda apytiksliai už 800 m.

¹¹ 1 MWh yra lygi 3,6 GJ.

IŠVADOS

1. Remiantis atlikta literatūros šaltinių analize galima teigti, kad nėra vieno universalus metodo, pagal kurį būtų parenkama tinkamiausia šilumos atgavimo vieta nuotekų valymo technologiniame procese, todėl reikia įvertinti vyraujančius nuotekų srautus ir jų temperatūras. Šilumos atgavimo iš nuotekų technologijos taikymas prieš biologinius valymo įrenginius yra nerekomenduojamas. Optimalus sprendimas – šilumos atgavimo technologinę sistemą Kauno nuotekų valykloje taikyti dumblo ūkio buferiniame rezervuare ir prieš išleidžiant išvalytas nuotekas į Nemuną.
2. Kauno nuotekų valyklos nuotekos yra potencialus šilumos atgavimo šaltinis. Šilumos atgavimo potencialas nuotekų valyklos dumblo ūkyje – 7472 GJ, o į Nemuną išleidžiamų išvalytų nuotekų sraute – 108761 GJ.
3. Šilumos atgavimui iš dumblo srauto rekomenduojama naudoti dvigubo vamzdžio šilumokaitį. Dumblo nuotekų srauto tekėjimo greitis šioje sistemoje yra 1,1 m/s, kai naudojami 70 m³/h galios siurbliai.
Šilumai atgauti iš ištekancio išvalytų nuotekų srauto rekomenduojama naudoti šilumos siurblių, kurio efektyvumo koeficientas – 4, galia – 3500 kW.
4. Panaudojus visą Kauno nuotekų valyklos hidroterminės energijos atgavimo potencialą (116233 GJ) galima būtų sumažinti šilumos gamybos sąnaudas termofikacinio vandens paruošimui UAB Kauno termofikacinėje elektrinėje. 2016 metų duomenimis CO₂ emisijos sumažėtų 6614 t, NO_x – 3,50 t, o CO – 0,03 t (skaičiavimuose neįvertinti temperatūros nuostoliai transportuojant termofikacinį vandenį).

LITERATŪRA

1. Ashlynn S. Stillwell, David C. Hoppock and Michel E. Webber. Energy Recovery from Wastewater Treatment Plants in the United States: A Case Study of the Energy-Water Nexus. *Sustainability*, 2010, p. 945–962.
2. Sara Simona Cipolla, Marco Maglionico. Heat recovery from urban wastewater: analysis of the variability of flow rate and temperature in the sewer of Bologna, Italy. *Energy Procedia*, 2014, p. 288–297.
3. Perry L. McCarty, Jaecho Bae and Jeonghwan Kim. Domestic Wastewater Treatment as a Net Energy Producer—Can This be Achieved? *Environmental Science Technology*, 2011, p. 7100–7106.
4. Gilron J. Water-energy nexus: matching sources and uses. *Clean Technology Environment Policy*, 2014, p. 1471–1479.
5. Abdeen Mustafa Omer. Energy, environment and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, p. 2265–2300.
6. Frijns J., Hofman J., Nederlof M. The potential of (waste) water as energy carrier. *Energy Conversion and Management*, 2013, p. 357–363.
7. Schmid F. Sewage water: interesting heat source for heat pumps and chillers. *Energy-engineer FH, Swiss Energy Agency for Infrastructure Plants*. Zürich, Switzerland, 2009.
8. Yaxiu G., Huqiu D., Yu G., Huanjuan Z. The potential of urban wastewater heat: The feasibility analysis of using wastewater source heat pump. *International Symposium on Water Resource and Environmental Protection*, 2011, p. 1481–1484.
9. Baek N. C., Shin U. C., Yoon J. H. A study on the design and analysis of a heat pump heating system using wastewater as a heat source. *Solar Energy*, 2005, p. 427–440.
10. Wenzhong Zhou, Jianxing Li. Sewage heat source pump system's application examples and prospect analysis in China. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, 2004, p. 734.
11. Seetharam Chittoor Jhansi, Santosh Kumar Mishra. Wastewater Treatment and Reuse: Sustainability Options. *The Journal of Sustainable Development*, 2013, vol. 10, p. 1–15.
12. Europos Parlamento Tarybos Direktyva 2001/77/EB 2001 m. rugsėjo 27 d. dėl elektros, pagamintos iš atsinaujinančiųjų energijos išteklių, skatinimo elektros energijos vidaus rinkoje. 2001.

13. Young-Jin Suh, Patrick Rousseaux. An LCA of alternative wastewater sludge treatment scenarios. *Resources, Conservation and Recycling*, 2002, p. 191–200.
14. Kum-Lok Hwang, Cheon-Hee Bang, Kyung-Duk Zoh. Characteristics of methane and nitrous oxide emissions from the wastewater treatment plant. *Bioresource Technology*, 2016, p. 881–884.
15. Methane Capture and Use, 2016 [žiūrēta 2016 09 20]. Prieiga per internetą: <<https://www3.epa.gov/climatechange/kids/solutions/technologies/methane.html>>.
16. Biosolids Management Program (formerly called EMS Program), 2006 [žiūrēta 2016 06 20]. Prieiga per internetą: <<http://www.wef.org/Biosolids/page.aspx?id=7554>>.
17. Eslaminejab P., Bernier M. Impact of grey water heat recovery on the electrical demand of domestic hot water heaters, in: *Proceedings: 11th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition*. University of Strathclyde, 2009, p. 681–687.
18. Funamizu N., Iida M., Sakakura Y., Takakuwa T. Reuse of heat energy in wastewater: implementation examples in Japan. *Water Science and Technology*, 2001, vol. 43, no.10, p. 277–286.
19. Butler D. The influence of dwelling occupancy and day of the week on domestic appliance wastewater discharges. *Building and Environment*, 1993, p. 73–79.
20. Eastern Research Group, Inc. (ERG), Resource Dynamics Corporation for U.S. Environmental Protection Agency, Combined Heat and Power Partnership. *Opportunities for Combined Heat and Power at Wastewater Treatment Facilities: Market Analysis and Lessons from the Field*, 2011.
21. Guest J., Skerlos S., Barnard J. A New Planning and Design Paradigm to Achieve Sustainable Resource Recovery from Wastewater. *Environmental Science Technology*, 2009, p. 6126–6130.
22. Lundie Sven. Life Cycle Assessment for Sustainable Metropolitan Water Systems Planning. *Environmental Science Technology*, 2004, p. 3465–3473.
23. Hokanson D. R., Zhang Q., Cowden J. R., Troschinetz A. M., Mihelcic J. R., Johnson D. M. Challenges to implementing drinking water technologies in developing world countries. *Environ. Eng.: Appl. Res. Pract.*, 2007, p. 31–38.

24. Forrest Meggers, Hansjurg Leibundgut. The potential of wastewater heat and exergy: Decentralized high-temperature recovery with a heat pump. *Energy and Building*, 2011, p.879–886.
25. Henrik Lund. Renewable energy strategies for sustainable development. *Energy*, 2007, p. 912–919.
26. Nuotekų valymas. Prieiga per internetą [žiūrėta 2016 11 11]: <<https://www.kaunovandenys.lt/SitePages/VandensValymas.aspx>>.
27. Leslie Grady Jr. C. P., Glen T. Daigger, Nancy G. Love, Carlos D. M. Filipe. *Biological Wastewater Treatment*, 3rd ed. United States of America: Taylor & Francis Group, 2011, p. 963.
28. Pamminger F., Scott D., Aye L., Jelbert R. Heat energy recovery potential from sewers in Melbourne. *Technical Features*, 2013.
29. Perackova Jana, Podobekova Veronika. Utilization of heat from sewage. *Slovak University of technology in Bratislava, Slovakia*, 2013, p. 79–86.
30. Culha O., Gunerhan H., Biyik E., Ekren O., Hebasli A. Heat exchanger applications in wastewater source heat pumps for buildings: a key review. *Energy and Buildings*, 2015, p. 215–232.
31. Weijie Z., Cen L., Yanyan L. Potential capacity research on application of sewage – source heat pump system in bath centers. *Collage of Urban Construction, China*, 2010.
32. Alekseiko L.N., Slesarenko V.V, Yudakov A.A. Combination of wastewater treatment plants and heat pumps, *Pacific Science Review*, 2014, p. 36–39.
33. McDowell. R. W., Ag. Research Limited. Environmental impacts of pasture-based farming. *New Zealand, Hardback*, 2008, p. 304.
34. Pulat E., Etemoglu A. B., Can M. Waste-heat recovery potential in Turkish textile industry: Case study for city of Bursa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, p. 663–672.
35. Komisijos Sprendimas 2007/VII/18 Nr. K(2007) 3416. Nustatantis šiltnamio efektą sukeliančių dujų apskaitos ir ataskaitų teikimo gaires vadovaujantis Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2003/87/EB, 2007, 644 p. [žiūrėta 2017 01 05]. Prieiga per internetą: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003L0087&from=EN>>.
36. Statistikos departamento prie Lietuvos Respublikos vyriausybės. Įsakymas dėl kuro ir energijos balanso sudarymo metodikos patvirtinimo. Nr. DĮ-228, 2004, 16 p.

37. Training Materials in Financial Engineering. Cleaner Production in Baltic Countries. ENSI Energy Saving International AS, The Norwegian Efficiency Group, NEFCO Nordic Environment Financial Corporation, APINI Institute of Environmental Engineering. Part 4. Environmental advantages, Table 1.
38. Togano Y., Ueda K., Hasegawa Y., Miyamoto J., Yamaguchi T., Shibutani S. Advanced Heat Pump Systems Using Urban Waste Heat „ Sewage Heat “. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2015, vol. 52, p. 80–87.
39. Kauno energija, 2015 [žiūrėta 2016 02 22]. Prieiga per internetą: <<https://www.kaunoenergija.lt/wp-content/uploads/5.1-Silumos-gamybos-ir-tiekimo-dalis.pdf>>.
40. STR 2.09.04:2008 Pastato šildymo sistemos galia. Šilumos poreikis šildymui. 2008 m. gegužės 12 d. Nr. D1-248. Vilnius.
41. Mikkonen L., Ramo J., Keiski R. L., Pongracz E. Heat recovery from wastewater: assessing the potential in northern areas. Water Research, 2013, p.161–164.
42. Yogev U., Sowers R. K., Mozes N., Gross A. Nitrogen and Carbon balance in a novel near-zero exchange saline recirculating aquaculture system. Aquaculture, 2016.
43. Mirzoyan N., Tal Y., Gross A. Anaerobic digestion of sludge from intensive recirculating aquaculture systems: review. Aquaculture, 2010, p. 1–6.
44. Intensyvus žuvų auginimas uždaroje recirkuliacinėje sistemoje, 2016 [žiūrėta 2017 04 02]. Prieiga per internetą: <<http://www.manoukis.lt/mano-ukis-zurnalas/gyvulininkyste/3451-intensyvus-zuvu-auginimas-uzdaroje-recirkuliacineje-sistemoje>>.
45. Vietos paieška, 2016 [žiūrėta 2017 05 20]. Prieiga per internetą: <<http://www.maps.lt/lt>>.