

Atliekinės šilumos energijos utilizavimas, naudojant organinį Renkino ciklą, elektros energijai gaminti

Andrejus Burlakovas,

Vladislovas Katinas

*Lietuvos energetikos institutas,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas
El. paštas: andrius.bur@gmail.com*

Lietuvos pramonėje prarandamas didžiulis mažo potencialo atliekinės šilumos energijos kiekis (apie 458 027 tne). Todėl būtina ieškoti priemonių šiai problemai spręsti. Šio uždavinio sprendimui siūloma naudoti organinį Renkino ciklą (ORC) mažų parametru šiluminės energijos šaltinių utilizavimui gaminant elektros energiją. Tyrimais nustatyta, kad ORC darbo efektyvumas priklauso nuo darbo agento fluido termodinaminių savybių, atliekinės energijos temperatūros ir kitų veiksnių, pvz., atliekinės energijos šaltinio. Atliekinės šilumos potencialas naudojamas išgarinti žemos išgarinimo temperatūros organiniam skysčiui, cirkuliuojančiam uždaru ciklu, o gautas organinio skysčio garas naudojamas sukurti turbinai, kuri gamina elektros energiją. Iš turbinos išėjęs garas susikondensuoja šilumokaityje arba aušintuve-kondensatoriuje. ORC darbo efektyvumas priklauso nuo darbo agento fluido termodinaminių savybių, atliekinės energijos temperatūros. Analizuojami ORC darbo agentų (fluidų) parinkimas, šilumos konversijos į elektros energiją būdai siekiant efektyvesnio atliekinės šilumos panaudojimo. Visa tai mažina aplinkos taršą bei šalies energetinę priklausomybę nuo importuojamo kuro ir leidžia efektyviau panaudoti energijos išteklius.

Raktažodžiai: organinis Renkino ciklas, atliekinė šiluma, elektros energijos gamyba

ĮVADAS

Per praėjusį šimtmetį ekonomikos augimo tempai visame pasaulyje buvo ypač spartūs. Dėl pramonės plėtros, didėjančio transporto priemonių ir energijų vartojančių buitinių prietaisų skaičiaus augo energijos poreikis. Šis energijos poreikis daugiausiai buvo patenkintas deginant milžiniškus iškastinio kuro kiekius, todėl ženkliai padidėjo ir aplinkos tarša.

Siekiant patenkinti vis augantį energijos poreikį ir kartu ženkliai sumažinti aplinkai daromą žalą, būtina plėtoti naujas energijos gamybos technologijas ir energijos šaltinius.

Ieškoti naujų sprendimų Lietuvos energijos poreikiui patenkinti verčia ir kitos priežastys: kintančios naftos kainos ar priklausomybė nuo vienintelio gamtinių dujų tiekėjo. Lietuvos Respublikos tarptautiniai įsipareigojimai, šalies įstatymuose ir programose apibrėžtos nuostatos dėl efektyvaus energijos išteklių vartojimo ir gamintojų bei vartotojų skatinimo efektyviai vartoti vietinius, atsinaujinančiuosius ir atliekinius energijos išteklius sudaro palankią terpę vietinių, atsinaujinančiųjų ir atliekinių išteklių sektoriaus plėtrai. Šiuo metu daugiausia dėmesio skiriama atsinaujinančiųjų energi-

jos išteklių (AEI) plėtrai, tačiau akivaizdu, kad techniškai ir ekonomiškai vertingas šių šaltinių potencialas yra ribotas, o tam tikrų AEI, tokių kaip mediena, panaudojimas susijęs su neigiamu poveikiu aplinkai – miškų kirtimu, atmosferos tarša kietosiomis dalelėmis ir pan.

Vienas alternatyvių energijos šaltinių galėtų būti mažo potencialo atliekinės šiluminės energijos ištekliai. Lietuvos pramonėje prarandama daug mažo potencialo atliekinės šilumos energijos (apie 458 027 tne) [1], todėl būtina ieškoti sprendimų šiam energijos ištekliui panaudoti. Daugelyje technologinių procesų susidaro žemos temperatūros atliekinės šilumos šaltiniai, kurių tinkamai panaudoti, taikant tradicines energijos gamybos ir konversijos technologijas, yra neįmanoma. Dažniausiai tokia mažo potencialo šiluma pramonės įmonėse yra išskiriama į aplinką, šitaip prarandant daug energijos, taip pat labiau teršiant aplinką.

Šiuo metu tiriamos įvairios technologijos, kurios įgalina tinkamai panaudoti mažo potencialo atliekinės energijos išteklius, tarp kurių paminėtini vandens–amoniako ciklas, superkritinis CO₂ ciklas, Stirlingo ir Eriksono ciklai bei termoelektriniai generatoriai. Tyrimai [1–4] rodo, kad vienas

efektyvesnių mažo potencialo atliekinės energijos panaudojimo būdų yra organinio Renkino ciklo (dar vadinamo žemos temperatūros Renkino ciklu) panaudojimas.

TYRIMŲ TIKSLAI IR METODIKA

Darbe nagrinėjamas mažo potencialo atliekinės energijos konversijos į elektros energiją, naudojant organinį Renkino ciklą (ORC), procesas. Analizuojami ORC darbo agentų parametrai ir kiti aspektai siekiant efektyvesnio atliekinės energijos panaudojimo.

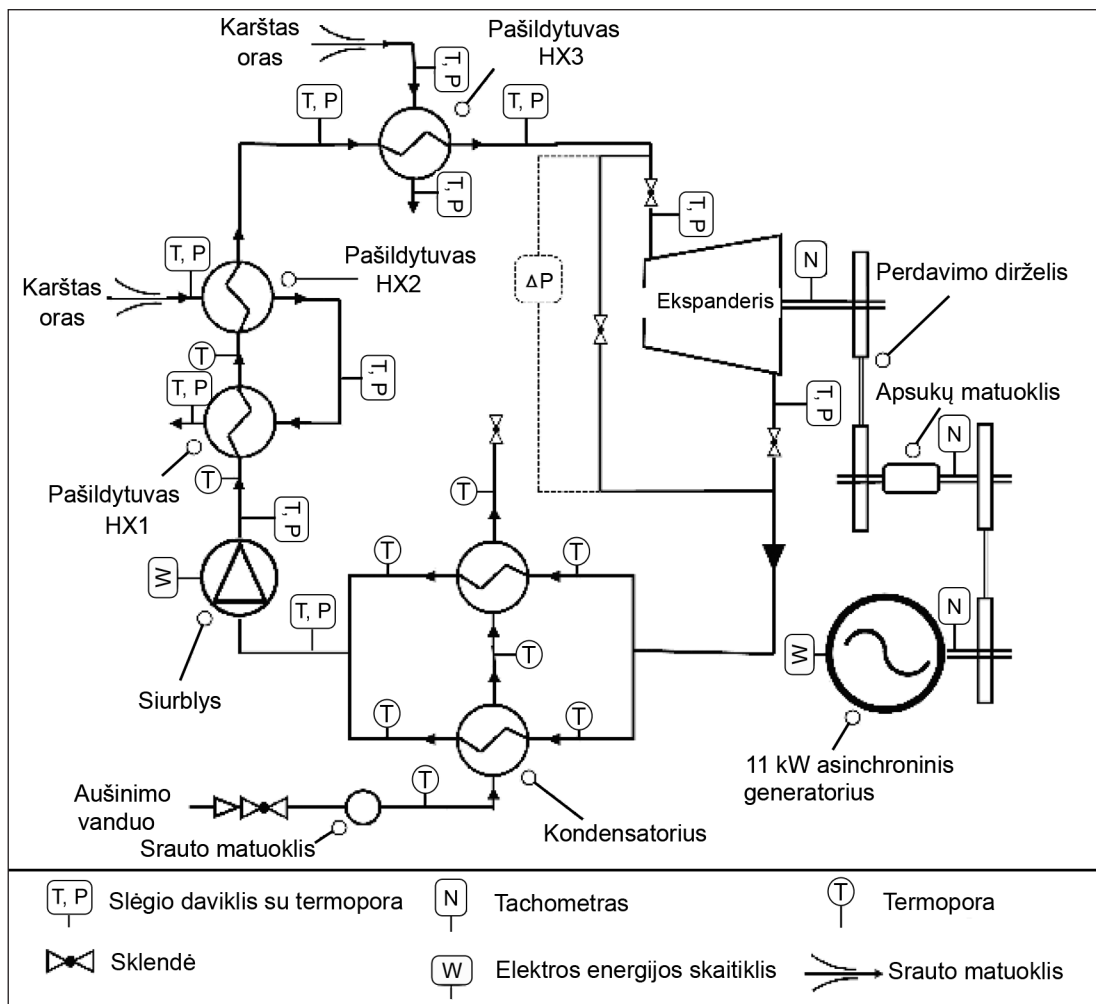
Nagrinėjamas ORC turi keletą svarbių pranašumų, palyginti su kitomis mažo potencialo šilumos panaudojimo technologijomis, tarp kurių svarbiausios yra paprastumas bei nedaug reikalingų įrenginių. Šiame cikle naudojami įrenginiai yra plačiai taikomi tradicinėse energijos gamybos technologijose [5, 6]. ORC sistemoje naudojami tradicinės garo jėgainės komponentai: katilas, turbina, kondensatorius ir siurblys. Esminis skirtumas tarp šių technologijų yra tai, kad ORC darbo agentas yra organinė medžiaga, kurios virimo temperatūra gerokai žemesnė nei vandens, todėl darbo agentą galima išgarinti panaudojant mažo potencialo šilumą. Atliekinės šilumos poten-

cialas naudojamas išgarinti žemos išgarinimo temperatūros organiniam skysčiui, cirkuliuojančiam uždaru ciklu, organinio skysčio garas naudojamas sukurti turbinai, kuri gamina elektros energiją. Iš turbinos išėjęs garas yra kondensuojamas šilumokaityje arba aušintuve-kondensatoriuje [5–7].

Dar vienas svarbus ORC sistemų pranašumas yra tai, kad šiek tiek pakeitus tą pačią ORC sistemą galima panaudoti išgaunant šilumą iš įvairių energijos šaltinių.

Savaime suprantama, kad ORC principu veikiančios įrenginiai pasižymi ir tam tikrais trūkumais: galimos papildomos eksploatacijos išlaidos, nes naudojami brangesni už vandenį organiniai junginiai, kurie gali daryti neigiamą poveikį aplinkai, didelės investicijos ir pan. Be to, ORC principu veikiančių įrenginių elektrinis naudingumo koeficientas yra palyginti mažas (10–20 %). Tarp kliūčių spartesniam šios technologijos diegimui taip pat reikia paminėti nepakankamą jos išvystymą ir tyrimų šioje srityje trūkumą [7, 8].

Pažymėtina, kad Lietuvoje tyrimai šioje srityje iki šiol beveik nebuvo atliekami. Pasaulyje ORC panaudojimas yra tiriama, tačiau dažniausiai nagrinėjamos siauros sritys, pvz., ORC panaudojimas biokuro katilinėse ar terminėse saulės energijos sistemose, tačiau apibendrinantys tyrimai beveik



1 pav. Organinio Renkino ciklo tyrimo eksperimentinio stendo schema

neatliekami, todėl pasigendama nuodugnesnės šios perspektyvios technologijos panaudojimo analizės, ypač atliekinės šilumos utilizavimo požiūriu, nors, kaip minėta, pramonės įmonėse yra prarandama labai daug mažo potencialo atliekinės šilumos. ORC naudojamas gana retai, nes nėra aiškūs įvairūs šios technologijos aspektai, pvz., neaišku, kuriuos parametrus (slėgį ar temperatūrą) turi atitikti šilumos šaltinis, kaip parinkti darbo agentą, atsižvelgus į šilumos šaltinio temperatūrą. Be to, nėra tyrimų, kuriais remiantis būtų galima nustatyti minimalią elektros energijos gamybai tinkamą šilumos šaltinio temperatūrą, parinkti darbo agentą, nustatyti šilumos energijos konversijos į elektros energiją sąlygas.

Atsižvelgiant į šias problemas, Lietuvos energetikos institute pradėta tyrinėti mažų parametrų šilumos konversijos į elektros energiją procesus naudojant ORC ir siekiant įvertinti elektrinio naudingumo koeficientus, atsižvelgus į apkrovas, naudojamus darbo agentus ir šilumos šaltinio pobūdį. Tyrimai atliekami bendradarbiaujant su Lježo universitetu (Belgija), kuriame yra reikalinga laboratorinė įranga ir eksperimentinis stendas. Eksperimentinio stendo schema pavaizduota 1 pav. Jame šilumos šaltinis yra sudarytas iš dviejų karšto oro srautų, kurių temperatūra 150–190 °C. Vienas oro srautas teka pro šilumokaičius HX1 ir HX2, o kitas oro srautas – pro šilumokaitį HX3. Ekspanderis yra oro kompresorius, kuris pritaikytas veikti tokiu režimu. Jis gali būti izoliuotas ir apeitas panaudojant tris sklendes, o to reikia siekiant pradėti bandymus tinkamomis sąlygomis. Ekspanderis sujungtas su asinchroniniu varikliu panaudojant apsukų matuoklį ir du dirželius. Asinchroninis variklis veikia variklio arba generatoriaus režimu ir priklauso nuo ekspanderio generuojamos galios. Asinchroninis variklis pasirinktas todėl, kad jis gali kontroliuoti ekspanderio sukimosi greitį.

Kondensatorius aušinamas vandeniu. 1 pav. pavaizduota jo konfiguracija su dviem šilumokaičiais, kurie sujungti lygiagrečiai, tačiau sujungti galima ir panaudojant kitokią konfiguraciją. Iš kondensatoriaus ištekantis kondensatas siurbliu tiekiamas į didesnio slėgio šildytuvą.

ORGANINIO RENKINO CIKLO VEIKIMO PRINCIPAI

Įprastinis Renkino ciklas yra plačiausiai naudojamas tradicinių garo jėgainių darbo ciklas. Darbo agentas teka į katilą, kuriame yra išgarinamas, toliau garai teka į turbiną, po to į kondensatorių.

Idealaus ciklo atveju išsiplėtimas yra izoadiabatinis, suslėgimas – izochorinis, o šilumos perdavimas garintuve ir kondensatoriuje – izobariniai procesai (2 pav.).

Taškas 1 T–S ir P–V diagramose vaizduoja perkaitinto garo būseną prieš turbiną.

Procesas 1–2. Perkaitintas garas adiabiatiškai plečiasi garo turbinoje ir suka jos rotorius. Šilumos energija verčiama mechanine energija, kuri elektros generatoriuje verčiama elektra. Garo būsenos parametrai iš p_1, t_1, h_1 keičiasi į p_2, t_2, h_2 .

Procesas 2–3. Iš turbinos išėjęs drėgnasis garas izobariškai-izotermiškai kondensuojasi kondensatoriuje, $p_2 = p_3, t_2 = t_3$, garo entalpija šio proceso pabaigoje – h_3 , į aplinką išskiriamos šilumos kiekis Q_c .

Procesas 3–4. Izochorinis kondensato pumpavimas siurbliu į garo katilą. Garo parametrai 4-ame taške: p_4, t_4, h_4 .

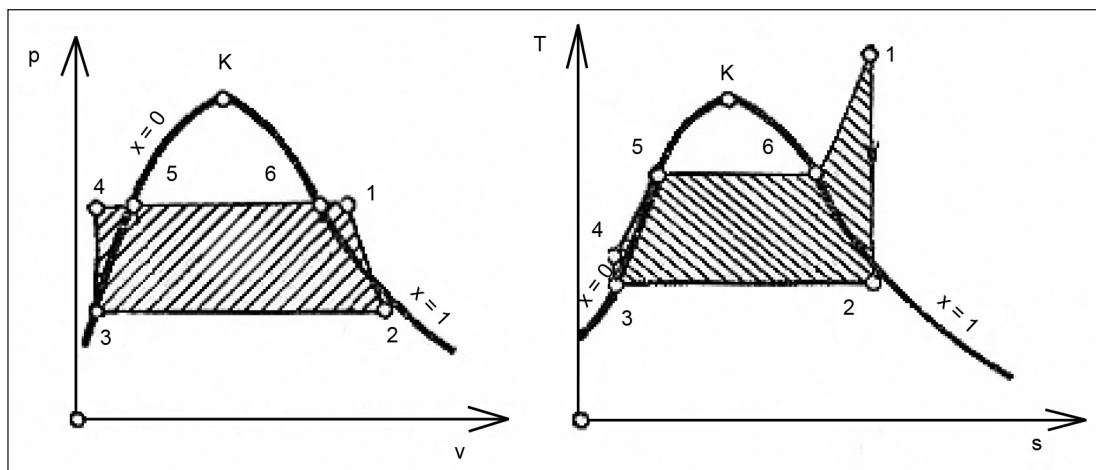
Procesas 4–5. Esant pastoviam slėgiui vanduo kaitinamas iki virimo temperatūros t_5 , garo entalpija pakyla iki h_5 .

Procesas 5–6. Toliau katile izotermiškai-izobariškai garinamas vanduo. Šio proceso pabaigoje gaunamas sausas sotusis garas, kurio parametrai: $p_4 = p_5 = p_6, t_5 = t_6$ ir h_6 .

Procesas 6–1. Perkaitintuve garas izobariškai perkaitinamas. Perkaitinto garo slėgis $p_6 = p_1, t_6, h_1$. Toliau ciklas kartojamas iš pradžių. Kaip minėta, idealaus ciklo atveju išsiplėtimas yra izoadiabatinis, suslėgimas – izochorinis, o šilumos perdavimas garintuve ir kondensatoriuje – izobariniai procesai, tačiau dėl negrįžtamų procesų įtakos realaus ciklo naudingumo koeficientas ir atliktas naudingasis darbas yra mažesni nei idealaus ciklo.

Pagrindiniai negrįžtami procesai yra:

– Nuostoliai siurblyje ir ekspanderyje (trintis, nutekėjimai ir kt.). Garo išsiplėtimo metu tik dalis energijos yra



2 pav. Idealus Renkino ciklas

verčiama į naudingą darbą. Kita dalis verčiama į šilumą ir yra prarandama;

– Slėgio nuostoliai šilumokaičiuose ir pačių šilumokaičių netobulumas. Darbo agentas šilumokaičiuose teka ilgu ir vingiuotu keliu, nes tokiu būdu užtikrinami tinkami šilumos mainai, tačiau tai sukelia slėgio nuostolius, dėl kurių sumažėja energijos, pagaminamos ciklo metu, kiekis.

Pagrindiniai ORC principai yra panašūs į įprastinio Renkino ciklo. Panagrinėkime sudedamuosius ORC procesus ir pagrindinius šio ciklo rodiklius.

Procesas 1–2 (Išsiplėtimas). Iš garintuvo ištekėję (3 taškas) aukštos temperatūros ir slėgio garai plečiasi turbinoje, sukuria mechaninį darbą ir toliau teka į kondensatorių (4 taškas). Turbinos galia apskaičiuojama pagal formulę:

$$P_t = P_{t\text{ideali}} \eta_t = m (h_3 - h_4) \eta_t; \quad (1)$$

čia $P_{t\text{ideali}}$ – ideali turbinos galia W; η_t – turbinos naudingumo koeficientas; m – darbo agento masinis debitas kg/s; h_3 ir h_4 – darbo agento entalpijos įtekant ir ištekant iš turbinos kJ/kg.

Turbinoje vykstantis šilumos proceso negrįžtamumas (toliau negrįžtami procesai) aprašomas formule:

$$I_t = T_0 m (s_4 - s_3); \quad (2)$$

čia s_3 ir s_4 – specifinės darbo agento entropijos įtekant ir ištekant iš turbinos kJ/K.

Procesas 2–3 (Kondensacija). Kondensatoriuje išsiskyrusios šilumos kiekis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$O_k = m (h_1 - h_4). \quad (3)$$

Kondensatoriuje vykstantys negrįžtami procesai apibūdinami formule:

$$I_k = T_0 m \left[(s_1 - s_4) - \frac{h_1 - h_4}{T_z} \right]; \quad (4)$$

čia s_1 ir s_4 – specifinės darbo agento entropijos įtekant ir ištekant iš kondensatoriaus kJ/K; T_z – žemos temperatūros šilumos šaltinio temperatūra K.

Procesas 3–4 (Suslėgimas). Skystis, ištekantis iš kondensatoriaus 1 taške, yra pumpuojamas į garintuvą. Siurblio galia išreiškiama formule:

$$P_s = \frac{P_{s\text{ideali}}}{\eta_s} = \frac{m(h_1 - h_2)}{\eta_s}; \quad (5)$$

čia $P_{s\text{ideali}}$ – ideali siurblio galia W; m – darbo agento masinis debitas kg/s; η_s – siurblio naudingumo koeficientas; h_1 ir h_2 – darbo agento entalpijos įtekant ir ištekant iš siurblio (idealiu atveju) kJ/kg.

Siurblyje vykstantys negrįžtami procesai aprašomi formule:

$$I_s = T_0 m (s_2 - s_1); \quad (6)$$

čia s_1 ir s_2 – specifinės darbo agento entropijos įtekant ir ištekant iš siurblio kJ/kg.

Procesas 4–1 (Garinimas). Garintuve kaitinamas darbo agentas, kuris teka iš siurblio į turbiną. Šilumos kiekis, perduotas nuo energijos šaltinio darbo agentui, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$Q_g = m (h_3 - h_2); \quad (7)$$

čia h_3 ir h_2 – darbo agento entalpijos ištekant ir įtekant į garintuvą kJ/kg.

Garintuve vykstantys negrįžtami procesai aprašomi formule:

$$I_g = T_0 m \left[(s_3 - s_2) - \frac{h_3 - h_2}{T_a} \right]; \quad (8)$$

čia s_3 ir s_2 – specifinės darbo agento entropijos įtekant ir ištekant iš garintuvo kJ/kg; T_a – aukštos temperatūros šilumos šaltinio temperatūra K.

Ciklo naudingumo koeficientas. Šiluminis naudingumo koeficientas yra apibūdinamas kaip ciklo grynosios galios ir garintuve suteiktos šilumos kiekio santykis. Jis parodo, kuri dalis atliekinės šilumos energijos, perduotos darbo agentui garintuve, yra paverčiama naudingumu. Naudingumo koeficientas išreiškiamas:

$$\eta_{ciklo} = \frac{P_t + P_s}{Q_g}. \quad (9)$$

Įrašius į (9) formulę ją sudarančių narių išraiškas pagal (1), (5) ir (7) formules, ORC šiluminis naudingumo koeficientas išreiškiamas lygybe:

$$\eta_{ciklo} = \frac{(h_3 - h_4)\eta_t + (h_1 - h_2)\eta_s^{-1}}{(h_3 - h_2)}. \quad (10)$$

ORC principu veikiančių įrenginių elektrinis naudingumo koeficientas yra mažas (10–20 %). ORC palyginimas su kitomis elektros energijos generavimo technologijomis grafiškai parodytas 3 pav.

Bendras ciklo negrįžtamumas vertinamas sudedant (2), (4), (6) ir (8) formules:

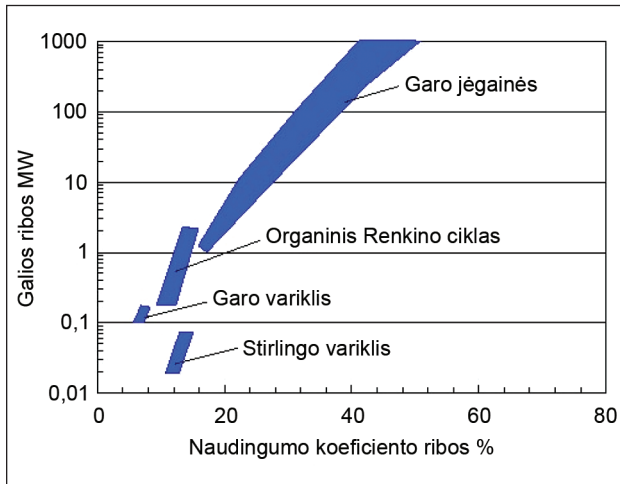
$$I_{ciklo} = \sum_j I_j = I_s + I_g + I_t + I_k = T_0 m \left[-\frac{h_3 - h_2}{T_a} - \frac{h_1 - h_4}{T_z} \right]. \quad (11)$$

Turbinoje generuojama mechaninė energija yra verčiama į elektros energiją elektros generatoriuje. Bendra generuojama elektros galia apskaičiuojama pagal formulę:

$$P_{el} = (P_t + P_s) \eta_{gen}; \quad (12)$$

čia η_{gen} – generatoriaus naudingumo koeficientas.

Kaip matyti, pagrindiniai ORC veikimo principai yra tapatūs įprastinio Renkino ciklo principams. Pagrindinis skirtumas: organiniame cikle darbo agentas yra organinis skystis, kurio virimo temperatūra yra mažesnė, o garų slėgis didesnis nei vandens. Naudojamas toks skystis leidžia žen-



3 pav. ORC palyginimas su kitomis elektros energijos generavimo technologijomis [10]

liai padidinti bendrą ORC naudingumo koeficientą, palyginus su tradicinio Renkino ciklo naudingumo koeficientu. ORC charakteristikos yra panašios į idealaus Karno ciklo charakteristikas. Renkino ciklas yra naudojamas generuoti aukštos temperatūros ir slėgio garai iš žemos temperatūros darbo agento bei garą panaudojant sukuti turbinoms ir elektros generatoriams. ORC naudojamas organinis skystis, kurio garų sotinimo slėgis yra didesnis ir kurio virimo temperatūra yra žemesnė nei vandens, nes tokiu būdu iš mažo potencialo šilumos šaltinio galima generuoti naudingąją energiją.

Termofikacinėse jėgainėse, kuriose taikomas ORC, gali būti deginamas kuras arba naudojama atliekinė šilumos energija ir degimo metu susidarę karšti degimo produktai (arba naudojama atliekinės šilumos energija) perduoda šilumą tepalui. Šis tarpinis tepalo ciklas leidžia lengviau reguliuoti perduodamo energijos srauto temperatūrą. Iš tepalo ciklo šiluma perduodama darbo agentui, kuris virsta garais. Patekę į turbiną garai plečiasi ir atlieka darbą. Gauta mecha-

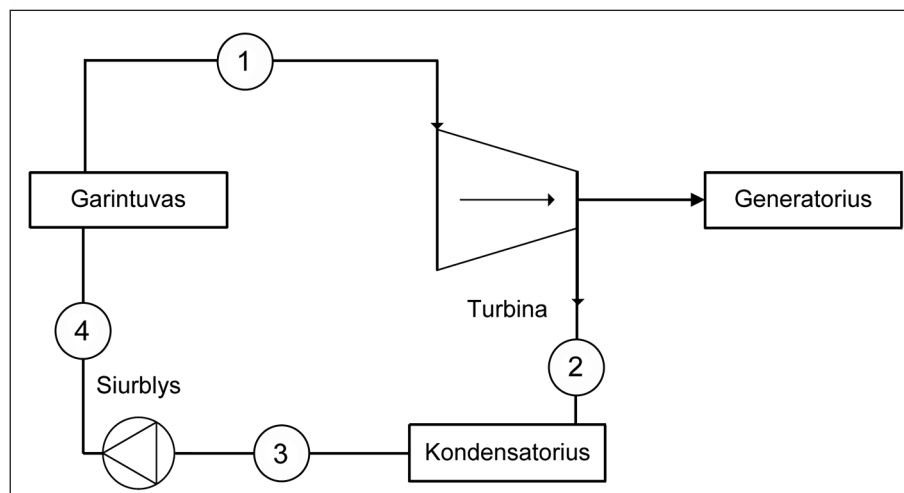
ninė energija generatoriuje verčiama į elektros energiją. Toliau garai teka į kondensatorių, kuriame šiluma gali būti naudojama vandeniui kaitinti. Susikondensavęs darbo agentas grąžinamas į garintuvą. Siekiant padidinti elektros energijos gamybos efektyvumą gali būti naudojamas šilumos rekueratorius, kuris įrengiamas už turbinos prieš kondensatorių. Paprasčiausias ORC veikiančios jėgainės schema pavaizduota 4 pav. Schemoje esantys numeriai atitinka 2 pav. pavaizduoto ciklo tarpinius taškus.

ORC PRAKTINIO TAIKYMO ANALIZĖ

Galimus potencialius šilumos šaltinius, naudotinus ORC, galima suskirstyti į tris pagrindines grupes [7–9]:

1. Atliekinė mažo potencialo šiluma;
2. Saulės energijos terminės sistemos;
3. Geoterminės jėgainės.

ORC pravartu naudoti naudingos energijos generavimui iš atliekinės šilumos. Atliekinės šilumos šaltiniai sąlyginai gali būti suskirstyti į tris grupes: mažo potencialo (temperatūra žemesnė nei 100 °C), vidutinio potencialo (nuo 100 iki 400 °C) ir didelio potencialo (daugiau nei 400 °C). Pavyzdžiui, kaip naudinga energija gali būti generuojama iš atliekinės šilumos, kurios temperatūra 100–200 °C, nėra daug. Kai atliekinės šilumos temperatūra aukštesnė kaip 200 °C, ją su tam tikrais apribojimais galima panaudoti taikant tradicines technologijas, tačiau ir šiuo atveju neapsieinama be sunkumų. Šilumos šaltinio temperatūrai esant didesnei nei 400 °C, galima lengvai taikyti tradicines energijos utilizavimo technologijas. Taikant tradicines technologijas, mažo potencialo atliekinė šiluma gali būti naudingai panaudojama tik tuo atveju, jei yra daug šitokios šilumos ir vartotojų, kuriems reikalinga žemos temperatūros šilumos energija, tačiau minėtos sąlygos susidaro labai retai. Organinio Renkino ciklo taikymas yra viena potencialių galimybių generuoti naudingą energiją iš mažo potencialo atliekinės šilumos. Šiuo atveju ORC gali būti panaudojamas bendros elektros ir šilumos



4 pav. Paprasčiausias ORC veikiančios jėgainės schema

energijos gamybos jėgainėse arba specialiose šilumos utilizavimo jėgainėse.

Kaip bendros elektros ir šilumos energijos gamybos jėgainės pavyzdį galima pateikti mažos galios termofikacinę jėgainę, veikiančią su buitiniu karšto vandens ruošimo katilu. Tokios jėgainės veikimo metu prioritetas gali būti elektros energijos gamyba arba karšto vandens ruošimas. Pirmuoju atveju utilizuojama šiluma, tiesiogiai išsiskyrusi katile, o karštas vanduo yra gaminamas ORC kondensatoriuje, todėl yra žemesnės temperatūros. Antruoju atveju prioritetas yra karšto vandens ruošimas, todėl ciklo šilumos šaltinis yra iš katilo degimo kameros išeinantys dūmai.

Šilumos utilizavimo jėgainės gali būti naudojamos įvairių mažo potencialo šilumos šaltinių utilizavimui. Potencialūs ORC įrenginių šilumos šaltiniai gali būti įvairiose pramonės, energetikos, buities ir kitose sferose, pvz., egzoterminės reakcijos metu išsiskirianti šiluma, džiovimo įrenginių išskiriamos dujos, krosnių išmetamosios dujos, kondensatų šiluma, nuotekų ir kanalizuojamų vandenų šiluma, ventiliacijos sistemų oro šiluma, aušinimo sistemų šiluma ir kt.

Terminėse saulės energijos jėgainėse saulės energija yra sutelkiama, panaudojant veidrodžius, į vadinamąjį saulės energijos bokštą, kuriame įrengta tradicinė garo gamybos ir elektros energijos generavimo jėgainė. ORC gali būti naudojamas terminėse saulės energijos sistemose garo generavimui vietoje tradicinio Renkino ciklo. Taikant ORC kolektoriaus temperatūra gali būti žemesnė, surenkama daugiau saulės energijos, nes susidaro mažesni nuostoliai į aplinką, todėl saulės energijos surinkimo laukų užimamas plotas gali būti mažesnis. Literatūros šaltiniuose yra pateikta keletas terminių saulės sistemų, kuriose taikomas organinis ORC, pavyzdžių, tarp kurių paminėtina 2005 m. Pietų Kanoje įrengta terminė saulės energijos jėgainė, veikianti ORC principu. Šioje jėgainėje kaip darbo agentas buvo naudojamas n-pentanas, o šilumos šaltinio temperatūra – apie 204 °C.

Geoterminių šilumos šaltinių temperatūra kinta nuo 50 iki 350 °C. Tokios temperatūros šilumos šaltinis yra labai tinkamas ORC atveju elektros energijos generavimui.

Nepaisant to, kad ORC principu veikiančių įrenginių technologija dar nėra visiškai iširta ir išplėta, naudojamos šį ciklą veikia keletas jėgainių, iš kurių galima paminėti jėgaines, veikiančias įvairiose Europos Sąjungos vietovėse:

- Biere (Šveicarija) 300 kWel (instaliuota 1998 m.);
- Admont (Austrija) 400 kWel (instaliuota 1999 m.);
- Crissier (Šveicarija) 500 kWel (instaliuota 2002 m.);
- Lienz (Austrija) 1000 kWel (instaliuota 2002 m.);
- Bregenz (Austrija) 1000 kWel (instaliuota 2002 m.);
- Tirano (Italija) 1100 kWel (instaliuota 2003 m.);
- Dobbiaco (Italija) 1500 kWel (instaliuota 2003 m.);
- Neckarsulm (Vokietija) 1000 kWel (instaliuota 2004 m.);
- Sauerlach (Vokietija) 500 kWel (instaliuota 2004 m.);
- Plossberg (Vokietija) 1000 kWel (instaliuota 2004 m.).

ORC NAUDOJAMI DARBO AGENTAI

Darbo agentų parinkimas yra ypač svarbus tinkamam ORC funkcionavimui. Dėl žemų šilumos šaltinių temperatūrų net ir maži šilumos perdavimo proceso netobulumai, kurie tradicinio Renkino ciklo atveju neturi didelės įtakos proceso eigai, ORC atveju labai mažina viso ciklo naudingumo koeficientą. Šie netobulumai labai priklauso nuo darbo agento termodinaminių charakteristikų ir nuo darbo sąlygų [8, 9]. Optimalus darbo agentas turi pasižymėti keletu savybių:

1. Izoentropinė sočiojo garo kreivė. Kadangi ORC tikslas yra mažo potencialo šilumos utilizavimas, neįmanoma taikyti garo perkaitinimo, kaip tai daroma tradiciniame Renkino cikle.
2. Žemas užšalimo taškas, cheminis stabilumas esant darbo temperatūrai. Kitaip nei vanduo, organiniai skysčiai esant aukštai temperatūrai dažniausiai pradeda irti ir jų savybės blogėja. Dėl šios priežasties maksimali šilumos šaltinio temperatūra turi būti ne aukštesnė už darbo agento cheminio stabilumo ribą. Darbo agento užšalimo temperatūra turi būti žemesnė nei žemiausia temperatūra, užfiksuojama ciklo veikimo metu.
3. Didelė savitoji šiluma ir slaptoji garavimo šiluma. Skystis, kuris pasižymi didele slaptąja garavimo šiluma ir

Lentelė. Pagrindinių darbo agentų termodinaminės savybės

Darbo agentas	Kritinis taškas	Garavimo šiluma esant 1 atm. (kJ/kg)	Virimo temperatūra esant 1 atm. slėgiui	Saugumas
Vanduo	374 °C 220 bar	225	100 °C	Nedegus
R-11	198 °C 44,1 bar	180,4	23,5 °C	Nedegus
R-22	96,1 °C 49,9 bar	232,7	-41,4 °C	Nedegus
R-113	214 °C 34,4 bar	143,9	47,8 °C	Nedegus
R-123	184 °C 36,7 bar	171,5	27,7 °C	Nedegus
R-134a	101 °C 40,6 bar	217,2	-26,4 °C	Nedegus
R-245fa	154 °C 36,4 bar	197,5	14,6 °C	Nedegus
R-601 (n-pentanas)	196 °C 33,6 bar	358,7	35,5 °C	Degus
R-601a (izopentanas)	187 °C 33,7 bar	342,8	27,5 °C	Degus
C6H6 (benzolas)	289 °C 49 bar	395,4	79,8 °C	Degus
C7H8 (toluolas)	319 °C 41 bar	362,5	110,4 °C	Degus
C8H10 (p-ksilenas)	343 °C 35 bar	339,9	66,65 °C	Degus

savitąją šilumą, gali absorbuoti daugiau energijos, kurią perduoda garintuvas, todėl gali būti mažesni jo debitai, jėgainės matmenys ir siurblių sunaudojamos energijos kiekis.

4. Kuo mažesnis neigiamas poveikis aplinkai. Šiuo atveju svarbiausi parametrai yra ozono ardymo potencialas ir šiltnamio efekto potencialas.

5. Saugumas. Skystis turi būti nesukeliantis korozijos, nedegus ir netoksiškas. Atsižvelgus į tai, kur jėgainė yra įrengta, saugumas gali būti labai svarbus parametras (pvz., amoniaką nesaugu naudoti gyvenamosiose patalpose). Apie tam tikro skysties saugumą galima pakankamai tiksliai spręsti remiantis šaldymo mašinų darbo agentų apibūdinimais ir suskirstymais, kurie dažnai pateikiami specialioje literatūroje.

6. Prieinamumas ir žema kaina. Tradiciniai organiniame Renkino cikle naudojami darbo agentai yra brangūs. Jų kainą būtų galima sumažinti, jei padidėtų jų gamyba, arba būtų naudojami pigesni pakaitalai, pvz., nebrangūs angliavandeniliai.

7. Tinkami slėgiai. Labai dideli slėgiai neigiamai veikia ciklo patikimumą, vadinasi, tenka naudoti atsparesnius, todėl ir brangesnius, įrenginius.

Duomenys, pateikti lentelėje, leidžia parinkti nagrinėjamam atvejui tinkamiausią darbo agentą.

Įvertinus lentelėje pateiktas darbo agentų termodinamines savybes galima konstatuoti, kad tinkami organiniam Renkino ciklui yra R-123, R-245fa, n-pentanas ir izopentanas. Deja, įvairūs potencialiai tinkami organiniam Renkino ciklui darbo agentai dažniausiai turi tam tikrų trūkumų. Potencialių darbo agentų parinkimas labai priklauso nuo šilumos šaltinio pobūdžio ir savybių, pvz., atliekinės šilumos utilizavimui tinka naudoti tokias medžiagas kaip šaldymo agentas R123, n-pentanas ar izopentanas, tuo tarpu geoterminės šilumos utilizavimui, be šių agentų, yra tinkami ir eteriai ar floro eteriai, nes geoterminės šilumos atveju šilumos šaltinio temperatūra dažniausiai būna žemesnė. Dauguma potencialių darbo agentų, kaip minėta, pasižymi tam tikromis nepageidautinomis savybėmis, pvz., šaldymo agentas R-123 yra ozono sluoksnį ardanti medžiaga [10] ir nuo 2030 m. jį naudoti bus uždrausta, todėl šioje srityje būtina atlikti tolesnius tyrimus ir parinkti ar sukurti darbo agentus, kurie idealiu atveju pasižymėtų visomis minėtomis optimaliomis savybėmis.

IŠVADOS

1. Daugelyje pramoninių procesų susidaro žemos temperatūros atliekinės šilumos šaltiniai, kurių tinkamai panaudoti, taikant tradicinės energijos gamybos ir konversijos technologijas, yra neįmanoma. Dažniausiai tokia mažo potencialo šiluma pramonės įmonėse yra išskiriama į aplinką, šitaip prarandant daug energijos ir didinant šiluminę aplinkos taršą.

2. ORC pagrindiniai principai yra analogiški tradiciniam Renkino ciklui, energijos gamybai naudojami tradici-

nės garo jėgainės komponentai. Esminis skirtumas tarp šių technologijų: ORC darbo agentas yra organinė medžiaga, kurios virimo temperatūra yra žemesnė nei vandens, todėl ją galima išgarinti panaudojant mažo potencialo šilumą.

3. Šiuo metu dirba keletas ORC principu veikiančių jėgainių. Ši technologija, nepaisant jos naudojimo perspektyvos ir gerųjų savybių, yra naudojama nepakankamai, kadangi ORC termodinaminiai procesai nevisiškai ištirti (pažymėtina, kad Lietuvoje ORC tyrimai nebuvo vykdomi, nors prarandami didžiuliai šilumos kiekiai) dėl darbo agentų ir atliekinės energijos išteklių parametru.

4. Pateiktos ir išanalizuotos ORC principinės darbo schemas, nagrinėjami darbo agentai, siekiant efektyvios atliekinės energijos konversijos į elektros energiją.

Gauta 2010 08 23

Priimta 2010 10 11

Literatūra

1. Marcinauskas K. Atliekiniai energijos ištekliai – pirminių energijos išteklių taupymo rezervas: 1991–2002 m. tiriamųjų darbų apžvalga. *Energetika*. 2003. Nr. 1. P. 11–21.
2. Hung T. C. Waste heat recovery of organic Rankine cycle using dry fluids. *Energy Conversion and Management*. 2001. Vol. 42. P. 539–553.
3. Anglino G., Colonna di Paviano, P. Multicomponent working fluids for organic Rankine cycles (ORCs). *Energy*. 1998. Vol. 23. P. 449–463.
4. Quoilin S., Lemort V. Technological and economical survey of organic Rankine cycle systems. *Proceedings of 5th European Conference Economics and Management of Energy in Industry. April 14–17, 2009. Vilamoura, Portugal*. Vilamoura, 2009.
5. Drescher U., Bruggemann D. Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants. *Applied Thermal Engineering*. 2007. Vol. 27. P. 223–228.
6. Schuster A., Karellas S., Kakaras E., Spliethoff H. Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications. *Applied Thermal Engineering*. 2008. Vol. 29. P. 1809–1817.
7. Yamamoto T., Furuhashi T., Arai N., Mori K. Design and testing of the Organic Rankine Cycle. *Energy*. 2001. Vol. 26. P. 239–251.
8. Maizza V., Maizza A. Unconventional working fluids in organic Rankine-cycles for waste energy recovery systems. *Applied Thermal Engineering*. 2001. Vol. 21. P. 381–390.
9. Gu W., Weng Y., Wang Y., Zheng B. Theoretical and experimental investigation of an organic Rankine cycle for a waste heat recovery system. *Journal of Power and Energy*. 2009. Vol. 223. No. 5. P. 523–533.
10. <http://en.wikipedia.org>

Andrejus Burlakovas, Vladislovas Katinas

UTILIZATION OF WASTE HEAT FOR ELECTRIC POWER GENERATION BY ORGANIC RANKINE CYCLE

Summary

In Lithuanian industry, there is a huge – about 458.027 toe – potential of waste heat energy. Therefore, it is very important to look for the solutions of this problem. One of such solutions could be implementation of the organic Rankine cycle (ORC) which could be employed for utilization of low-temperature heat sources for electric power generation. Analysis has shown that ORC efficiency depends on working fluid thermodynamic characteristics, waste heat temperature and other factors such as the source of utilizing waste heat, etc. Waste heat is used for evaporation of organic liquid which is characterized by a low evaporation temperature circulating in a closed cycle. The vapour of organic liquid is used to spin the gas turbine that produces electric power. The vapour coming out of the turbine is condensed in a condenser. In this study, analyzed are the ORC working fluid selection and the efficiency of the heat conversion process in electricity production. The employment of ORC would help to decrease the dependence of our state on imported fossil fuel, increase the energetic efficiency of industrial companies and help to decrease environmental pollution.

Key words: organic Rankine cycle, waste heat, generation of electric power

Андрей Бурлаков, Владислав Катинас

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЭНКИНА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ИЗ ИЗБЫТОЧНОЙ ТЕПЛОТЫ

Резюме

Промышленность Литвы теряет огромное количество избыточной теплоты – около 458 027 тнэ. Очень важно найти решение этой проблемы. Одним из решений утилизации низкопотенциального тепла может быть использование органического цикла Рэнкина (ОЦР) для производства электроэнергии. Исследованием определено, что эффективность ОЦР зависит от термодинамических свойств рабочего агента, температуры избыточной теплоты и других факторов, например, источника тепловой энергии и т. д. Потенциал избыточной теплоты используется для выпарки низкотемпературной (по испарению) органической рабочей жидкости, пар органической рабочей жидкости вращает турбину, турбина вращает генератор и генерирует электроэнергию. Затем пар поступает в конденсатор. В данной работе анализируются подбор рабочих агентов ОЦР, эффективность конверсии тепловой энергии в электроэнергию. Использование ОЦР может уменьшить энергетическую зависимость страны от импортируемого топлива, повысить энергетическую эффективность промышленных предприятий, уменьшить загрязнение окружающей среды.

Ключевые слова: органический цикл Рэнкина, избыточная теплота, производство электроэнергии