

VAKUUMINIŲ IR PLOKŠČIŲJŲ SAULĖS KOLEKTORIŲ SISTEMŲ EKSERGINIŲ
EFEKTYVUMŲ PALYGINIMASJuozas Bielskus¹, Karolis Januševičius², Vytautas Martinaitis³

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹juozas.bielskus@st.vgtu.lt; ²karolis.janusевичius@vgtu.lt; ³vytautas.martinaitis@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje eksergijos požiūriu nagrinėjamos dvi saulės kolektorių sistemos, skirtos karštam vandeniui gaminti. Plokščiųjų ir vakuuminių saulės kolektorių modeliavimas atliktas *TRNSYS* programa. Modeliuota vienerių metų periodui Lietuvos klimatinėmis sąlygomis 6 minučių laiko žingsniu skaičiuojant energijos ir eksergijos srautus kiekvienam laiko žingsniui ir sudarant energinius ir ekserginis balansus. Sistemos ir posistemų efektyvumo rodiklių kitimo rezultatai pateikti grafiškai. Išanalizavus akivaizdu, kad pasirinktomis sąlygomis plokščiųjų ir vakuuminių saulės kolektorių sistemos, turinčios tą pačią funkcinę paskirtį, veikia skirtingu efektyvumu.

Reikšminiai žodžiai: eksergija, *TRNSYS*, saulės kolektorių sistema, efektyvumas.

Įvadas

Termodinaminės analizės metodas, jungiantis pirmąjį (PTD) bei antrąjį termodinamikos (ATD) dėsnius ir nustatantis ne tik energijos kiekį, bet ir jos kokybę, vis plačiau taikomas atsinaujinančios energijos sistemoms vertinti ir optimizuoti. Šis metodas, dar žinomas kaip ekserginė analizė, yra naudinga priemonė norint identifikuoti mažiausio energinio ir ekserginio efektyvumo sistemos elementus, energijos nuostolių dydį. Ekserginė analizė gali padėti projektuoti efektyvesnes energetines sistemas (Gunerhan, Hepbasli 2007). Eksergija jungia apsupties bei energijos būsenos parametrus ir yra kiekybinė energijos kokybės išraiška. Dėl šios priežasties ekserginė analizė atliekama kartu su energine analize. Tikslas – kuo racionaliau naudoti energijos išteklius (Torío *et al.* 2009).

Nepakankamai ištirti šio metodo taikymo atvejai nagrinėjant iš kelių ar keliolikos komponentų susidedančias sistemas – komponentų rinkinius. Taikant išsamų dinaminio vertinimo metodą, aprėpiantį metų trukmės periodą, galima būtų identifikuoti kritinius sistemos ir jos komponentų veikimo periodus ir sąlygas. Įprastai, kai sistema vertinama taikant vidutinius, suminius ar pan. rodiklius, dėl teigiamųjų ir neigiamųjų verčių tarpusavio kompensavimosi identifikuoti trumpalaikes sistemos veikimo problemas yra sudėtinga. Be to, didėjant inžinerinių sistemų optimizavimo galimybėms, vis dažniau toks vertinimas taikomas, kai siekiama užtikrinti kuo mažesnę generuotos entropijos kiekį naudojant atsinaujinančios energijos išteklius. Tai savo ruožtu užtikrina mažesnes išteklių sąnaudas tiek kiekybiniu, tiek kokybiniu požiūriu.

Literatūros apžvalga

Literatūros šaltiniuose gausiai minimi ekserginės analizės taikymo atvejai saulės energijos transformatoriams, bet ne ją naudojančioms sistemoms (Torío *et al.* 2009). F. Jafarkazemi ir E. Ahmadifar (2012), S. Farahat ir kt. (2009), L. Ceylan (2012), D. Fiacchi, E. Bertolli (2012) atliko teorinius ir eksperimentinius ekserginis tyrimus su saulės kolektoriais. Esminis šių darbų skirtumas nuo šiaame straipsnyje pateikiamo atvejo – klimatinės sąlygos ir vertinimo trukmė.

H. Gunerhan ir A. Hepbasli (2007) eksperimentiškai tyrė nedidelę saulės kolektorių sistemą, skirtą karštam vandeniui ruošti, Turkijos klimatinėmis sąlygomis, kai vidutinė metinė temperatūra yra ~11 °C. Pasinaudodami stebėjimų rezultatais jie atliko sistemos veikimo ekserginę analizę. Ekserginis požiūriu vertinti visi pagrindiniai elementai – saulės kolektorius, akumuliacinė talpykla ir cirkuliacinis siurblys (Gunerhan, Hepbasli 2007). Šių posistemų tyrimai atlikti pastoviomis sąlygomis, neatsižvelgiant į realiomis sąlygomis visuomet per metus kintančius klimato veiksnius.

Literatūros apžvalgoje minimi autoriai akumuliacinę talpą nagrinėja kaip tūrinį šilumokaitį, kuriame šilumos perdavimas vyksta dėl masės mainų, arba vengiama visos sistemos elementų ir visos sistemos vertinimo. Tokiu atveju neatsižvelgiama į energijos sukaukimą akumuliacinėje talpykloje ir sistemos veikimo akumuliacinio režimo specifiką. Vertinant visos sistemos komponentų veikimą įvairiais režimais galima objektyviau prognozuoti sistemos efektyvumo kitimą ir formuluoti rekomendacijas ilgalaikį periodą veikiančiai sistemai tobulinti.

Straipsnyje pateikta dviejų skirtingų saulės kolektorių tipų (plokščiųjų ir vakuuminių) sistemų analizė atlikus imitacinį modeliavimą. Siekiant objektyviai palyginti, abiejų sistemų komponentų dydžiai parinkti vienodam metiniam energijos kiekiui generuoti. Esminis skirtumas nuo kitų apžvelgtų darbų – išsamus sistemos sezoninio veikimo modeliavimas nustatant eksergijos srautus ir nuostolius 6 minučių laiko žingsniu. Tokiu būdu siekiama tinkamai įvertinti esminių sistemos elementų tarpusavio sąveiką ir atsižvelgti į vartojimo pobūdžio ir klimatinė sąlygų kitimo įtaką sistemos efektyvumui.

Tyrimo objektas

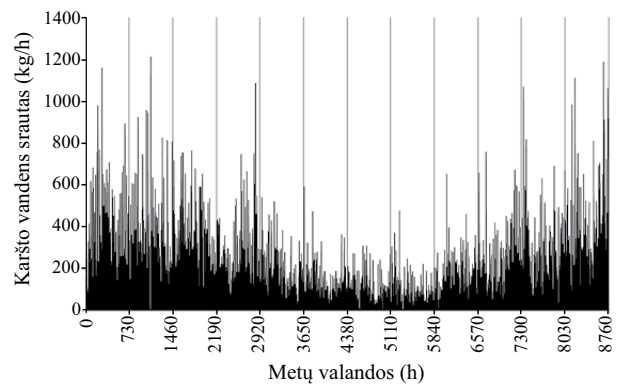
Straipsnyje pateikiama plokščiųjų ir vakuuminių saulės kolektorių sistemų metinio veikimo analizė. Abiejose sistemose akumuliacinės talpyklos viršutinėje dalyje numatytas „budintis“ tūris, kuriame papildomu išoriniu šildytuvu palaikoma 55 °C laipsnių temperatūra. Šis sprendimas lemia vidutinės saulės kolektorių pagaminto šilumnešio temperatūros padidėjimą ir saulės kolektorių cirkuliacinio siurblio veikimo trukmės sumažėjimą. Papildomas šilumos generatorius yra už nagrinėjamosios sistemos ribų. Šio įrenginio paskirtis – tiekti trūkstamą energijos kiekį akumuliacinės talpyklos „budinčio“ tūrio temperatūrai palaikyti. Saulės kolektorių techninės charakteristikos pateiktos 1 lentelėje. Akumuliacinės talpyklos dydis – 1000 litrų, savitieji šilumos nuostoliai – 0,8 W/(m² K).

1 lentelė. Saulės kolektorių charakteristikos
Table 1. Specifications of solar collectors

Rodiklis	Saulės kolektoriai	
	vakuuminiai	plokštieji
Optinis efektyvumas, %	85 %	78,5 %
Nuostolių koeficientas, a_1 , W/(m ² ·K)	1,38	4,12
Nuostolių koeficientas, a_2 , W/(m ² ·K ²)	0,001 3	0,006 4
Absorberio plotas, m ²	1,8	4,6

Saulės sistemos komponentų dydžiai pasirinkti atsižvelgiant į *f-chart* metodiką (Duffie, Beckman 2006), užtikrinant saulės frakciją vasaros mėnesiais artimą vienetui – taip išvengiama sistemos perkaitimo ir neefektyvaus transformuotos energijos praradimo.

Siekiant atspindėti karšto vandens poreikio netolygumą remiamasi pagal U. Jordan ir K. Vajen aprašytą metodiką generuota poreikių kitimo kreive. Tikimybėmis grįsto suvartojamo karšto vandens kiekio kitimas pateikiamas 1 paveiksle (Jordan, Vajen 2000)

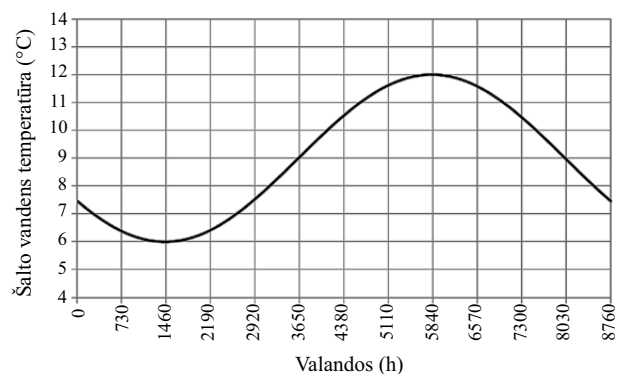


1 pav. Karšto vandens srauto grafikas, atspindintis suvartojamo vandens kiekius

Fig. 1. Consumption flow of domestic hot water

Šios karšto vandens vartojimo tendencijos atspindi metinį energijos poreikio kitimą ir periodinius vartojimo netolygumus, darančius nemažą įtaką saulės kolektorių sistemos energiniam efektyvumui (Jordan, Vajen 2000).

2 pav. pateikiamas ištekančio šalto vandens temperatūros kitimo per metus grafikas. Temperatūrų kitimas apskaičiuotas taikant sinus funkciją. Tiekiamo šalto vandens temperatūros kitimo ribos – nuo 6 iki 12 laipsnių.



2 pav. Metinis šalto vandens temperatūros kitimas

Fig. 2. Variations in the annual temperature of cold water

Tyrimo metodika

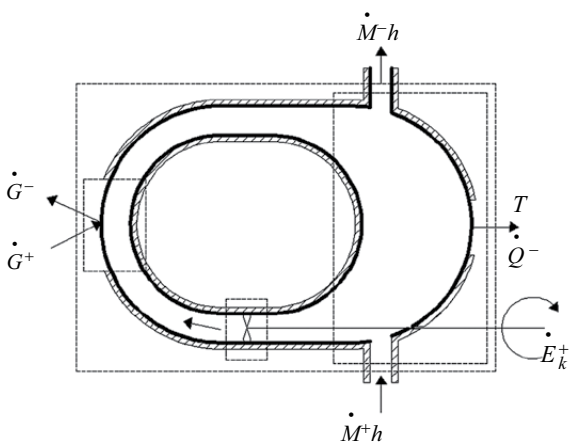
Sistemoje transformuojama eksergija skaitine išraiška lygi didžiausiam galimam gauti darbui toje sistemoje procese. Taigi eksergija gali būti apibrėžiama kaip didžiausias teoriškai galimas gauti darbas, pasiekiant pusiausvyrą tarp sistemos ir jos aplinkos būsenos parametrų. Ekserginio balanso lygtys susieja pirmąjį termodinamikos dėsnį (kiekybė) ir antrąjį termodinamikos dėsnį (kokybė). Atliekant termodinaminę analizę yra sudaromos masės, energijos ir eksergijos balanso lygtys. Šiame uždavinyje šios lygtys sprendžiamos taikant kvazistatinio proceso prielaidas.

Kaip apsupties temperatūra T_a (angl. *dead state*) pasirinkta aplinkos oro temperatūra. Ši prielaida pasirinkta dėl aplinkos oro temperatūros poveikio energijos generavimo galimybėms atsinaujinančių energijos išteklių sistemose.

Bendrosios lygtys

Nagrinėjamas dinaminis procesas supaprastinamas kiekvienu laiko momentu taikant nusistovėjusį režimą. Ekserginis srautų žymenys pateikiami pagal L. Borel (1991) metodiką.

Abstrahuotą pastovų tūrį V užimanti ir nuostoviuoju režimu veikianti atviroji termodinaminė sistema yra atmosferoje, kurios slėgis P_a ir temperatūra T_a . Saulės kolektorių sistema skirta karštam vandeniui ruošti (3 pav.).



3 pav. Termodinaminė saulės kolektorių sistema
Fig. 3. Thermodynamic system of solar collectors

3 pav. pavaizduota termodinaminė saulės kolektorių sistema. Saulės kolektorių posistemis absorbuoja Saulės spinduliuotę, šiluminė energija kaupiasi sistemos viduje ir dėl šilumos ir masės mainų yra perduodama karšto vandens srautui.

Pirmasis termodinamikos dėsnis (PTD) sistemai apskaičiuoti gali būti užrašomas lygtimi

$$\sum[\dot{G}^{+,-}] + \sum[\dot{Q}^{+,-}] + \sum[\dot{E}_k^{+,-}] + \sum[\dot{M}^{+,-}h] = 0, \quad (1)$$

čia $\dot{E}_k^{+,-}$ – sistemos gautas (+) arba sistemos atiduotas (–) techninio darbo kiekis, kJ/h; $\dot{G}^{+,-}$ – saulės sistemai suteikta (+) arba sistemos atspindėta (–) Saulės spinduliuotė, kJ/h; $\dot{Q}^{+,-}$ – gautas (+) ar atiduotas (–) šilumos srautas, kJ/h; h – pilnutinė fluideo entalpija, kJ/kg; M – masinis šilumnešio srautas, kg/h.

Pilnutinė entalpija įvertina srauto kinetinę ir potencinę energiją. Entalpijos ir masinio srauto sandauga vadinama virsmine energija $\dot{W}^{+,-}$, kJ/h.

Antrojo termodinamikos dėsnio (ATD) balanso lygtis gali būti išreikšta įeinančios, išeinančios eksergijos ir ekserginis srautų skirtumas yra ekserginiai nuostoliai, kurie rodo darbo sumažėjimą dėl sistemos negrįžtamumo. Jie kiekybiškai išreiškia kokybinę energijos nuvertėjimo (degradacijos) sąvoką (Martinaitis 2007). ATD išraiška:

$$\sum \dot{E}_{in}^{+,-} - \sum \dot{E}_{out}^{+,-} = \dot{L}, \quad (2)$$

čia \dot{L} – eksergijos nuostoliai, kJ/h; $\dot{E}_{in}^{+,-}$ – įeinančios energijos srautas, kJ/h; $\dot{E}_{out}^{+,-}$ – išeinančios energijos srautas, kJ/h.

Formulės (2) skleidinys:

$$\sum[\dot{E}_G^{+,-}] + \sum[\dot{E}_q^{+,-}] + \sum[\dot{E}_k^{+,-}] + \sum[\dot{E}_w^{+,-}] = \dot{L}, \quad (3)$$

čia $\dot{E}_q^{+,-}$ – sistemos gautas (+) arba atiduotas (–) šiluminės eksergijos kiekis, kJ/h; $\dot{E}_G^{+,-}$ – sistemos gautas (+) arba atiduotas (–) Saulės spinduliuotės eksergijos kiekis, kJ/h; $\dot{E}_k^{+,-}$ – sistemos gautas (+) arba atiduotas (–) techninio darbo kiekis, kJ/h; $\dot{E}_w^{+,-}$ – sistemos gautas (+) arba atiduotas (–) virsmo eksergijos kiekis, kJ/h.

Šilumos srauto eksergija apskaičiuojama Karno faktorių (η_c) dauginant iš šilumos srauto:

$$\dot{E}_q = Q_i \cdot \eta_c = Q_i \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_i}\right), \quad (4)$$

čia $\left(1 - \frac{T_a}{T_i}\right)$ – Karno faktorius; T_a – aplinkos temperatūra, K; T_i – šilumos srauto temperatūra, K; Q_i – sistemos gautas ar atiduotas šilumos kiekis, kJ/h.

PTD entalpijos analogas ATD yra pilnutinė masės koentalpija k , vertinama pagal formulę:

$$k = h - T_a \cdot s, \quad (5)$$

čia s – entropijos kiekis, kJ/K.

Tuomet virsmo eksergijos kiekis yra vertinamas pagal lygtį

$$\dot{E}_w = \sum [k \dot{M}]. \quad (6)$$

Sistemos ekserginis nuostolius lemia procesų negrįžtamumas, ir jie gali būti apskaičiuojami pagal lygtį

$$\dot{L} = T_a \cdot \Delta S. \quad (7)$$

Toliau pateiktos visos sistemos posistemų ir pačios sistemos ekserginio balanso lygtys.

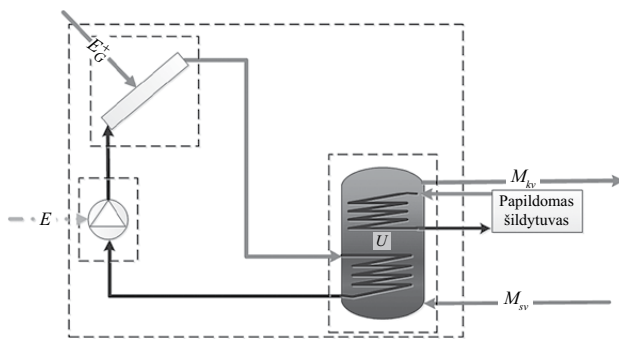
Saulės energijos suteiktas šiluminės eksergijos kiekis skaičiuojamas pagal formulę (Petela 2003)

$$\dot{E}_G^+ = A \cdot G \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right) \right), \quad (8)$$

čia A – saulės kolektorių plotas, m^2 ; G – Saulės spinduliuotė, tenkanti $1 m^2$, W/m^2 ; T_s – Saulės paviršiaus temperatūra, K ($T_s \approx 6000 K$).

Sistemos ir pavienių elementų balanso lygtys

4 pav. pateikiama nagrinėjamųjų sistemų bendroji schema, kurioje matyti į sistemą įeinantys ir iš jos išeinantys ekserginiai srautai.



4 pav. Karšto vandens ruošimo naudojant saulės energiją sistema: E_G^+ – Saulės spinduliuotės eksergija, pasiekianti saulės kolektorių, E – eksergija, elektros energijos forma. M_{kv} – karšto vandens srautas, M_{sv} – šalto vandens srautas
Fig. 4. A system of hot water prepared using solar energy

Ši saulės kolektorių sistema (4 pav.) skaidoma į posistemius, ir rašoma kiekvieno elemento eksergijos balanso lygtis.

Ekserginiai sistemos ir pavienių elementų efektyvumai

Sistemos ar jos elemento ekserginis efektyvumas išreiškiamas iš sistemos išeinančių ir į ją įeinančių ekserginių srautų santykiu:

$$\eta_{ex} = \frac{\sum E_{out}^-}{\sum E_{in}^+} = 1 - \frac{\sum L}{\sum E_{in}^+}. \quad (9)$$

Formulėje pateikti dydžiai jau taikyti ankstesnėse formulėse. Bet kuriuo atveju šios termodinaminės sistemos tobulumo laipsnį rodančio koeficiento reikšmė yra $0 \leq \eta_{ex} \leq 1$. Jei techninė sistema neatiduoda jokio eksergijos srauto, šis koeficientas yra lygus nuliui, o idealioje sistemoje – vienetui.

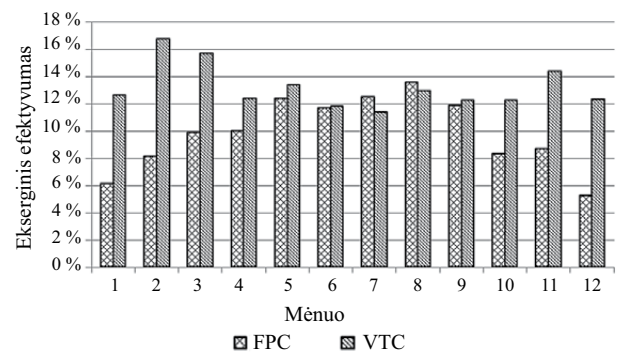
Tyrimo rezultatai

Imitacinis modeliavimas atliekamas *TRNSYS* (Klein *et al.* 2010) terpėje. Programos skaičiavimų tikslumas 0,000 1, ir užtikrinama, kad sistemos elementų nekorektiškas funkcionavimas neviršytų daugiau kaip 1 % vertinamo periodo trukmės. Rezultatai gaunami naudojantis validuotais programos elementais. Taip pat skaičiavimams naudojami meteorologiniai *Meteonorm* (Meteotest 2011) programa generuoti Vilniaus vietovės duomenys.

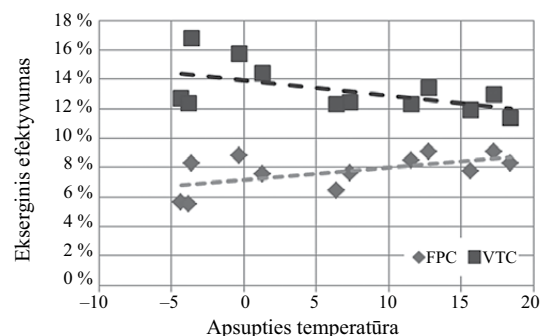
Apdorojus modeliavimo rezultatus pagal minėtąją metodiką kiekvienai metų valandai atliekamas ekserginio balanso skaičiavimas. Atliekant balanso skaičiavimus nustatomi sistemų ir jų elementų ekserginiai efektyvumai – apibendrintieji mėnesiniai duomenys ir pateikiami grafiškai.

5 pav. pateikiami apskaičiuoti plokščiųjų (*FPC*) ir vakuuminių (*VTC*) saulės kolektorių ekserginiai efektyvumai. Iš šio paveikslėlio akivaizdu, kad plokščiųjų saulės kolektorių efektyvumas didžiausias yra šiltuoju metų laikotarpiu, o vakuuminių – šaltuoju.

Saulės kolektorių ekserginis efektyvumas neturi ryškios priklausomybės nuo vieno konkretaus rodiklio, tačiau galima įvardyti tendencingą priklausomybę nuo išorės oro temperatūros (6 pav).



5 pav. Saulės kolektorių ekserginiai efektyvumai
Fig. 5. Exergetic efficiency of solar collectors



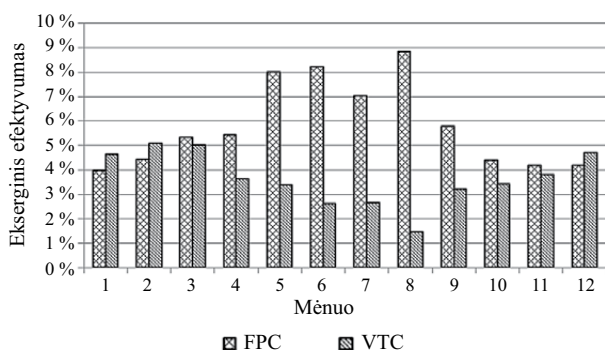
6 pav. Plokščiųjų ir vakuuminių saulės kolektorių ekserginio efektyvumo priklausomybė

Fig. 6. The dependence of the efficiency of a flat plate and vacuum tube on ambient temperature

Plokščiųjų saulės kolektorių efektyvumo kitimo tendenciją atspindi energinio vertinimo rezultatai, tačiau vakuuminių saulės kolektorių efektyvumo rodiklis krinta didėjant apsupties temperatūrai dėl pagaminamos energijos aukštesnės temperatūros ir padidėjusių nuostolių.

Visais metų sezonais vakuuminių saulės kolektorių efektyvumas yra didesnis už plokščiųjų. Plokščiųjų kolektorių efektyvumas svyruoja nuo 5,28 % iki 13,65 %, o vakuuminių – nuo 11,40 % iki 16,81 %. Plokščiųjų saulės kolektorių vidutinis metinis efektyvumas yra 9,92 %, o vakuuminių – 13,24 %.

Saulės kolektorių pagaminta energija talpinama akumuliacinėje talpykloje. Ji įkraunama naudojant integruotuosius šilumokaičius. Talpykla iškraunama vykstant masės mainams; dėl šilumos laidumo pro talpyklos sieneles, atsirandančio esant temperatūrų skirtumui tarp talpinamo šilumnešio ir supančios aplinkos, patiriami energijos nuostoliai. Šie veiksniai, atliekant energinius ir ekserginis skaičiavimus, įvertinti. Apibendrinamieji mėnesinio efektyvumo duomenys pateikiami 7 paveiksle.



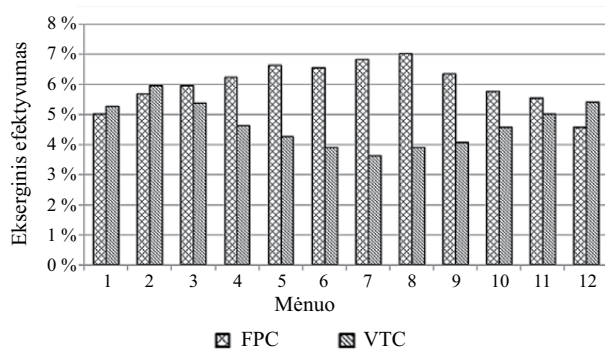
7 pav. Akumuliacinių talpyklų ekserginio efektyvumo skirtingose sistemose duomenys

Fig. 7. Exergetic efficiency of accumulation tanks in different systems

7 pav. pateikti akumuliacinių talpyklų efektyvumo sistemose, veikiančiose su plokščiaisiais (*FPC*) ir vakuuminiais (*VTC*) saulės kolektoriais, duomenys. Akivaizdu priešingos efektyvumo kitimo tendencijos, palyginti su saulės kolektorių komponentais, t. y. didžiausias plokščiųjų saulės kolektorių sistemos akumuliacinės talpos efektyvumas pasiekiamas šiltuoju metų laikotarpiu, o vakuuminių priešingai – šaltuoju. *FPC* sistemos talpyklos efektyvumas svyruoja nuo 3,98 % iki 8,85 %, o *VTC* – nuo 1,47 % iki 5,08 %. *FPC* talpyklos vidutinis metinis efektyvumas yra 5,82 %, o *VTC* talpyklos – 3,65 %. Vakuuminių kolektorių talpyklos metinis ekserginis efektyvumas mažesnis už plokščiųjų talpyklos, nes *VTC* akumuliacinėje talpykloje vidutinė temperatūra aukštesnė už vidutinę *FPC* talpyklos metinę temperatūrą.

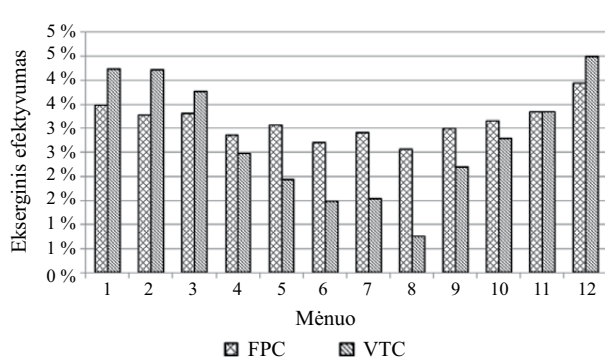
8 pav. pateikti cirkuliacinių siurblių efektyvumo sistemose, veikiančiose su plokščiaisiais (*FPC*) ir vakuuminiais (*VTC*) saulės kolektoriais, duomenys. Akivaizdu, kad cirkuliacinių siurblių ekserginis efektyvumas pasiskirstęs kaip ir akumuliacinių talpyklų, t. y. plokščiųjų saulės kolektorių sistemos akumuliacinės talpyklos didžiausias efektyvumas pasiekiamas šiltuoju metų laikotarpiu, o vakuuminių, priešingai, – šaltuoju. *FPC* sistemos siurblio efektyvumas kinta nuo 4,57 % iki 7,03 %, o *VTC* sistemos siurblio – svyruoja nuo 3,63 % iki 5,96 %. *FPC* siurblio vidutinis metinis efektyvumas yra 6,02 %, o *VTC* siurblio – 4,68 %. *FPC* sistemos siurblio ekserginis efektyvumas didesnis dėl mažesnių ekserginis nuostolių, kuriems įtakos turi žemesnė negu *VTC* sistemos vidutinė mėnesinė temperatūra.

9 pav. pateikiama plokščiųjų saulės kolektorių visos sistemos ir vakuuminių saulės kolektorių visos sistemos ekserginio efektyvumo duomenys. Vienoda tendencija, t. y. didžiausias sistemų efektyvumas pasiekiamas šaltuoju metų laikotarpiu. Plokščiųjų saulės kolektorių sistemos bendras ekserginis efektyvumas svyruoja nuo 2,70 % iki 3,93 %, o



8 pav. Cirkuliacinių siurblių ekserginio efektyvumo skirtingose sistemose duomenys

Fig. 8. Exergetic efficiency of a circulation pump in different systems



9 pav. Plokščiųjų ir vakuuminių saulės kolektorių sistemų ekserginis efektyvumas

Fig. 9. A comparison of the exergetic efficiency of flat plate and vacuum tube solar thermal systems

o vakuuminių – nuo 0,75 % iki 4,50 %. Plokščiųjų saulės kolektorių vidutinis metinis efektyvumas yra 3,13 %, o vakuuminių saulės kolektorių sistemos – 2,77 %.

Nors vakuuminių saulės kolektorių efektyvumas yra didesnis už plokščiųjų, bet visos sistemos galutinis rezultatas priešingas. Atsižvelgiant į galutinius analizės rezultatus, nagrinėtomis sąlygomis, eksergijos požiūriu efektyviau naudoti plokščiųjų saulės kolektorių sistemas, bet prieš tai reikia atsižvelgti ir į ekonominius rodiklius. Kita vertus, gauti skaičiavimo rezultatai ir taikytas algoritmas naudingi atliekant pastatų aprūpinimo energija sistemų ekserginę analizę.

Išvados

Atliktas dviejų skirtingų saulės kolektorių sistemų ekserginis vertinimas. Apskaičiuotos sistemos charakteristikos valandos žingsniu, sudaryti ekserginiai balansai ir apskaičiuotas saulės kolektorių sistemos ir jos komponentų mėnesinis efektyvumo kitimas. Gauti rezultatai gali būti apibendrinti taip:

1. Nagrinėtos plokščiųjų saulės kolektorių sistemos ekserginis efektyvumas kinta nuo 2,7 % iki 3,93 %, o vakuuminių saulės kolektorių – nuo 0,75 % iki 4,50 %. Plokščiųjų saulės kolektorių sistemos vidutinis metinis efektyvumas yra 3,13 %, o vakuuminių saulės kolektorių sistemos – 2,77 %.
2. Nors nustatytas vakuuminių saulės kolektorių ekserginis efektyvumas yra didesnis už plokščiųjų saulės kolektorių, bet visos sistemos galutinis rezultatas priešingas. Šiam rezultatui turėjo įtakos tai, kad, naudojant vakuuminius saulės kolektorius, vidutinė akumuliacinėje talpykloje ir sistemoje palaikoma temperatūra yra aukštesnė, palyginti su plokščiųjų saulės kolektorių akumuliacinės talpyklos ir sistemos vidutine temperatūra, o didėjant vandens temperatūrai atitinkamai didėja ir šilumos nuostoliai į aplinką.
3. Pagal šios analizės rezultatus galima teigti, kad didesnio šiluminio efektyvumo komponentų diegimas ne visuomet užtikrina aukštesnį termodinaminį sistemos efektyvumą, todėl būtina optimizuoti eksploatavimo režimus ir užtikrinanti racionalias veikimo temperatūras. Taikant šios analizės metodus, atsiranda galimybė siekti mažiausių elektros energijos sąnaudų ir didžiausio pagamintos šiluminės energijos kiekio.
4. Gauti skaičiavimo rezultatai ir taikytas algoritmas gali būti tikslingi atliekant pastatų aprūpinimo energija sistemų ekserginę analizę.

Padėka

Tyrimą finansavo Lietuvos mokslo taryba (sutarties Nr. ATE-03/2012). Autoriai dėkoja už pagalbą VGTU Civilinės inžinerijos mokslo centro Pastato energetikos ir mikroklimato sistemų laboratorijai.

Literatūra

- Borel, L. 1991. *Thermodynamique et energetique*. Lausanne: Presses polytechniques et Universitaires Romandes.
- Duffie, J. A.; Beckman, W. A. 2006. *Solar engineering of thermal processes*. Wiley.
- Ceylan, L. 2012. Energy and exergy analyses of a temperature controlled solar water heater, *Energy and Buildings* 47: 630–635. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.040>
- Farahat, S., et al. 2009. Exergetic optimization of flat plate solar collectors, *Renewable Energy* 34(4): 1169–1174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2008.06.014>
- Fiacchi, D.; Bertolli, A. 2012. Design and exergy analysis of solar roofs: A viable solution with esthetic appeal to collect solar heat, *Renewable Energy* 46: 60–71. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.03.013>
- Gunerhan, H.; Hepbasli, A. 2007. Exergetic modeling and performance evaluation of solar water heating systems for building applications, *Energy and Buildings* 39(5): 509–516. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.09.003>
- Klein, S. A., et al. 2010. *A Transient System Simulation Program (TRNSYS 17) Manual*. Thermal Energy System Specialists. Madison, USA.
- Jafarkazemi, F.; Ahmadifard, E. 2012. Energetic and exergetic evaluation of flat plate solar collectors, *Renewable Energy*, 1–9.
- Jordan, U.; Vajen, K. 2000. Influence of the DHW Load Profile on the Fractional Energy Savings: a Case Study of a Solar Combi-System with TRNSYS Simulations, *Solar Energy* 69(6): 197–208.
- Martinaitis, V. 2007. *Termodinaminė analizė*. Vilnius: Technika.
- Meteotest: Remund, J.; Kunz, S. 2011. *Meteorological Data (Worldwide)*, METEOTEST, Bern, Switzerland.
- Petela, R. 2003. Exergy of undiluted thermal radiation, *Solar Energy* 74: 469–88. [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00226-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00226-3)
- Torio, H., et al. 2009. Exergy analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings: A critical view, *Energy and Buildings* 41(3): 248–271. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.10.006>

A COMPARISON OF THE THERMODYNAMIC EFFICIENCY OF VACUUM TUBE AND FLAT PLATE SOLAR COLLECTOR SYSTEMS

J. Bielskus, K. Januševičius, V. Martinaitis

Abstract

The article presents simulation based exergy analysis used for comparing solar thermal systems applied for preparing domestic hot water. The simulation of flat and vacuum tube solar collector systems was performed in TRNSYS simulation environment. A period of one year under Lithuanian climate conditions was chosen. Simulation was performed on 6 min time step resolution by calculating energy and exergy flows and creating balance calculation. Assessment results at system and element levels have been presented as monthly variation in efficiency. The conducted analysis has revealed that the systems designed to cover equal heat energy demand operates in different exergetic efficiencies.

Keywords: exergy, TRNSYS, solar thermal collector system, efficiency.