



ADSORBCINIO IKI 8 kW VĖSOS GALIOS ĮRENGINIO EKSPERIMENTINIS EFEKTYVUMO TYRIMAS

Juozas BIELSKUS¹, Giedrius ŠIUPŠINSKAS², Kęstutis ČIUPRINSKAS³

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹juozas.bielskus@vgtu.lt; ²giedrius.siupsinskas@vgtu.lt; ³kestutis.ciuprinskas@vgtu.lt

Santrauka. Mokslinės literatūros analizė parodė, kad realiai veikiančių įrenginių faktinis efektyvumas nėra gerai žinomas, ypač įrengus šaltojo klimato zonos šalyse. Todėl šiame darbe atliekamas eksperimentinis VGTU Pastato energetinių ir mikroklimato sistemų laboratorijoje (PEMS) įrengto SORTECH AG gamintojo ACS 08 adsorbcinio (maksimali vėsinimo galia – 8 kW) įrenginio efektyvumo tyrimas. Matuojamos faktinės šilumnešio, atšaldomo vandens, tiekiamo į aušyklę, aušinimo skysčio temperatūros su debitais bei aušyklės ir cirkuliacinių siurblių elektros sąnaudos. Atliekama sukauptų duomenų statistinė analizė ir pateikiama atšaldomo vandens bei šilumnešio temperatūrų priklausomybė, vertinant energijos transformavimo COP bei elektrinį (EER) tiriamojo įrenginio koeficientus. Tyrimo rezultatai rodo didesnę nei tradicinės kompresorinės sistemos tiriamojo įrenginio elektrinį efektyvumą.

Reikšminiai žodžiai: atsinaujinantieji ištekliai, adsorbcinis vėsinimo įrenginys, energijos transformavimo koeficientas (COP).

Įvadas

Griežtėjantys reikalavimai gyvenimo kokybei ir komforto lygiui darbo ir gyvenamojoje aplinkoje bei stiklo atitvarų populiarumas didina vėsos poreikį šiltuoju metų laikotarpiu (Zhai, Wang 2010). Didžiausi vėsos poreikiai būdingi pietinėms Europos Sąjungos valstybėms, tačiau šis poreikis pastebimai auga ir šiaurės šalyse, ypač komercinės paskirties pastatuose. Saulės energijos naudojimas vėsos gamyboje gali gerokai sumažinti iškastinių energijos šaltinių poreikius vėsinti ir šiltnamio dujų emisiją (Mateus, Oliveira 2009; Sekret, Turski 2012).

Didžiąją dalį praktikoje naudojamų vėsinimo įrenginių sudaro kompresorinės vėsinimo mašinos. Pagrindinis jų energijos šaltinis yra elektra, kuri dažniausiai gaminama iš iškastinio kuro. Tokių įrenginių vėsos transformavimo koeficientas (COP) būna didesnis už 1.

Šiuo metu populiarėja kiti vėsinimo būdai, kurie leidžia panaudoti ir atsinaujinančiuosius išteklius. Tai adsorbcinis ir adsorbcinis vėsinimas. Pagrindinė šių įrenginių energijos rūšis yra šiluma, tačiau adsorbcinis vėsinimas efektyviai veikia tik aukštesnėse (daugiau kaip 90 °C) temperatūrose.

Diegiant saulės energijos technologijas praktikoje, dažniausiai gaminama žemesnės temperatūros (55–95 °C) šiluma. Tokios temperatūros gali būti lengvai pasiekiamos vasarą plokščiaisiais ar vakuuminiais saulės kolektoriais

net ir šaltose klimato zonose. Tokie temperatūros režimai tinkami adsorbciniams įrenginiams (Askalany *et al.* 2012). Be saulės energijos, adsorbciniam vėsinimui galima pritaikyti žemos (iki 90 °C) temperatūros atliekinę šilumą (Saha *et al.* 2006).

Vienas svarbiausių rodiklių, apibūdinančių minėtą vėsinimo sistemą, yra energijos transformavimo koeficientas (COP). Šiuo metu adsorbcinių vėsinimo sistemų energijos transformavimo koeficientas yra žemiausias, palyginti su kitomis saulės energiją vartojančiomis vėsos gamybai technologijomis. Tai nauja technologija, todėl jos efektyvumas didėja sparčiausiai.

Paskutiniaisiais metais atliekami tyrimai rodo, kad adsorbcinės vėsinimo mašinos gali pasiekti energijos transformavimo koeficientą, aukštesnį nei 0,5, net tuo atveju, kai šilumos šaltinio temperatūra yra 65 °C (Wang *et al.* 2005).

Šios vėsinimo technologijos analizė rodo, kad adsorbcinės mašinos efektyvumas priklauso nuo daugelio rodiklių: įrenginio dydžio, šilumokaičių charakteristikų, šilumos šaltinio temperatūros, įrenginio darbo ciklo trukmės ir pan. (Lu *et al.* 2011). Buvo nustatyta, kad sistemos efektyvumas labai krinta, kai neužtikrinamos optimalios veikimo sąlygos. Didėjanti šilumos šaltinio temperatūra didina efektyvumą (energijos transformavimo koeficientą) ir

savitąją vėsinimo galią (Leong, Liu 2011). Taip pat adsorbcinio vėsinimo efektyvumas didėja, kai atšaldomo šaltnešio temperatūra didėja, ir mažėja, kai aušinamo šilumnešio (iš aušyklės) temperatūra didėja (Lu *et al.* 2013).

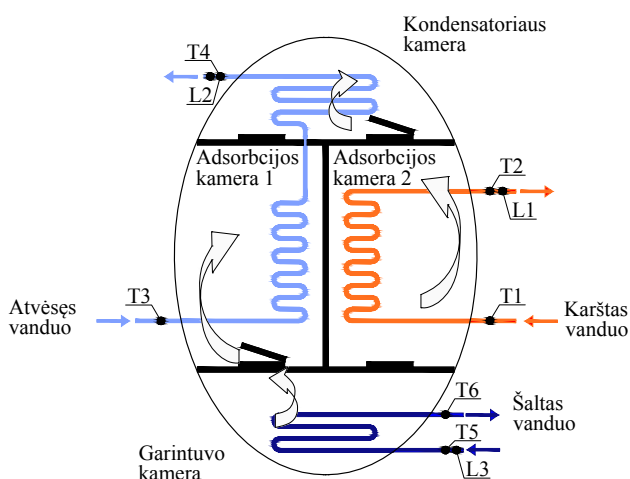
Nemaža dalis tokių tyrimų atliekama laboratorijose, o šiuo metu pasaulyje yra tik kelios įmonės, kurios gamina nedidelės galios adsorbcinius vėsinimo įrenginius. Šios aplinkybės formuoja problemą, kad nėra iki galo gerai žinomas realiai veikiančių įrenginių faktinis efektyvumas, ypač įrengus šaltojo klimato zonos šalyse. Todėl pagrindinis šio darbo tikslas – eksperimentiškai nustatyti jau įrengtos, realiai veikiančios sistemos energijos transformavimo (COP) ir elektros transformavimo (EER) koeficientus.

Tyrimo objektas

Pastato energetinių ir mikroklimato sistemų (PEMS) laboratorijoje yra įrengtas SORTECH AG gamintojo ACS 08 adsorbcinis įrenginys, kurio maksimali vėsinimo galia – 8 kW. Šiuo metu tai vienintelis veikiantis adsorbcinis vėsinimo įrenginys Baltijos šalyse.

Adsorbcijos darbo principas pagrįstas dujų ir kietųjų medžiagų sąveika. Šį įrenginį sudaro keturios kameros: garintuvas, kondensatorius ir dvi adsorbcijos kameros. Visose kamerose slėgis yra artimas visiškam vakuumui (analizuojamu atveju – 19 mbar). Adsorbcinio įrenginio principinė schema su rodiklių matavimo taškais pateikta 1 pav.

Adsorbcinis vėsos įrenginys veikia cikliškai (analizuojamu atveju – 8–10 min.). Vieną ciklą sudaro įkrovimo ir iškrovimo procesai. Garintuve esantis vanduo garuoja žemoje temperatūroje, o šiluma paaimama iš šaldomo vandens, kurio temperatūra kinta nuo T5 iki T6.



1 pav. Adsorbcinio įrenginio su matavimo taškais schema
Fig. 1. Scheme for the adsorption cooling device with measured points

Per pravirą kameros vožtuvą vandens garai patenka į adsorbcijos kamerą Nr. 1. Čia esantis kietas sorbentas (silikagelis) savo paviršiumi sugeria (adsorbuoja) vandens garus. Kai kamera yra visiškai prisotinama garais, vožtuvas uždaromas ir pradaromas kondensatoriaus vožtuvas. Tuo pačiu metu adsorbcijos kameroje Nr. 2 vožtuvas su kondensatoriumi uždaromas, o su garintuvu pradaromas, ir vyksta toks pats ciklas kaip ir kameroje Nr. 1. Kamera Nr. 1 pradeda šildyti. Šildymas reikalingas tam, kad nuo sorbento būtų atskirti (desorbuoti) vandens garai. Atsiskyre nuo sorbento garai per pravirą vožtuvą patenka į kondensatorių, kuriame yra kondensuojami, o šiluma iš vandens garų pašalinama į lauką naudojant aušyklę. Ši šiluma (apie 25–30 °C temperatūros) gali būti naudojama buitiniam karštam vandeniui pašildyti. Kai kamera Nr. 1 yra iškrauta, o Nr. 2 įkrauta, tuomet ciklai sukeičiami. Kondensatoriuje išsiskyres vanduo grąžinamas į garintuvą, todėl šis cikliškas darbas vyksta nuolat.

Eksperimentinio tyrimo metu duomenys apie temperatūras ir debitus buvo kaupiami 1 minutės intervalu 1 mėnesį VGTU PEMS laboratorijoje įrengtoje duomenų kaupimo sistemoje SCADA. Gauti duomenys buvo apdoroti statistinės analizės metodu (metodika pateikiama toliau), o remiantis šiais duomenimis sudarius energinį balansą, buvo nustatytas adsorbcinio įrenginio transformavimo koeficientas (COP) ir elektrinis efektyvumas (EER).

Tyrimo metodika

Pagrindinė formulė, reikalinga energinio balanso atskiriems energijos kiekiam Q_i sudaryti, yra masės balanso lygtis:

$$Q_i = \frac{M \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in})}{3,6}, \quad (1)$$

čia Q_i – pagamintas / sunaudotas / pašalintas šilumos ar vėsos kiekis, kW; M – masinis debitas (fiksuojamasis L1, L2 ir L3 skaitikliais, 1 pav.), kg/h; c_p – fiksuojamo šilumnešio savitoji šiluma, kJ/(kg·K); T_m , T_{out} – įtekančio (T1, T3, T5) ir ištekančio (T2, T4, T5) iš įrenginio šilumnešio / šaltnešio temperatūros (1 pav.), °C.

Adsorbcinio vėsos įrenginio balansas gali būti užrašomas taip:

$$Q_{Re} = Q_{Sol} + Q_{Ch}, \quad (2)$$

čia Q_{Re} – šilumos kiekis, pašalinamas iš adsorbcinio vėsos įrenginio per aušyklę, W; Q_{Sol} – šilumos kiekis, tiekiamas į adsorbcinę šalčio mašiną iš šilumos šaltinio (saulės kolektorių šiluma ar atliekinė šiluma), W; Q_{Ch} – adsorbcinio įrenginio pagamintas vėsos kiekis, W.

Gautieji dydžiai (Q_{Sol} , Q_{Ch}) leido nustatyti adsorbcinio įrenginio energijos transformavimo (COP) ir elektrinį (EER) efektyvumo koeficientus. COP skaičiuojamas pagal formulę:

$$COP = \frac{Q_{Ch}}{Q_{Sol}}, \quad (3)$$

o EER skaičiuojamas pagal formulę:

$$EER = \frac{Q_{Ch}}{Q_E}, \quad (4)$$

čia Q_E – elektros, suvartotos aušyklėje ir cirkuliaciniams siurbliams, kiekis, W.

Gautų rezultatų aibė (populiacija) yra didelė, todėl siekiant didesnio patikimumo iš populiacijos buvo atrinkta imtis ir atlikta statistinė duomenų analizė, įvertinus pasikliautinąjį intervalą nustatytas rezultatų patikimumas (Čekanavičius, Murauskas 2000, 2002).

Galutinis išmatuoto dydžio x rezultatas užrašomas kaip aritmetinio vidurkio \bar{x} ir neapibrėžties suma (5) formulėje nurodant pasiklovimo tikimybę:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x_p, \quad (5)$$

čia \bar{x} – imties vidurkis; Δx_p – matuojamo dydžio neapibrėžties sandas.

Fizikiniam dydžiui x matuoti keliamas pagrindinis reikalavimas: nustatyti verčių intervalą $\bar{x} - \Delta x_p < x_i < \bar{x} + \Delta x_p$ ir nurodyti šio intervalo pasiklovimo tikimybę P , kad tikrojo matuojamo dydžio vertė yra tame intervale.

Skaičiavimo eiga:

Duota atsitiktinė imtis $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Žinoma, kad stebimo atsitiktinio dydžio X skirstinys yra normalusis $X \sim N(\mu, \sigma)$. Abu parametrai – μ (populiacijos vidurkis) ir σ (populiacijos standartinis nuokrypis) – yra nežinomi dydžiai. Vidurkis ir standartinis nuokrypis taip pat nėra žinomi.

Geriausias parametro μ taškinis įvertis yra empirinis vidurkis \bar{x} (randamas taikant momentų arba maksimalaus tikėtumo metodus):

$$\mu = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (6)$$

čia n – imtis; μ – populiacijos vidurkis; x_i – išmatuotas dydis.

Atskiro matavimo imties standartinis nuokrypis nustatomas taip:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (7)$$

čia s – imties standartinis nuokrypis.

Pastaba. Skaičiuoti naudojama duomenų aibė vertinama kaip imtis (n).

Toliau pasirenkama tam tikra pasiklovimo tikimybė P . Pagal Europos Bendrijos reikalavimus pasiklovimo tikimybė yra $P = 0,95$.

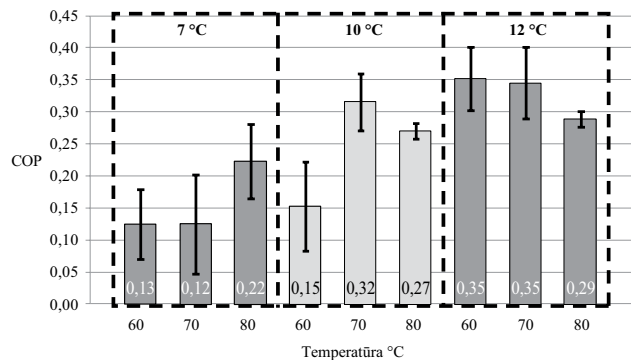
Naudojantis lentelėmis randamas Stjudento koeficientas $t_{n,P}$ esant tam tikrai tikimybei P ir tam tikram intervalų skaičiui (Čekanavičius, Murauskas 2002). Tuomet Stjudento koeficientas, kai pasiklovimo dydis $P = 0,95$, yra $t_{n,P} = 2,015$. Tuomet $\Delta x_{n,P}$ randamas taip:

$$\Delta x_{n,P} = t_{n,P} \cdot s, \quad (8)$$

čia $t_{n,P}$ – Stjudento koeficientas.

Rezultatai

COP skaičiavimų rezultatai, esant į adsorbcinį vėsinimo įrenginį tiekiamoms skirtingoms šilumnešio temperatūroms bei skirtingoms atšaldomo vandens temperatūroms, pateikti 2 pav. Analizė atlikta, kai šilumnešio, tiekiamo į įrenginį, temperatūros yra 60 °C, 70 °C ir 80 °C, o atšaldyto vandens temperatūros 7 °C, 10 °C ir 12 °C.



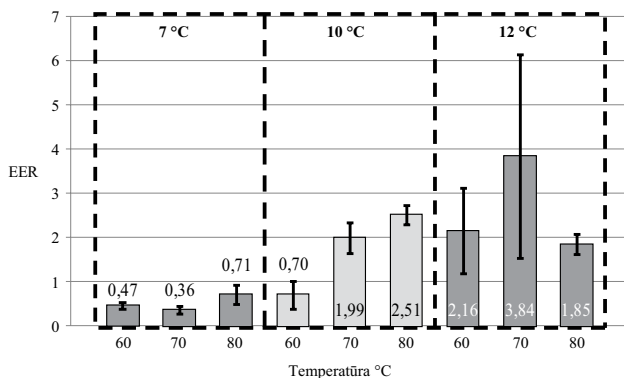
2 pav. Adsorbcinės vėsinimo mašinos energijos transformavimo koeficiento kitimas ir pasikliautinis intervalas

Fig. 2. Actual dependency of the coefficient of energy transformation of the adsorption cooling device and the confidence interval

2 pav. punktyru pažymėti stačiakampiai stulpeliai nurodo statistškai apdorotus (statistinį vidurkį su pasikliautiniu intervalu) faktinius eksperimento rezultatus, kurie nustatyti esant skirtingoms atšaldyto vandens temperatūroms. Vertikalios juodos linijos nurodo atliktų matavimų pasikliautinąjį intervalą. Iš šio paveikslėlio matyti, kad kai vanduo atvėšinamas iki 7 °C, efektyvumas (vidutinė statistinio efektyvumo vidurkio reikšmė svyruoja nuo 0,12 iki 0,22) yra mažiausias. Galima pastebėti, kad energinio efektyvumo vidutinės reikšmės didėja kylant tiekiamo ir at-

šaldomo šilumnešio temperatūrai. Didžiausias efektyvumas pasiekiamas, kai vanduo atšaldomas iki 12 °C, o tiekiamo šilumnešio temperatūros yra 60 °C ir 70 °C. Mažiausi pasikliautinio intervalo svyravimai pastebimi, kai tiekiamo šilumnešio temperatūra yra aukšta ir vanduo atšaldomas iki aukštesnių temperatūrų.

Analizuojant elektrinį energinio efektyvumo koeficientą (EER), vertinama tik aušyklės ventiliatorių ir cirkuliacinių siurblių suvartota elektra. Aušyklės apkrova, o kartu ir ventiliatorių elektros sąnaudos priklauso nuo šilumnešio, tiekiamo į ją, parametrų ir lauko oro temperatūros, todėl buvo fiksuojamas aušyklei tiekiamos elektros srovės stipris. Matavimų rezultatai pateikiami 3 pav.



3 pav. Adsorbacinės vėsinimo mašinos elektrinio efektyvumo kitimas ir pasikliautinis intervalas

Fig. 3. Actual dependency of the coefficient of the electrical efficiency of the adsorption cooling device and the confidence interval

Kaip matyti iš 3 pav., kai šaldomo vandens temperatūra 10 °C, 12 °C ir šildomo šilumnešio temperatūra 70 °C ir daugiau, elektrinis adsorbacinio įrenginio faktinis statistinis efektyvumas yra aukštesnis už 1. Galima pastebėti, kad kai šaltas vanduo atšaldomas iki 12 °C temperatūros esant 80 °C šilumnešio temperatūrai, analizuotas elektrinis efektyvumas yra kur kas mažesnis nei esant 70 °C temperatūrai. Tiesioginę priežastį nustatyti gana sudėtinga, tačiau galima spėti, kad tuo metu lauko temperatūra buvo aukšta, tad aušyklė dirbo didesne apkrova ir elektros sąnaudos buvo didesnės nei atliekant kitus matavimus.

Tuomet, kai EER reikšmės yra didesnės už 1, adsorbacinis įrenginys pasiekia didesnę efektyvumą nei tradicinės kompresorinės vėsinimo sistemos.

Adsorbacinio vėsinimo įrenginio atliktas eksperimentinis bandymas parodė tam tikrą, nors ir ne visuomet tiesioginę energinio efektyvumo priklausomybę nuo šildančiojo šilumnešio ir šaldomo vandens temperatūrų. Siekiant pagrįsto rezultatų interpretavimo, būtina įvertinti išorines klimato sąlygas.

Išvados

- Eksperimentinis nedidelės (iki 8 kW) galios adsorbacinio vėsinimo įrenginio faktinio energinio transformavimo koeficiento (COP) tyrimas parodė, kad, nors ir ne visuomet tiesiogiai, bet COP rodiklis didėja, kai atšaldomo vandens ir šilumnešio temperatūra kyla. Matuojant žemiausias vidutinis statistinis efektyvumas (0,12) buvo nustatytas, kai vanduo atšaldomas iki 7 °C.
- Analizuojant elektrinį adsorbacinio įrenginio efektyvumo koeficientą, galima pastebėti, kad, esant aukštesnei nei 10 °C atšaldyto vandens temperatūrai, šis koeficientas didesnis už 1. Tokios šio rodiklio reikšmės rodo didesnę adsorbacinio įrenginio elektrinį efektyvumą nei tradicinio kompresorinio įrenginio.

Padėka

Autoriai dėkoja už pagalbą VGTU Civilinės inžinerijos mokslo centro Pastato energetikos ir mikroklimato sistemų laboratorijai.

Literatūra

- Askalany, A. A.; Saha, B. B.; Kariya, K.; Ismail, I. M.; Salem, M.; Ali, A. H. H.; Morsy, M. G. 2012. Hybrid adsorption cooling systems: an overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(8): 5787–5801. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.001>
- Čekanavičius, V.; Murauskas, G. 2000. *Statistika ir jos taikymai. I*. Vilnius: TEV. 241 p. ISBN 9955-28-060-3.
- Čekanavičius, V.; Murauskas, G. 2002. *Statistika ir jos taikymai. II*. Vilnius: TEV. 241 p. ISBN 9955-491-16-7.
- Leong, K. C.; Liu, Y. 2006. System performance of a combined heat and mass recovery adsorption cooling cycle: a parametric study, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49(15–16): 2703–2711. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.01.012>
- Lu, Z. S.; Wang, R.; Xia, Z. 2013. Experimental analysis of an adsorption air conditioning with micro-porous silica gel–water, *Applied Thermal Engineering* 50(1): 1015–1020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.07.041>
- Lu, Z. S., et al. 2011. An analysis of the performance of a novel solar silica gel–water adsorption air conditioning, *Applied Thermal Engineering* 31(17–18): 3636–3642. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.11.024>
- Mateus, T.; Oliveira, A. C. 2009. Energy and economic analysis of an integrated solar absorption cooling and heating system in different types and climates, *Applied Energy* 86: 949–957. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.09.005>
- Saha, B. B., et al. 2006. Evaluation of minimum desorption temperatures of thermal compressors in adsorption refrigeration cycles, *International Journal of Refrigeration* 29(7): 1175–1181. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.01.005>

- Sekret, R.; Turski, M. 2012. Research on an adsorption cooling system supplied by solar energy, *Energy and Buildings* 51: 51–20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.04.008>
- Wang, D. C., *et al.* 2005. study of a novel silica gel–water adsorption chiller. Part I. Design and performance prediction, *International Journal of Refrigeration* 28(7): 1073–1083. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.03.001>
- Zhai, X. Q.; Wang, R. Z. 2010. Experimental investigation and performance analysis on a solar adsorption cooling system with/without heat storage, *Applied Energy* 87: 824–835. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.002>

EXPERIMENTAL STUDY ON ENERGY EFFICIENCY OF A SMALL ADSORPTION COOLING DEVICE PRODUCING UP TO 8 kW

J. Bielskus, G. Šiupšinskas, K. Čiuprinskas

Abstract

The analysis of scientific literature shows that the actual efficiency of the adsorption cooling device has not been properly examined. This article presents experimental study on energy efficiency of the adsorption cooling device (max capacity 8 kW) produced at the Laboratory of Building Energy and Microclimate Systems of Vilnius Gediminas Technical University. The study has focused on the measurement of the actual temperatures and flow rate of a heating source, chilled water, a supply of cooled water to the chiller, electricity consumption for circulation pumps and chiller fans. The article presents collected statistical data and shows the dependency of chilled water and heat source temperatures evaluating the coefficients of performance (COP) and electrical efficiency (EER). The received results show higher electrical efficiency of the examined device than that of a conventional compressor system.

Keywords: renewable energy sources, adsorption cooling device, energy transformation coefficient (COP).