

ALTERNATYVIŲJŲ DAUGIABUČIO NAMO APRŪPINIMO ENERGIJA SISTEMŲ
GYVAVIMO CIKLO DAUGIAKRITERĖ ANALIZĖ

Artur Rogoža

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
El. paštas artur.rogaza@vgtu.lt

Santrauka. Nagrinėjamos iš dalies renovuoto daugiabučio gyvenamojo pastato aprūpinimo energija alternatyvos. Be esamo centralizuotojo šilumos tiekimo (bazinis variantas), tiriama alternatyviosios sistemos: dujiniai katilai, šilumos siurbliai (*oras-vanduo* ir *gruntas-vanduo*), saulės kolektoriai, saulės elementai ir šių sistemų deriniai. Modeliuojant sistemas, naudojami faktiniai pastato šilumos suvartojimo ir statistiniu būdu nustatyti elektros poreikių duomenys. Sistemų modeliavimas atliekamas *EnergyPro* programa. Siekiant nustatyti optimalų aprūpinimo energija variantą, analizuojamas visų sistemų gyvavimo ciklas per visą pastato gyvavimo trukmę, o gauti energinio, ekologinio ir ekonominio vertinimų rezultatai daugiakriterės analizės būdu perskaičiuojami į nedimensinius rodiklius (3E).

Reikšminiai žodžiai: daugiabutis namas, centralizuotasis šilumos tiekimas, saulės kolektoriai, saulės elementai, šilumos siurblys, gyvavimo ciklo analizė, daugiakriterė analizė.

Įvadas

Visame pasaulyje pastatų sektorius nuolat plečiasi, todėl didėja energijos sąnaudos pastatų naudotojų poreikiams tenkinti. Europos Sąjungos mastu pastatuose suvartojama apie 40 % visos energijos (2010/31/ES). Paprastai energijos gamyba, o kartu ir jos vartojimas kelia aplinkos taršos problemų, o energijos gamyba naudojant iškastinį kurą spartina visuotinį klimato atšilimą. Didinant energijos vartojimo efektyvumą siekiama sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas. ES valstybėse yra nustatyti nacionaliniai privalomi CO₂ kiekio mažinimo tikslai, skatinama naudoti atsinaujinančių išteklių energiją. Kaip numatyta 2010/31/ES direktyvoje, naujų pastatų atžvilgiu ES valstybės turės užtikrinti, kad, prieš pradėdant statybą, būtų apsvarstyta galimybė taikyti decentralizuotąjį ar centralizuotąjį šių pastatų aprūpinimą energija naudojant atsinaujinančius išteklius, diegiant kogeneraciją bei šilumos siurblius.

Lietuvos namų ūkių sektoriuje 2011 m. suvartota apie 32,5 % galutinės energijos. Tais pačiais metais šilumos energijos balanse namų ūkiams teko net 56 % suvartotos šilumos kiekio, o elektros vartojimo balanse – apie 31 % suvartotos elektros kiekio (Lietuvos energetika 2011). Atsinaujinančių išteklių energija bendrame Lietuvos energijos vartojimo balanse 2011 m. buvo 20,3 % (Eurostat 2013), tai nežymiai priartino prie 23 % iki 2020 m. siektinos ribos. Siekiant šios ribos numatyta, kad namų ūkiuose atsinaujinančių energijos išteklių dalį šildymui sunaudojamų energijos išteklių balanse reikia padidinti ne mažiau kaip iki 80 % (LR atsinaujinančių... 2011).

Pastatų sektorius Lietuvoje yra vienas iš didžiausio potencialo sričių, kuriame galima žymiai sumažinti išmetamų teršalų kiekį ir pirminės energijos sąnaudas. Vadovaujantis tvariosios plėtros principais, vertinant pastato energijos poreikius turi būti atsižvelgiama į visą per jo gyvavimo ciklą sunaudotą pirminę energiją. Daugiausia teršalų pastatai išskiria ir energijos suvartoja dviejų pagrindinių jų gyvavimo fazių laikotarpiu – sukūrimo ir naudojimo. Paprastai gyvenamieji pastatai statybos fazėje gali suvartoti nuo 1 % iki 20 % pirminės energijos (You *et al.* 2011; Utama, Gheewala 2008; Rossi *et al.* 2012), tačiau skirtingų tipų pastatų energijos sąnaudos gali labai skirtis. Mažaenergių pastatų statybos ir sunaikinimo fazių energijos sąnaudos gali sudaryti nuo 40 % (Thormark 2002) iki 70 % (Dixit *et al.* 2010) per visą namo gyvavimo laikotarpį suvartotos energijos, o nulinės energijos pastatų – siekti net viso pirminės iškastinės energijos kiekio sąnaudas (Marszal, Heiselberg 2011).

Lietuvoje, išibėgėjant daugiabučių namų renovacijos procesui, yra puiki proga ne tik atnaujinti pastato konstrukcinius elementus kartu mažinant šilumos sąnaudas šildymui, bet taip pat priimti racionalius ir įvairiapusiškai naudingus šių pastatų aprūpinimo šiluma sprendimus.

Įvairių energijos tiekimo sistemų tyrimų, siekiant nustatyti šių sistemų ekonominius privalumus, atlikta ne vienas. Lietuvos autorių buvo vertinamas šilumos siurblio *oras-vanduo*, diegiamo daugiabučiame pastate, ekonominis

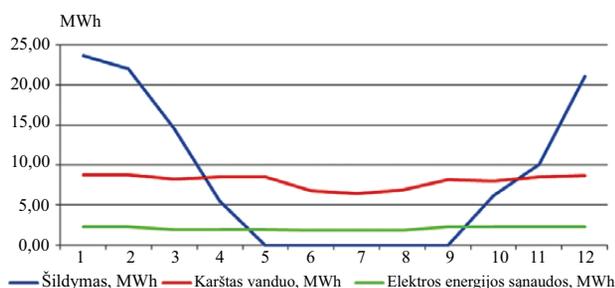
naudingumas (Šuksteris, Jonynas 2011), saulės kolektorių panaudojimo galimybės karštam vandeniui ruošti daugiabutyje (Šiupšinskas, Adomėnaitė 2012). Panašių darbų, taikydami daugiakriterį vertinimą, yra atlikę ir užsienio autoriai (Alanne *et al.* 2007). Jie ištyrė įvairių energijos tiekimo sistemų veikimą skirtingose pastatų grupėse.

Aprašomo tyrimo naujumas susijęs su kompleksiniu požiūriu į daugiabučio gyvenamojo pastato aprūpinimą energija per visą jo gyvavimo ciklą. Pabrėžtina, kad daugumos autorių tyrimų objektai priskirtini pastatų kategorijai, kurių šilumos ir elektros poreikių ypatumai ypač skiriasi nuo daugiabučių namų, dabar Lietuvoje suvartojančių didžiąją dalį energijos. Analizuojant daugiabutį pastatą ir taikant daugiakriterį vertinimą, buvo nustatytas optimalus jo aprūpinimo energija technologinis sprendinys.

Tyrimo objektas ir pirminiai duomenys

Tyrimo objektu pasirinktas 1976 m. Vilniuje pastatytas daugiabutis namas. Pastatas tipinio projekto, dvidešimties butų, penkiaaukštis, su rūsiu ir sutapdintu stogu. Bendras gyvenamasis pastato plotas – 1099 m². 2008 m. pastatas buvo iš dalies renovuotas, ir dabar jo sienų atitvarų charakteristikos atitinka norminius atnaujinamų namų reikalavimus (STR 2.05.01:2005). Namą aprūpinamas šiluma iš centralizuotojo šilumos tiekimo tinklų, prie jų prijungtas pagal nepriklausomą schemą. Tyrimui naudota pastato energijos sąnaudų, nuskaitytų nuo skaitiklių 2009–2011 m., duomenys. Šilumos patalpoms šildyti sąnaudos buvo perskaičiuotos į šilumos poreikį norminiais metais – 103,08 MWh (93,79 kWh/m²). Nustatytas karšto vandens sistemos šilumos poreikis – 96,91 MWh, o elektros – 25,36 MWh. Energijos poreikių pasiskirstymas tam tikrais mėnesiais pateiktas 1 paveiksle.

Nustatyta pastato šildymo sistemos galia yra 54 kW, o karšto vandens sistemos – 111 kW.



1 pav. Pastato energijos poreikiai pagal mėnesį
Fig. 1. Monthly energy demands of the building

Tyrimo metodika

Siekiant pagrindinio tikslo – parinkti optimalią pastato aprūpinimo energija sistemą, buvo sudarytos galimos ir pastaruoju metu racionalios tokių sistemų alternatyvos. Visos alternatyvos buvo nagrinėjamos taikant gyvavimo ciklo analizės ir daugiakriterės analizės metodus. Atliekant skaičiavimus naudota *EnergyPRO*, *SimaPro* ir *RETScreen* programinė įranga.

Pagrindiniai skaičiavimai atlikti **gyvavimo ciklo analizės (GCA) metodu**. Šio metodo principai ir reikalavimai reglamentuoti Lietuvos standartuose (LST EN ISO 14040, LST EN ISO 14044). Šio metodo pagrindu buvo išnagrinėtos trys pagrindinės visų alternatyviųjų aprūpinimo energija sistemų gyvavimo ciklo fazės: sukūrimo, naudojimo ir sunaikinimo/perdirbimo. GCA eiga susideda iš keturių etapų.

Tikslo ir apimties nustatymo etapu suformuluotas analizės tikslas – iširti pasirinktas sistemas ir nustatyti jų poveikį aplinkai bei ekonominius rodiklius. Apibrėžiant tyrimo apimtį, remtasi šiomis pagrindinėmis prielaidomis:

- pastato gyvavimo trukmė sieks 100 metų;
- gamybos fazėje vertinama tik medžiagų gamyba ir sistemos elementų transportavimas nuo jų gamybos vietos iki įrengimo vietos;
- naudojimo fazėje vertinamas pasibaigusios gyvavimo trukmės sistemų elementų transportavimas ir keitimas naujais, sistemų veikimo energijos poreikiai ir aptarnavimo transportas;
- iki 5 % elementų masės sudarančios medžiagos atskirai nevertinamos dėl mažos įtakos galutiniam rezultatui;
- medžiagos, kurias galima perdirbti, perdirbamos 100 %.

Inventorinė analizė skirta visų sistemų elementų medžiagų ir energijos balansams sudaryti. Šiam tikslui buvo naudojamos tirtų sistemų įrangos ir elementų techninės specifikacijos bei žinytai, o sistemų energijos gamybos analizei – kompiuterinė modeliavimo programa *EnergyPRO*.

Poveikio įvertinimo etapu nuspręsta tirti klimato kaitos problemą, todėl buvo nustatomi į aplinką pateksiantys išmetalų (perskaičiuojant į CO₂ ekvivalentus) kiekiai. Ši įtakos kategorija tirta *IPCC 2007 GWP100* modelio pagrindu.

Interpretavimo etapu buvo analizuojami ir vertinami pagal nustatytus energinio ir ekologinio aspektų svertinius rodiklius gauti rezultatai. Papildomai visos sistemos buvo vertinamos ir ekonominiu požiūriu, nustatant sistemų įdiegimo ir jų eksploatacijos per visą pastato gyvavimo trukmę išlaidų dydį.

Siekiant teisingai palyginti sistemas ir duomenų universalumo, rezultatai buvo perskaičiuojami į santykinus dydžius, t. y. rodiklius, tenkančius vienam funkciniam vienetui. Kadangi atliekant tyrimą pagrindinė energijos rūšis yra šiluma, perskaičiuota 1 kWh pagamintos šilumos atžvilgiu.

Daugiakriterės analizės taikymo poreikis susijęs su būtinumu įvairiapusiškai įvertinti nagrinėjamas sistemas. Nagrinėjant pasirinktus sprendimus, rezultatai lyginami remiantis trimis kriterijais: pirminės energijos poreikiu, pinigine išlaidomis ir aplinkos tarša. Dydis, kuris leidžia spręsti apie sistemos patrauklumą visais trimis požūriais, vadinamas 3E faktoriumi (energija, ekonomika, ekologija) (Rogoža *et al.* 2006). Šis dydis dažniausiai naudojamas analizuojant, lyginant ar optimizuojant sistemą trimis minėtais požūriais, prieš tai jiems suteikiant pasirinktus svorio koeficientus. Gautas rezultatas yra nedimensinis dydis (nuo 0 iki 1), o jo didžiausioji reikšmė rodo energiniu, ekonominiu ir ekologiniu požūriu geriausią sprendimo variantą.

Aprūpinimo energija sistemų variantų aprašai

Tyrimo metu nagrinėtos pastato aprūpinimo energija sistemos pateiktos 1 lentelėje.

CŠT yra esama pastato šilumos aprūpinimo sistema (bazinis variantas), kai pastatas visą reikiamą šilumos kiekį šildymui ir karštam vandeniui gauna iš Vilniaus centralizuotojo šilumos tiekimo tinklo. Skaičiavimuose laikoma, kad 11 % šios šilumos gaminama naudojant biokurą, o kita dalis – gamtines dujas.

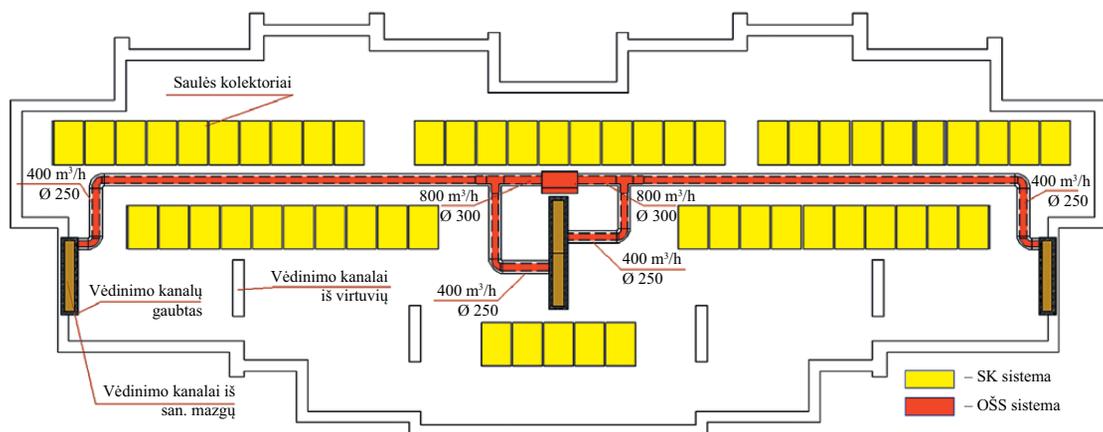
OŠS+SK+T yra kombinuotoji sistema, sudaryta visiškai atsisakant centralizuotojo šilumos tiekimo. Sistemą sudaro trys pagrindinės dalys: šilumos siurblys *oras–vanduo*,

1 lentelė. Pastato aprūpinimo energija sistemų variantai
Table 1. Variants of energy supply systems for the building

Nr.	Sistemos variantas	Žymuo
1.	Centralizuotasis šilumos tiekimas	CŠT
2.	Šilumos siurblio <i>oras–vanduo</i> , saulės kolektorių ir elektrinio šildytuvo (teno) sistema	OŠS+SK+T
3.	Šilumos siurblio <i>oras–vanduo</i> , saulės kolektorių ir centralizuotojo šilumos tiekimo sistema	OŠS+SK+CŠT
4.	Šilumos siurblio <i>gruntas–vanduo</i> , saulės kolektorių ir centralizuotojo šilumos tiekimo sistema	GŠS+SK+CŠT
5.	Dujinių katilų sistema	DK
6.	Saulės kolektorių ir dujinio katilo sistema	SK+DK
7.	Šilumos siurblio <i>gruntas–vanduo</i> , saulės kolektorių, saulės elementų ir centralizuotojo šilumos tiekimo sistema	GŠS+SK+SE+CŠT

plokščiųjų saulės kolektorių sistema ir elektrinis šildytuvas (tenas). Šilumos siurblio garintuvo kontūras atgauna šilumą iš natūralaus vėdinimo kanalų šalinamo oro. Nustatyta, kad jo vardinė šildymo galia yra 6,7 kW. Atlikus modeliavimą *EnergyPro* programa buvo nustatytas saulės kolektorių plotas (101 m²), o *RETScreen* programa – saulės kolektorių ir jų elementų charakteristikos. Šių įrenginių pagamintą šilumą numatyta kaupti trijose akumuliacinėse talpyklose, kurių vienoje bus įrengtas elektrinis tenas šilumai gaminti jos trūkimui (apie 56 % metinio šilumos poreikio) kompensuoti. Nustatytas bendras talpų tūris – 5 m³.

OŠS+SK+CŠT sistema yra analogiška antrajai sistemai, tačiau vietoje elektrinio šildytuvo joje yra naudojama centralizuotai tiekiamą šilumą. Abiejų sistemų (OŠS+SK+T ir OŠS+SK+CŠT) įrangos išdėstymo ant pastato stogo principinė schema pateikta 2 paveiksle.



2 pav. Šilumos siurblio ir saulės kolektorių įrangos išdėstymas ant pastato stogo
Fig. 2. Situation of installing the heat pump and solar collectors on the roof of the house

GŠS+SK+CŠT – tai šešių vertikalių (77 m gylio) gręžinių šilumos siurblio *gruntas–vanduo* (31 kW), saulės kolektorių (101 m²) ir centralizuotojo šilumos tiekimo kombinuoti aprūpinimo šiluma sistema. Per metus iš centralizuotojo šilumos tiekimo tinklų pastatui reikės tiekti apie 15 % pagal poreikį numatytos šilumos.

DK yra dviejų (po 50 kW) dujiniu kuru kūrenamų kondensacinių katilų sistema su akumuliacine talpykla karštam vandeniui ruošti. Nuodugni šios sistemos įrangos inventorinė analizė buvo atlikta J. Kublickio darbo (2012) pagrindu.

SK+DK sistemoje naudojama anksčiau nagrinėta saulės kolektorių sistema (101 m²) su trimis akumuliacinėmis talpyklomis ir dujinio kuro kondensacinis katilas (50 kW). Katilas turi pagaminti apie 76 % šilumos metiniam šilumos poreikiui patenkinti.

GŠS+SK+SE+CŠT – tai ketvirtąjį variantą atitinkanti šilumos gamybos sistema, kurioje papildomai įrengti saulės elementai (51 m² ploto polikristaliniai moduliai). Numatyta, kad jie iš dalies aprūpins elektra minėtas šilumos gamybos sistemas (apie 21 % jų metinio elektros poreikio). Ekonominiam vertinime buvo numatyta, kad šis elektros kiekis dėl palankaus tarifo bus parduodamas į bendrąjį elektros tinklą.

Tyrimų rezultatų analizė

Atliekant energinį vertinimą buvo skaičiuojamas pirminės energijos poreikis sistemos gamybos, transportavimo, naudojimo ir sunaikinimo-perdirbimo fazėse. Nustatant pirminės (neatsinaujinančiosios) energijos sąnaudas dėl centralizuotai tiekiamos šilumos ir elektros vartojimo pas-

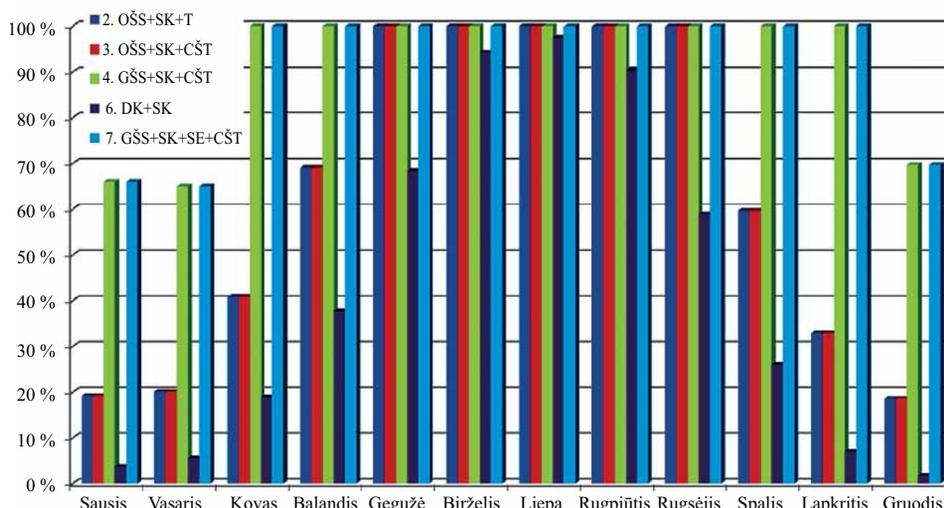
tate, buvo naudojami perskaičiavimo rodikliai-faktorai (STR 2.01.09:2012), rodantys, kiek pirminės energijos būtina šilumos ar elektros vienetui pagaminti. Elektros energijai perskaičiuoti buvo taikomas 2,8, o centralizuotai tiekiamai šilumai – 1,3 dydžio faktorius.

Visos nagrinėjamos sistemos valandos atkarpomis buvo modeliuojamos *EnergyPRO* programa. Metinė šilumos iš atsinaujinančios energijos poreikių dalis pateikiama 3 paveiksle.

Analizuojant visas gyvavimo ciklo fazes, buvo nustatyta, kad didžiausias pirminės energijos poreikis – antrosios, o mažiausias – septintosios sistemos. Pastarajai sistemai pirminės energijos reikia net 60 % mažiau. Nagrinėjant gyvavimo ciklo fazes akivaizdu, kad didžiausias pirminės energijos kiekis suvartojamas naudojimo fazėje, skirtingų sistemų – nuo 97 % iki beveik 100 %.

Sistemų poveikis aplinkai buvo vertinamas pagal jų išskiriamą anglies dvideginio ekvivalentų kiekį, kuris daro įtaką klimato kaitai – skatina visuotinį atšilimą. Atliekant **ekologinį vertinimą** buvo skaičiuojama visų gyvavimo ciklo fazių CO₂ emisija. Kaip ir energinio vertinimo atveju geriausi septintojo varianto rezultatai, šios sistemos išmetami CO₂ kiekiai yra 63 % mažesni už blogiausiąjį šiuo atveju (antrąjį) variantą.

Atliekant **ekonominį vertinimą** buvo skaičiuojama sistemų gaminamos šilumos savikaina. Tariama, kad skaičiavimo periodas yra 25 metai, o diskonto norma lygi 5 %. Taip pat buvo numatyta, kad, diegiant atsinaujinančiosios energijos šilumos gamybos sistemas, gyventojams bus kompensuojama 30 % išlaidų. Elektros ir šilumos iš miesto tinklų kainos pirmaisiais metais numatytos atitinkamai 52 ct/kWh ir 29,5 ct/kWh. Padaryta prielaida,



3 pav. Atsinaujinančiosios energijos dalis pastato šilumos poreikiams

Fig. 3. Share of renewable energy in heat demand for the building

kad šios kainos kasmet augs atitinkamai 1 % ir 1,5 %. Vertinant dujų kainą numatyta, kad pirmaisiais metais ji bus 2,08 Lt/n. m³ ir kasmet didės 1 %. Saulės elementų pagamintos elektros energijos supirkimo tarifas numatytas 0,75 ct/kWh, o jo galiojimo trukmė – 10 metų, vėliau – rinkos kaina. Investicijos į sistemas buvo skaičiuojamos atsižvelgus į esamas rinkos kainas, išanalizavus įvairių tiekėjų produkciją ir komercinius pasiūlymus.

Visos sistemos buvo lyginamos su baziniu (CŠT) variantu. Šiuo požiūriu sistemų atsipirkimo laikas svyruoja nuo 6 iki 15 metų, o antroji sistema neatsiperka. Didžiausios investicijos tenka septintajai sistemai, tačiau jos pagamintos šilumos savikaina pati mažiausia – 18,7 ct/kWh. Didžiausia yra antrosios sistemos šilumos savikaina (36,5 ct/kWh).

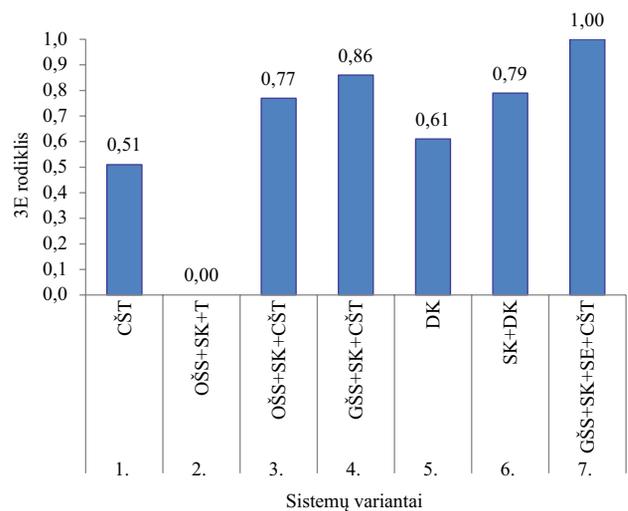
Daugiakriterės analizės būdu iki šiol gauti rezultatai buvo perskaičiuojami, siekiant gauti vieną bendrą rodiklį, kurį taikant galima būtų spręsti apie įvairiapusių nagrinėjamų sistemų efektyvumą. Pirmiausia kiekvienos sistemos energinio ir ekologinio vertinimo rezultatai buvo perskaičiuojami į santykinius dydžius – vidutinius energijos ir CO₂ emisijos kiekius, tenkančius 1 kWh reikalingos pastatui šilumos (2 lentelė). Gauti santykiniai dydžiai ir ekonominio vertinimo rezultatai (šilumos savikaina) buvo perskaičiuojami į nedimensinius dydžius, kurie toliau, taikant svorinius koeficientus, buvo panaudoti kiekvienos sistemos 3E rodikliui nustatyti (4 pav.). Šiame tyrime taikyti vienodo dydžio svorio koeficientai (1/3), tai teikė vienodos svarbos visų trijų tipų rezultatams.

2 lentelė. Tarpiniai sistemų vertinimo kriterijai

Table 2. Intermediate criteria for assessing systems

Nr.	Sistemos žymuo	Vertinimo kriterijai		
		šilumos savikaina, ct/kWh	emisija, kg CO ₂ ekv./ kWh	pirminė energija, MJ/kWh
1.	CŠT	28,5	0,201	4,68
2.	OŠS+SK+T	36,5	0,355	6,32
3.	OŠS+SK+CŠT	23,4	0,152	3,31
4.	GŠS+SK+CŠT	19,9	0,152	2,88
5.	DK	24,3	0,231	3,70
6.	SK+DK	21,3	0,182	2,93
7.	GŠS+SK+SE+CŠT	18,7	0,131	2,50

Gauti daugiakriterio vertinimo rezultatai (4 pav.) rodo, kad nagrinėto pastato optimalus aprūpinimo energija sistemos technologinis sprendimas yra septintasis – šilumos siurblio *gruntas–vanduo*, saulės kolektorių, saulės elementų ir centralizuotojo šilumos tiekimo sistema, nes jo 3E kriterijus yra didžiausias. Be to, jo reikšmė lygi vienetai, todėl ši sistema yra geriausia visais nagrinėtais aspektais.



4 pav. Sistemų daugiakriterio vertinimo rezultatai

Fig. 4. The results of the multi-criteria evaluation of systems

Atliktas tyrimas neatskleidžia visais atvejais geriausio daugiabučių pastatų aprūpinimo energija technologinio sprendimo, o tik pateikia vieną galimų tokių sistemų įvairiapusių vertinimo metodų. Be to, šio tyrimo rezultatai patvirtina, kad atsinaujinančiąją energiją naudojančių sistemų diegimas daugiabučiuose pastatuose yra ne tik techniškai įmanomas, bet ir daugeliu požiūriu efektyvus.

Išvados

1. Sumodeliavus septynias pastato aprūpinimo energija sistemas ir atlikus jų gyvavimo ciklo daugiakriterių vertinimą nustatyta, kad optimali yra kombinuotoji sistema, sudaryta iš *gruntas–vanduo* šilumos siurblio, saulės kolektorių, saulės elementų ir centralizuotojo šilumos tiekimo sistemų (GŠS+SK+SE+CŠT). Šioje sistemoje 85 % pastato šilumos poreikio bus tenkinama atsinaujinančiosios energijos. Ši alternatyva yra geriausia visais trimis (energinis, ekologinis ir ekonominis) požiūriais.
2. Blogiausi sistemų, naudojančių didžiąją dalį iškastinio kuro, rezultatai. Visais požiūriais blogiausia alternatyva – šilumos siurblio *oras–vanduo*, saulės kolektorių ir elektrinio šildytuvo derinys. Šioje sistemoje daugiau nei pusė (56 %) šilumos bus gaminama elektriniu tenu.
3. Lyginant kitus du blogiausius, tačiau labiausiai paplitusius Lietuvoje daugiabučio namo aprūpinimo šiluma būdus – centralizuotąjį šilumos tiekimą ir dujinius katilus, nustatyta, kad dujinis šildymas šiuo atveju yra blogiau tik ekologiniu požiūriu (apie 15 % didesnė CO₂ emisija).
4. Siekiant diegti atsinaujinančios energijos išteklių sistemas nagrinėto tipo pastatuose, visais atvejais būtinas

papildomas energijos šaltinis, todėl atsijungimas nuo centralizuotojo šilumos tiekimo ir elektros tinklų iš esmės neįmanomas. Energetiškai efektyviuose pastatuose atsinaujinančiosios energijos išteklių sistemų įtaka būtų didesnė, todėl prieš diegiant tokias sistemas pastatus būtina renovuoti.

Padėka

Šis straipsnis buvo rengiamas Martyno Matuzo baigiamojo magistro darbo rezultatų pagrindu. Straipsnio autorius dėkoja už pateiktą medžiagą ir bendradarbiavimą.

Literatūra

- 2010/31/ES Europos Parlamento ir Tarybos direktyva dėl pastatų energinio naudingumo, *Europos Sąjungos oficialusis leidinys L 153*: 13–35.
- Alanne, K.; Salo, A.; Saari, A.; Gustafsson, S. I. 2007. Multi-criteria evaluation of residential energy supply systems, *Energy and Buildings* 39(12): 1218–1226. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.009>
- Dixit, M. K.; Fernández-Solís, J. L.; Lavy, S.; Culp, Ch. H. 2010. Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review, *Energy and Buildings* 42: 1238–1247. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.016>
- Eurostat* [interaktyvus]. 2013. Share of renewable energy in gross final energy consumption [žiūrėta 2013 m. birželio 27 d.]. Prieiga per internetą: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=tsdcc110&plugin=1>
- You, F.; Hu, D.; Zhang, H.; Guo, Zh.; Zhao, Y.; Wang, B.; Yuan, Y. 2011. Carbon emissions in the life cycle of urban building system in China – A case study of residential buildings, *Ecological Complexity* 8: 201–212. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecocom.2011.02.003>
- Kublickis, J. 2012. *Daugiakriterė pastato mišraus aprūpinimo šiluma variantų analizė*: baigiamasis magistro darbas. Vilnius. 102 p.
- Lietuvos energetika 2011*. Lietuvos energetikos institutas, 2012. 20 p.
- Lietuvos Respublikos atsinaujinančių išteklių energetikos įstatymas, priimtas 2011 m. gegužės 12 d. Lietuvos Respublikos Seimo nutarimu Nr. XI-1375, *Žinios*, 2011, Nr. 62-2936.
- LST EN ISO 14040:2007 Aplinkos vadyba. Būvio ciklo įvertinimas. Principai ir sandara*. Vilnius, 2008. 27 p.
- LST EN ISO 14044:2007 Aplinkos vadyba. Būvio ciklo įvertinimas. Reikalavimai ir nurodymai*. Vilnius, 2008. 51 p.
- Marszal, A. J.; Heiselberg, P. 2011. Life cycle cost analysis of a multi-storey residential Net Zero Energy Building in Denmark, *Energy* 36(9): 5600–5609. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.010>
- Rogoža, A.; Čiuprinskas, K.; Šiupšinskas, G. 2006. The optimisation of energy systems by using 3E factor: The case studies, *Journal of Civil Engineering and Management* 12(1): 63–68.
- Rossi, B.; Marique, A. F.; Glaumann, M.; Reiter, S. 2012. Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tool, *Building and Environment* 51: 395–401. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.017>
- STR 2.01.09:2012 Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas*. Vilnius, 2012.
- STR 2.05.01:2005 Pastatų atitvarų šiluminė technika*. Vilnius, 2005.
- Šiupšinskas, G.; Adomėnaitė, S. 2012. Saulės energijos panaudojimas karštam vandeniui ruošti daugiabučiame name, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 4(5): 507–512.
- Šuksteris, V.; Jonynas, R. 2011. *Šilumos siurblio panaudojimo Alytaus daugiabučiame name analizė* [interaktyvus], [žiūrėta 2013 m. birželio 26 d.]. Prieiga per internetą: http://www.lsta.lt/files/studijos/2011%20metu/A-60_Alytaus%20ŠS%20analize_Suksterio.pdf
- Thormark, C. 2002. A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential, *Building and Environment* 37(4): 429–435. [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00033-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00033-6)
- Utama, A.; Gheewala, Sh. H. 2008. Life cycle energy of single landed houses in Indonesia, *Energy and Buildings* 40(10): 1911–1916. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.04.017>

LIFE CYCLE MULTI-CRITERIA ANALYSIS OF ALTERNATIVE ENERGY SUPPLY SYSTEMS FOR A RESIDENTIAL BUILDING

A. Rogoža

Abstract

The article analyses energy supply alternatives for a partially renovated residential building. In addition to the existing district heating (base case) alternative systems, gas boilers, heat pumps (*air-water* and *ground-water*), solar collectors, solar cells, and combinations of these systems have been examined. Actual heat consumption of the building and electricity demand determined by the statistical method are used for simulating the systems. The process of simulation is performed using EnergyPro software. In order to select an optimal energy supply option, the life cycle analysis of all systems has been carried out throughout a life span of the building, and the estimated results of energy, environmental and economic evaluation have been converted into non-dimensional variables (3E) using multi-criteria analysis.

Keywords: residential building, district heating, solar collectors, solar panels, heat pump, life cycle analysis, multi-criteria analysis.