

**ŠILUMOS  
ENERGETIKA  
IR TECHNOLOGIJOS – 2015**

**Konferencijos pranešimų medžiaga**



**2015**



Kauno technologijos universitetas  
Lietuvos energetikos institutas  
Lietuvos šiluminės technikos inžinierių asociacija  
Branduolinės energetikos asociacija

**ŠILUMOS ENERGETIKA  
IR TECHNOLOGIJOS – 2015**

Konferencijos pranešimų medžiaga



Kauno technologijos  
universitetas  
Konferencija, 2015 m.  
sausio 29–30 d.

Kaunas \* LEI \* 2015

***Tarptautinis mokslinis komitetas***

*prof. Michail Berengarten, Maskvos valstybinis inžinerinės ekologijos universitetas (Rusija)*

*prof. Elmar Blums, Latvijos universiteto Fizikos institutas (Latvija)*

*prof. Eleonora Epik, Kijevo technikos universitetas (Ukraina)*

*prof. Jonas Gylys, Kauno technologijos universitetas (Lietuva)*

*prof. Gintautas Miliauskas, Kauno technologijos universitetas (Lietuva)*

*prof. Simeon Oka, Branduolinių mokslų institutas VINČA (Serbija)*

*prof. Arvo Ots, Talino technikos universitetas (Estija)*

*prof. Bengt Sunden, Lundo technologijos institutas (Švedija)*

*prof. Stasys Šinkūnas, Kauno technologijos universitetas (Lietuva)*

*prof. Eugenijus Ušpuras, Lietuvos energetikos institutas (Lietuva)*

*prof. Jurgis Vilemas, Lietuvos energetikos institutas (Lietuva)*

*prof. Raymond Viskanta, Purdue universitetas (JAV)*

*doc. Arvydas Adomavičius, Kauno technologijos universitetas (Lietuva)*

*dr. Rolandas Urbonas, Lietuvos energetikos institutas (Lietuva)*

***Redakcinė kolegija:***

*doc. Egidijus Puida (atsakingasis redaktorius)*

*prof. Jonas Gylys*

*prof. Gintautas Miliauskas*

*prof. Stasys Šinkūnas*

*doc. Kęstutis Buinevičius*

*doc. Juozas Gudžinskas*

*dr. Nerijus Striūgas*

*dr. Rolandas Urbonas*

*Leidinio straipsnius recenzavo redakcinė kolegija*

*ir nepriklausomi recenzantai*

© Kauno technologijos universitetas, 2015

© Lietuvos energetikos institutas, 2015

## 1 PLENARINIS POSĖDIS

### **Technologinių ir organizacinių naujovių poreikis Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo ūkyje**

Valdas Lukoševičius  
Kauno technologijos universitetas

Centralizuotas šilumos tiekimas (CŠT), kaip apsirūpinimo šilumine energija technologija, atskirose šalyse turi gana įvairų statusą, tenkinant visuomenės energetinius poreikius. Šios technologijos reikšmė atskiros šalies energetikoje labai priklauso nuo energetinės sistemos struktūros, klimato sąlygų, konkurencingumo kitų šildymo technologijų atžvilgiu, ir t. t. Tai lemia CŠT organizavimo principus, technologinį išstobulinimą, augimo mastus ir tolesnės raidos perspektyvą. Didelę įtaką CŠT technologijų raidai ir skvarbai daro bendroji energetikos politika. Ekonominiu požiūriu išsivysčiusių Šiaurės šalių pavyzdys rodo, kaip CŠT sistemos, praktiškai be valstybinės paramos, gali sukurti didžiulę pridėtinę vertę, aprūpinant vartotojus energija, tam panaudojant atsinaujinančius ir vietinius energijos išteklius, kartu su šiluma generuojant ir elektros energiją bei vėsumą, utilizuojant atliekas, diversifikuojant kuro rūšis ir t. t. Planuojant Lietuvos CŠT sektoriaus reguliavimo ir kainodaros mechanizmus, reikėtų objektyviai įvertinti šalies energetikos plėtojimosi tendencijas, atsižvelgti į šiuolaikinę Europos Sąjungos (ES) energetikos strategiją ir suformuoti aiškius tikslus, kurių siekti turėtų būti motyvuotos šilumos tiekimo įmonės, o valstybė tam padėtų.

Valstybinis reguliavimas Lietuvos CŠT sektoriuje yra labai išsamus, tad nuo jo sprendimų kokybės labai priklauso šilumos ūkio raida, jo technologinė pažanga ir tolesnė vieta bendrame energetikos ūkyje. Lietuvos CŠT sektoriaus raidą Nepriklausomybės laikotarpiu galima būtų suskirstyti į kelis būdingus etapus:

1. Iki 1997 m. dauguma centralizuoto šilumos tiekimo įmonių priklausė valstybės valdomai AB „Lietuvos energija“. Šiam laikotarpiui būdingas centralizuotas valdymas, kuris daugiausiai lėmė įmonių techninę politiką ir ekonominę padėtį. Tai sunkiausias laikotarpis, kai buvo prarasta daug vartotojų, šildymo tarifai nepadengdavo sąnaudų, finansinė padėtis buvo sudėtinga, tad įmonių galimybės atnaujinti ūkį buvo minimalios.
2. 1997–2004 m. šilumos ūkį perdavus savivaldybių nuosavybei, susiformavo akcinės bendrovės, pradėjo veikti nepriklausomas energetikos reguliatorius – Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija (VKEKK). CŠT sektoriuje pasirodė privataus kapitalo atstovai, stabilizavosi ekonominė padėtis, buvo sukurta teisinė ūkio reguliavimo bazė ir prasidėjo tolesnio plėtojimosi būdų paieška.
3. Nuo 2004 m. vyko spartus šilumos ūkio atnaujinimas, investicijoms panaudojant komercines paskolas ir ES paramos lėšas, sparčiai gerinamos

CŠT bendrovių techninės-ekonominės charakteristikos. Šiuo laikotarpiu vykdyti techninio atnaujinimo sprendimai gana tipiški – tai grupinių šilumokaitinių decentralizavimas, vamzdynų keitimas ir optimizavimas, biokurą naudojančių katilų ir kondensacinių šilumokaičių įrengimas, informacinių technologijų diegimas ir t. t. Nepaisant vieningos reguliavimo aplinkos, 2014 m. ūkio atnaujinimo intensyvumas, šiluminės energijos kainos ir tarifai bei ekonominė padėtis atskirose CŠT bendrovėse reikšmingai skiriasi. Tai lemia ne tik istorinis palikimas, bet ir skirtinga reakcija į valstybės reguliavimo bei paramos priemones.

Išlaidos centralizuotam šildymui Lietuvoje žiemos mėnesiais vis dar sudaro santykinai didelę būsto išlaidų dalį, tad 2004–2014 m. galima iš dalies apibūdinti kaip pasiekimų ir nusivylimų laikotarpį. Politikai ir aukšti valdininkai padėtį Lietuvos šilumos ūkyje apibūdina kaip nepatenkinamą ir planuojama toliau ieškoti būdų, kaip pagerinti šildymo prieinamumą ir bendrovių techninės-ekonominės charakteristikas. Kas lemia dabartinę situaciją ir kokių naujovių reikia Lietuvos CŠT sektoriuje, kad ši technologija taptų patraukli ne tik paprastam šilumos vartotojui, bet ir atliktų tą vaidmenį, kaip ir kaimyninių Šiaurės šalių energetikoje?

### **Reguliacinės kainodaros tobulinimas**

Manytina, kad viena didžiausių organizacinių problemų, būdinga, iš esmės, tik Lietuvai – tai atsiskaitymas už šiluminę energiją vienanare kaina. Absoliuti dauguma ES šalių už šildymo paslaugą moka dvinare arba daugianare kaina ir tarifais. Pagrindiniai vienanarės šilumos kainos trūkumai, kurie lemia „skausmingus“ atsiskaitymus už šildymą šalčiausiais žiemos mėnesiais:

- Vasarą tiekiamas tik karštas vanduo, o žiemą šiluminės energijos tiekimas 3-7 kartus didesnis – tad vasarą patirtos pastoviosios sąnaudos kompensuojamos žiemos mėnesiais.
- Dėl didžiulio energijos suvartojimo „sovietinės“ statybos pastatuose ir vasaros išlaidų kompensavimo žiemą, šildymo sąskaitos šalčiausiais mėnesiais tampa daliai vartotojų sunkiai pakeliamos, auga nemokumas, skolos, o dėl to brangsta šiluma.
- Valstybei kompensuojant nekorektiškai suskaičiuotas šildymo išlaidas, taikant PVM lengvatą ir t. t., neracionaliai naudojamos bendrapiliečių lėšos (švaistomas biudžetas).
- Šilumos vartotojai (ypač komerciniai) nesuinteresuoti atsisakyti perteklinės šilumos įvadų galios, tad už juos tenka mokėti visiems šilumos vartotojams.

Dėl nurodytų priežasčių kyla dalies CŠT vartotojų nepasitenkinimas šildymo išlaidomis žiemos mėnesiais. Atsiskaitymo tvarkos problemos sprendimas tampa dar aktualesnis dėl šių aplinkybių:

- Daugeja šilumos vartotojų, kurie įsirengia alternatyvias šildymo sistemas, tačiau neatsisako ir centralizuoto šildymo – juk nieko nekainuoja(?). Dėl to didesni CŠT sistemos išlaikymo kaštai tenka kitiems vartotojams;
- Vyksta pastatų ir šilumos tiekimo trasų renovacija, mažėja šilumos suvartojimas, tad reikia optimizuoti vamzdynų sistemas, sumažinant perteklines galias – reikia ekonominio motyvo jų atsisakyti;
- Šilumos kainodara turi skaidriai atspindėti pagrįstas sąnaudas ir skatinti šilumos vartojimo bei tiekimo efektyvumą, o kaštai turi būti apmokami tuomet, kai jie susidaro.

Daugianarės kainos komponentai (prijungimo prie vamzdynų tarifas, šiluminė galios kaina, suvartotos energijos apmokėjimas, taupymo paskatos ir t. t.) turėtų būti moksliškai pagrįsti ir įdiegti CŠT kainodaroje.

Kitas didelis dabartinės kainodaros Lietuvos CŠT sektoriuje trūkumas – menka ekonominė motyvacija mažinti šilumos tiekimo sąnaudas ir kainas. VKEKK spaudimas efektyviau dirbti, mažinant atskiras sąnaudas, iš esmės yra planinės ekonomikos laikų metodas ir labiau tinka energetinei infrastruktūrai reguliuoti, bet ne šilumos ūkyje, kuriame yra daug galimybių gaminti (pirkti) šilumą pigiau – reikia tik motyvacijos. Kita vertus, ar VKEKK pasižymi geresne kompetencija, negu CŠT bendrovėse dirbantys specialistai, ir geriau žino kaip vykdyti veiklą? Dažnai vyksta tiesiog „katės ir pelės žaidimas“, vieniems „pučiant“, o kitiems „apkarpanč“ sąnaudas. Pelnas traktuojamas kaip investicinė grąža, bet didelė jo dalis sunaudojama ne pagal paskirtį. Planuojama ir pelną reguliuoti individualiai – tik ar VKEKK gali geriau įvertinti ekonominę situaciją ir galimybes kiekvienoje bendrovėje nei jos administracija (savininkai)? Akivaizdu, kad dabartinė situacija šilumos ūkio kainodaroje reikalauja gilesnio tyrimo, tarptautinės patirties įvertinimo ir tinkamo ekonominio modelio, kuris įvertintų Lietuvos CŠT sektoriaus realijas ir būsimą perspektyvą. Tam reikia apibrėžti aiškų šilumos ūkio modelį, kuris bus kuriamas Lietuvoje. Jų iš esmės gali būti keli:

1. Sektorius valstybės išsamiai reguliuojamas, o motyvacija pagrįsta daugiausiai socialine atsakomybe;
2. Minimaliai reguliuojamas (ribojamas), bendrovių ekonominė motyvacija pagrįsta skatinamąja kainodara ir pelno siekimu;
3. Nereguluojamas sektorius, laisvai konkuruojantis su kitais šildymo būdais;
4. Kitokie modeliai, dažniausiai būna pirmųjų trijų mišinys.

Reikia išsamios ir gilios diskusijos (tyrimų), norint nustatyti galutinius Lietuvos CŠT sektoriaus suformavimo tikslus ir parinkti tam tinkamas reguliacines ir skatinimo priemones. Šiuo metu investuotojai nesuinteresuoti reguliuojamu CŠT sektoriumi (mažai galimybių uždirbti), tad ieškoma kitų būdų užsidirbti („už tvoros“). Jeigu šilumos tiekimas yra pelno siekianti veikla, tai turi būti taikoma skatinamoji kainodara, o ne planinės ekonomikos metodai. Manoma, kad reikia

konceptualiai išnagrinėti reguliuojamąją kainodarą Lietuvos CŠT sektoriuje ir nustatyti efektyvias reguliavimo priemones, kurios ekonomiškai motyvuotų pačius šilumos tiekėjus siekti tų tikslų, kurių iš jų tikisi visuomenė. Deja, natūralių monopolinių darinių reguliavimas, kaip mokslas, Lietuvoje kol kas ne tik menkai išplėtotas, bet ir tarptautinė patirtis kol kas prastai panaudojama.

### ***Konkurencijos šilumos gamyboje analizė ir tobulinimas***

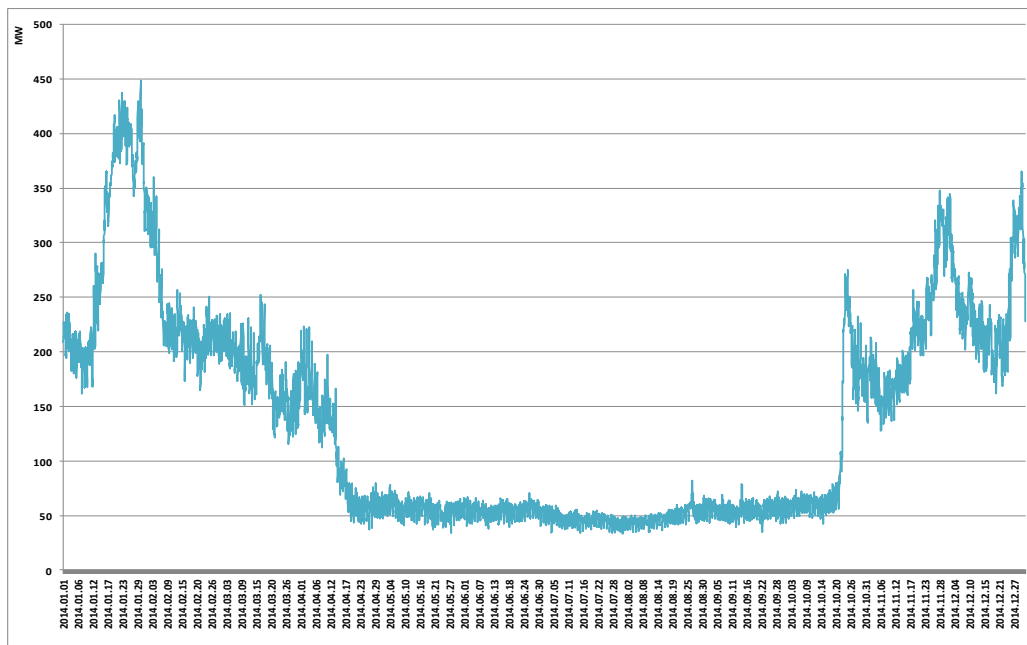
Esant mažai motyvacijai mažinti šilumos tiekimo sąnaudas reguliuojamame CŠT sektoriuje, 2010 m. teisiškai įdiegta ir išsamiai reglamentuota konkurencija šilumos gamybos srityje. Ją prižiūri VKEKK, kuri turi svarbius įgaliojimus nustatyti šilumos supirkimo iš nepriklausomų šilumos gamintojų (NŠG) tvarką. Šis principas kai kuriuose miestuose (Kaune, Klaipėdoje) pasiekė greitą efektą, dėl šių priežasčių:

1. Konkurencija paskatino mažų biokurą naudojančių katilinių sparčią statybą. Pavyzdžiui, Kauno mieste per 2 metus atsirado 6 tokie NŠG, kurių bendra galia siekia 140 MW;
2. Konkurencija paskatino reguliuojamus šilumos tiekėjus sparčiau investuoti į pigesnę biokurą naudojančius katilus – Kaune tuo pačiu laikotarpiu pats šilumos tiekėjas įsirengė 70 MW bendros galios biokuro katilų;
3. Arši konkurencija Kauno mieste dėl įrenginių pertekliaus šiltesniais mėnesiais lėmė, kad galutinė šilumos kaina tapo mažiausia Lietuvoje (2015, balandis);

Pastarųjų metų patirtis Lietuvos šilumos ūkyje parodė, kad veiksmingą konkurenciją sunku užtikrinti visus metus – šaltaisiais mėnesiais šilumos kainas iš esmės lemia paties šilumos tiekėjo gaminamos šilumos savikaina. Vidutinė metinė šilumos kaina mažiausia tuose miestuose, kuriuose biokurą naudojančius katilus įrengė pats šilumos tiekėjas, maksimaliai pasinaudodamas turima energetine infrastruktūra ir ES parama. Pažymėtina, kad šilumos tiekimas metų laikotarpiu labai netolygus (1 pav.), ir todėl sunku tikėtis perteklinių, pigią šilumą tiekiančių gamintojų, kurie konkuruotų ir žiemos mėnesiais. Jeigu nėra konkurencingų gamintojų, tuomet nėra ir prielaidų konkurenciniam spaudimui. Sunku tikėtis efektyvios konkurencijos ir mažose CŠT sistemose.

Nors konkurencijos principas patrauklus, reikia įvertinti, kad esant „laukinei konkurencijai“ nepanaudojama turima CŠT infrastruktūra, o dažniausiai daromos „plyno lauko“ investicijos. Statomos tipiškos konstrukcijos ir panašaus efektyvumo katilinės, ir neplėtojami kogeneracijos objektai, kurie yra rizikingi konkurencijos sąlygomis. Dėl to nepanaudojamas pagrindinis CŠT privalumas – kartu su šiluma gaminti ir elektrą. Dalis šilumos tiekėjų investuoja kitose savivaldybėse, nes taip gaunamas nereguliuojamas pelnas, kai kuriais atvejais kyla perinvestavimo rizika. Šie ir kiti pavyzdžiai rodo, kad dabartinis konkurencijos CŠT sektoriuje modelis turi ir trūkumų, kuriuos reikėtų kvalifikuotai įvertinti ir parengti moksliškai pagrįstas rekomendacijas tolesniam CŠT sektoriaus reguliavimo tobulinimui.

## 2014 m. Kauno miesto CŠT tinklo integruotos sistemos valandinis vidutinis apkrovimas



1 pav. Centralizuoto šilumos tiekimo į Kauno miesto vamzdynų sistemą galia 2014 m.

## ***Valstybės politikos ir reglamentavimo šilumos ūkyje tobulinimas***

Lietuvoje gana paini ir neefektyvi daugiabučių pastatų priežiūros sistema, nemažai kritikuojama gyventojų. Šilumos tiekėjas, vandens tiekėjas, karšto vandens tiekėjas, vidaus sistemų priežiūrėtojas ir kitokie „subjektai“, veikiantys daugiabučiuose, dažnai kratosi atsakomybės už šildymo ir karšto vandens tiekimo kokybę bei efektyvumą, tad gyventojams sunku gauti tinkamos kokybės paslaugas, o mokėti tenka už viską. Manytina, kad dabartinis modelis keistinas ir visas paslaugas, susijusias su vandens ir šilumos skirstymo daugiabučio pastato viduje, turėtų atlikti viena vandens ir šilumos skirstymo įmonė. Taip būtų aiškiai atskirta monopolinė šilumos tiekimo riba „iki įvado“, o toliau viena bendrovė (kitas subjektas) teiktų šiluminės energijos ir vandens tiekimo paslaugas pastato viduje (taip yra daugelyje ES valstybių). Tokia šilumos ir vandens skirstymo (teikimo) įmonė galėtų užsiimti šalto ir karšto vandens apskaita, diegtų individualaus šildymo reguliavimo ir apskaitos prietaisus atskiruose butuose, remontuotų vidaus vamzdynus, diegtų energijos taupymo priemones daugiabučiuose ir pan. Vieningas šilumos ir energijos skirstytojas pastatuose galėtų perimti dabar vandens ir šilumos tiekėjų gaunamas už šią veiklą reguliuojamas pajamas, o šios veiklos kainos, tikėtina, sumažėtų dėl paslaugų koncentracijos. Šiam tikslui įgyvendinti reikia organizacinio modelio teisinio-ekonominio pagrindimo, privalumų ir rizikų identifikavimo, įgyvendinimo plano ir t. t.

Kai kuriose CŠT sistemose realiai pradėjus veikti gausiam skaičiui konkuruojančių šilumos gamintojų, iš esmės pasikeitė rezervinio kuro ir įrenginių poreikis. Dabar galiojanti rezervavimo tvarka pagrįsta monopoliniu šilumos gamybos ir perdavimo principu. Akivaizdu, kad ši tvarka keistina, į rezervavimo programą įtraukiant ir nepriklausomus šilumos gamintojus, kurie už reguliuojamą atlygį teiktų šią paslaugą CŠT sistemai. Tai sumažintų „budinčių“ įrenginių kiekį, būtų įvairesnis ir labiau išskaidytas rezervinis kuras, sumažėtų šilumos tiekimo kaštai, o šilumos tiekimo patikimumas daugeliu atvejų pagerėtų. Šia tema reikia tyrimo ir kvalifikuotos rekomendacijos atsakingoms valstybės institucijoms.

Komplikuojantis geopolitinei padėčiai aktualus tampa Valstybės naftos produktų atsargų panaudojimo CŠT įmonėse klausimas. Nors valstybė pagal ES reikalavimus privalo užtikrinti šių produktų tiekimą iki 3 mėnesių laikotarpiui, tačiau jo būtų tiekiama tokia apimtimi, kokia buvo naudojama iki ekstremalios padėties paskelbimo. Tai reiškia, kad, pavyzdžiui, nutrūkus gamtinių dujų tiekimui šilumos gamintojai net negalėtų pasinaudoti šiomis naftos produktų atsargomis. Situacija turėtų būti aiškiau reglamentuota, o tam reikia kvalifikuotai įvertinti potencialias rizikas šilumos ūkyje ir numatyti galimų problemų sprendimo kelius.

CŠT vamzdyno Telšiuose avarija parodė, kad įvykus stambesnei avarijai viena nedidelė šilumos tiekimo įmonė vargu ar galėtų skubiai ją likviduoti ir pašalinti

avarijos padarinius. Išanalizavus Lietuvos ir kitų šalių patirtį šioje srityje, būtų apdairu įvertinti tokių avarių tikimybę, galimas pasekmes ir iš anksto parengti vietines ir, galbūt, centralizuotas priemones tokios rizikos prevencijai ar pasekmėms likviduoti.

Lietuvos CŠT sektoriuje sparčiai diegiant pigesnę nei iškastinis importuojamas kuras vietinį atsinaujinantį biokurą, daug ekonominės naudos gauna ne tik šilumos vartotojai, bet ir valstybė apskritai. Vienas būdų didinti šio proceso pridėtinę vertę – prijungti prie CŠT sistemų individualaus dujinio šildymo naudotojus ir taip išplėsti biokuro vartojimo mastus (plėsti kogeneraciją ir t. t.) bei generuoti fiskalinį efektą. Mokslinis tyrimas, įvertinantis CŠT plėtros naudą šalies ekonomikai, padėtų parengti CŠT plėtros skatinimo efektyvius mechanizmus, prisidėtų formuojant tolesnius Lietuvos energetikos raidos scenarijus.

Didelį postūmį tobulinant Lietuvos energetiką galėtų suteikti Energijos vartojimo efektyvumo direktyvos įgyvendinimas. Deja, iki šiol nėra aiškūs net jos įgyvendinimo principai, tad Lietuvos energetikos mokslinė ir praktinė visuomenė turėtų aktyviai teikti idėjas, kaip organizuoti šį procesą, kad jo nesužlugdyti. Reikėtų skubiai rengti projektus, kurių įgyvendinimas rastų geriausius energijos sutaupymo būdus bet kurioje srityje.

### ***Technologinių inovacijų poreikis Lietuvos CŠT sektoriuje***

Lietuvos CŠT sektoriuje dirbantys inžinieriai ir mokslininkai daug prisidėjo sprendžiant kasdienes technologines problemas, tačiau greta pasiekimų yra daug erdvės pasireikšti ir kūrybinei minčiai, gerinant technologinių procesų technines-ekonominės charakteristikas.

Šilumos gamybos šaltinių efektyvumo didinimo galimos kryptys:

1. Esamų ar naujų katilų pritaikymas įvairesnių charakteristikų kietajam kurui (miško atliekos, šiaudai, durpės ir pan.) deginti;
2. Kurą deginančių įrenginių aplinkosauginių charakteristikų gerinimas, siekiant atitikti naujų ES direktyvų reikalavimus;
3. Išsamesnis ištekiančių dūmų šilumos panaudojimas šilumos siurblių dėka, panaudojant utilizuojamą energiją vandeniui ar orui pašildyti.
4. Plastikinių medžiagų platesnis panaudojimas kaminams ir dūmtakiams gaminti;
5. Karšto vandens talpyklų panaudojimas šilumos akumuliacijai ir pikinei energijai gaminti;
6. Šilumos generavimo galių optimizavimas, perteklinių įrenginių likvidavimas arba jų galimybių prasmingas panaudojimas;
7. Technologinių procesų automatizavimas ir pan.

Lietuvoje galiojantys CŠT tinklų vandens kokybės normatyvai daugiausiai vadovaujasi senomis sovietinių laikų instrukcijomis, kurias reikėtų revizuoti, įvertinant geriausią tarptautinę praktiką. Siekiant toliau mažinti šilumos perdavimo nuostolius ir didinti vamzdynų sistemos ilgaamžiškumą, manytina, kad tikslinga ištirti galimybes ir rengti konkrečius pasiūlymus šiose srityse:

1. Naujų šiuolaikinių termofikacinio vandens kokybės standartų parengimas ir rekomendacijos joms užtikrinti;
2. Termofikacinio vandens nuolatinio dalinio valymo ruožų įrengimas su korekcinio vandens apdorojimu;
3. Individualių vandens paruošimo programų parengimas didžiosioms CŠT sistemoms;
4. Vamzdynų patikimumo ir ilgaamžiškumo stebėseną bei prognozavimas, siekiant padidinti eksploatacijos resursą ir optimizuoti jų pakeitimą;
5. Termofikacinio vandens nuotekių paieškos metodų tobulinimas, panaudojant didelio jautrumo termografines kameras su bepiločiais skraidymo aparatais, didelės skvarbos dujų įvedimą į vandenį ir jų ištekėjimų paiešką ir t. t.

Šilumos perdavimo nuostoliams vamzdynų sistemose mažinti, tikslinga tobulinti vamzdynų termohidraulinio modeliavimo metodus. Šilumos perdavimo sistemų eksploatacinėms savybėms gerinti reikėtų galimai įkomponuoti tarpinio pakėlimo siurbines, pikines katilines, akumuliacines talpyklas ar pan. Šiluminės izoliacijos atstatymas vamzdynuose, sumontuotuose nepraeinamuose kanaluose, pakankamai specifinė „posovietinė“ problema, kuriai spręsti reikia gerų idėjų. Lietuvos CŠT sistemose beveik nenaudojami plastikiniai vamzdžiai, nors kai kuriose Vakarų Europos šalyse jų naudojama daugiau negu metalinių. Šios ir panašios temos galėtų būti Lietuvos mokslininkų bei inžinierių kūrybos ir išradingumo objektai. Šalia rutininių problemų sprendimo, įvertinant savo bei kitų šalių patirtį bei ES politiką energetikoje, galima numatyti ir kitus ateities veiksmus, kuriems reikia mokslinio ir inžinerinio potencialo.

1. Prasidėjus masinei renovacijai, matyt, teks pritaikyti esamas CŠT sistemas prie 10–30 % mažėsiančio šilumos pardavimo;
2. Šilumos šaltiniuose teks išmokti deginti ne tik kokybišką smulkintą medieną, bet ir kitas „sunkaus“ kuro rūšis;
3. Šilumai gaminti teks panaudoti tiek naujas energijos rūšis, tiek ir naujas technologijas, pvz, šilumos siurblius, saulės kolektorius ir panašiai;
4. Jeigu įgyvendinant ES direktyvas butuose bus įrengtos šildymo reguliavimo sistemos, energijos vartojimas taps dar labiau „šokinėjantis“, prie kurio pritaikyti reikės naujų technologinių sprendimų;
5. Labai kintant elektros kainoms rinkoje gali atsirasti poreikis panaudoti pigią elektrą šilumai gaminti, dalį jos akumuliuojant;
6. Kelių dienų ar sezoninis šilumos akumuliacija ateityje gali tapti rentabili technologija CŠT sektoriuje, komplekse su kogeneracinėmis

jėgainėmis, jei toliau plėtosis elektros rinka su didžiuoliais kainų svyravimais;

7. Manoma, kad ateityje CŠT sistemos taps išmaniaisiais tinklais, kuriais šilumos vartotojai keisis su šilumos gamintojais pertekline energija.

Šias ar kitas tendencijas gali pakoreguoti įvairūs faktoriai, tik svarbu neaukoti ilgalaikių sprendimų vienadienio intereso labui. Europos patirtis rodo, kad šilumos tiekimo, kaip ir kita energetikos infrastruktūra, yra labai brangi ir vertinga, tad nederėtų neracionaliai švaistyti ribotų investicinių resursų. Kompleksinis sistemų plėtojimas, pavyzdžiui, kombinuotas šilumos, vėsumos ir vandentiekio vamzdinių tiesimas ar elektros generavimo kombinavimas su šilumos gamyba ir panašiai, galėtų reikšmingai sumažinti išlaidas energijos vartotojams ir mokesčių mokėtojams. Norint tai suprasti ir tinkamai organizuoti, valstybėje turi būti aukšta planavimo ir reguliavimo kompetencija, reikalinga suderinti atskiros įmonės investicinę motyvaciją su visos valstybės ilgalaikiais energetiniais ir ekonominiais interesais.

Danija ir Lietuva savo klimato sąlygomis ir energetiniais ištekliais yra pakankamai panašios. Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo sektoriuje iki šiol panaudota daug techninių ir organizacinių priemonių, sukurtų arba išbandytų Danijoje. Verta atidžiai įsiklausyti į danų ateities planus, nes visai realu, kad ir mes eisime tuo pačiu keliu, tik labiau vėluojant ir su įvairiais „klystkeliais“. Įdomu, kaip Danijoje traktuojamas centralizuotas šilumos tiekimas ir jo vieta šiuolaikinėje energetikoje ir apskritai visuomenėje:

1. Sprendimai energetikoje turi būti priimami kompleksiškai, įvertinant pastatų energetines savybes, pastatų infrastruktūrą, esamas ir būsimas šilumos bei elektros tiekimo sistemas;
2. Centralizuotas šilumos ir vėsumos tiekimas yra natūrali šiuolaikinių miestų infrastruktūros dalis;
3. Centralizuoto šilumos tiekimo sistemos yra puiki infrastruktūra efektyviam, ekonomiškam ir lanksčiam atsinaujinančių išteklių naudojimui, šilumos ir elektros kogeneracijai, atliekų utilizavimui, energijos akumuliacijai ir t. t.;
4. Stabili ilgalaikė energetikos politika ir miestų planingas plėtojimas būtinas optimaliai energetinei infrastruktūrai plėtoti;

Lietuvoje centralizuoto šilumos tiekimo ūkio plėtojimas dažnai traktuojamas priešingai – nereguliuojama konkurencija turi išspręsti bet kurias problemas. O gal tai tik pasiteisinimas, valstybėje trūkstant kompetencijos ar nenorint rimtai dirbti? Mokslo visuomenė galėtų daugiau prisidėti analizuojant CŠT sektoriaus vietą šiuolaikinėje energetikoje ir ekonomikoje, siekiant padėti politikams ir valdininkams priimti teisingus sprendimus.

### Išvados

1. Apžvelgti praktiniai valstybinio reguliavimo Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo sektoriuje pasiekimai ir formuluojamos organizacinės problemos, kurioms spręsti reikia mokslinių tyrimų ir jais pagrįstų naujų sprendimų.
2. Nagrinėjamos dabartinės technologinės problemos ir bandoma numatyti ateities iššūkius šilumos ūkyje, kuriuos galėtų nagrinėti Lietuvos mokslo institucijos, ieškant naujų inžinerinių sprendimų.

### Literatūra

1. Lukoševičius V., Kalpokas V. Centralizuoto šilumos tiekimo sektoriaus reguliavimas pereinamosios ekonomikos šalyse. *Šilumos energetika ir technologijos*. Konferencijos pranešimų medžiaga. Kaunas, 2010.
2. Lukoševičius V., Puidokas T. Investavimo motyvacija Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo sektoriuje. *Šilumos energetika ir technologijos*. Konferencijos pranešimų medžiaga. Kaunas, 2010.
3. Lukosevicius V., Werring L., REGULATORY IMPLICATIONS OF DISTRICT HEATING, Textbook, ERR, 2011.

### **Demand for technological and regulatory inovations in the Lithunian district heating sector**

#### Summary

The article describes regulatory and technological problems existing in the Lithuanian District Heating Sector, which require research activities and a renewed approach, based on scientific recommendations. Regulatory development and technological progress of the sector in comparison to international experience is analyzed. Current technological problems and future possible development of district heating sector are overviewed, and potential themes for research studies and engineering projects are presented.

## 2 ATSINAUJINANTYS ENERGIJOS IŠTEKLIAI IR BIOSFEROS APSAUGA

### Sausinto dumblo ir kietojo atgautojo kuro (KAK) panaudojimo galimybės šiluminei energijai gaminti Alytaus regione

Gintvilė Žvirblytė  
UAB AF-Consult

Šiuo metu galiojantys Lietuvos Respublikos teisės aktai sudaro sąlygas ir skatina naudoti atliekas energijai gaminti, tačiau stokojama kietojo atgautojo kuro bei sausinto dumblo naudojimo energijai gaminti proceso reglamentavimo, ypač ekonominių bei reguliavimo priemonių mažiems ir vidutinio pajėgumo atliekų deginimo įrenginiams. Energetinę vertę turinčių atliekų panaudojimo projektai sukuria apčiuopiamą naudą socialiniu, energiniu bei valstybės išskeltų tikslų įgyvendinimo požiūriu. Siekiant įvertinti Alytaus regiono atliekų tvarkymo centre (ARATC) susidarancio kietojo atgautojo kuro (toliau KAK) ir Alytaus miesto nuotekų valykloje susidarancio sausojo dumblo (toliau SD) panaudojimo galimybes energijai gaminti Alytaus mieste, buvo atlikta galimybių studija.

Alytaus mieste gyvena apie 62 000 gyventojų, miesto vidutinis šilumos poreikis 260 000 MWh per metus, Maksimalus galios poreikis – 80 MW, vidutinis– 40 MW, minimalus (vasaros metu – 10-15 MW). Alytuje jau veikia moderni biokuru kūrenama termofikacinė jėgainė, planuojama dar viena. Taigi, trečios jėgainės, kūrenamos KAK‘u, sausintu dumbly (SD) bei biokuru, atsiradimas sudarytų žymią konkurenciją ir turėtų teigiamos įtakos šilumos kainoms mieste. [2]

Šiuo metu baigiamas įgyvendinti projektas „Alytaus regiono komunalinių atliekų tvarkymo sistemos plėtra“, kurio vykdymo metu bus nupirkti buitinių atliekų kompostavimo konteineriai miesto individualių namų gyventojams, pastatyti komunalinių atliekų mechaninio rūšiavimo, biologinio apdorojimo (toliau – MBA) su energijos (dujų) gamyba ir virtuvės atliekų biologinio apdorojimo įrenginiai. Sukurta komunalinių atliekų tvarkymo infrastruktūra leis atskirai (ne sąvartyne) pūdyti komunalines atliekas. Tai padės išspręsti problemas, kylančias dėl bioskaidžių atliekų surinkimo bei priėmimo į saugomas aikštes ir ypač sąvartynus, siekiant įgyvendinti Valstybinio atliekų tvarkymo plano [3] atitinkamus tikslus ir užduotis. Atliekų tvarkymo MBA įrenginiuose metu susidaro KAK, kuris „Pramoninių ir komunalinių atliekų biologiškai skaidžios dalies atskyrimo metodikos“ [4] (toliau – Metodika) nuostatose įvardijamas kaip kuras, pagamintas iš nepavojingųjų atliekų, pasižymintis aukšta energetine verte ir naudojamas atliekų naudojimo energijai gauti įrenginiuose, kogeneracinėse jėgainėse. Po Metodikos [4] papildymo ir pakeitimo, susiejant ją su LST EN 15359:2012 standartu [5] (toliau – Standartas), atliekos pagal kilmę įvardijamos kaip komunalinės, pramoninės, specifinės gamybos, nuotekų dumblas ir t. t., todėl tiek kietasis atgautasis kuras iš

mechaninio biologinio atliekų tvarkymo įrenginio, tiek sausintas dumbblas, bendrai galėtų būti įvardijami kaip KAK.

Standarto [5] pagrindu, pagal įtaką energijos gamybos procesui visus kokybinius KAK rodiklius galima suskirstyti į 3 grupes:

1. po rūšiavimo likusios, netinkamos perdirti ir energetinę vertę turinčios komunalinės atliekos (neklasifikuotos); atgavimo būdas – antrinis mechaninis rūšiavimas; šilumingumas – 7-8 MJ/kg;
2. kuras iš atliekų (angl. RDF – Refuse Derived Fuel) (neklasifikuotas); atgavimo būdas – antrinis mechaninis rūšiavimas, galimas biologinis apdorojimas; šilumingumas – 12-20 MJ/kg;
3. kietasis atgautasis kuras, arba KAK (angl. SRF – Solid Recovered Fuel) (klasifikavimas pagal CEN/TS 15359); atgavimo būdas – MBA; tipinis šilumingumas – 10-15 MJ/kg (4 arba 3 klasė).

Iš faktinių duomenų apie Alytuje planuojamo gauti KAK savybes galima daryti išvadą, jog pagal Standartą [5] planuojamas gauti KAK atitiktų 3-4 klasę (SRF) (faktinis drėgno kuro apatinis šilumingumas – 15,8 MJ/kg). Numatomas pagaminti KAK kiekis – 12.480 t/metus (1.040 t/mėn.; apie 34,2 t/parą; apie 1,4 t/h), o maksimaliai galimas sukaupti kiekis – 3.120 t.

Lyginant faktinius duomenis apie Alytaus miesto nuotekų valykloje susidarancio džiovykloje išdžiovinto SD sudėtį, pateiktų SD mėginių tyrimo rezultatus bei kituose Lietuvos miestuose susidarancio SD rodiklius nustatyta, jog Alytaus miesto nuotekų valykloje susidarancio SD charakteristikos nesiskiria nuo kitų Lietuvos regionų nuotekų valyklose susidarancio dumblių – kuro apatinis šilumingumas yra 10 MJ/kg, kas atitiktų reglamentuojamą visuminę drėgmę apie 10 proc. Dumbblas pagal metalų kiekį priskiriamas II – ai kategorijai. Metiniai sausinto dumblo kiekiai 2014 – 2020 m. siekia 2 700 t/m.

KAK ir SD gali būti deginamas atskirai arba kartu su kitu kuru, pavyzdžiui, buitinėmis arba pramoninėmis atliekomis, biokuru. Tai yra populiarus, praktikoje taikomas, KAK ir nuotekų dumblo deginimo būdas. Tačiau įrenginys, kuriame deginami KAK ir SD, neatsižvelgiant ar jame naudojamas ir kitas kuras (pvz., biokuras), tampa bendruoju atliekų deginimo įrenginiu, kuriam taikomi griežti aplinkosauginiai reikalavimai, nustatyti Europos Bendrijos [6] ir Lietuvos teisės aktais [7].

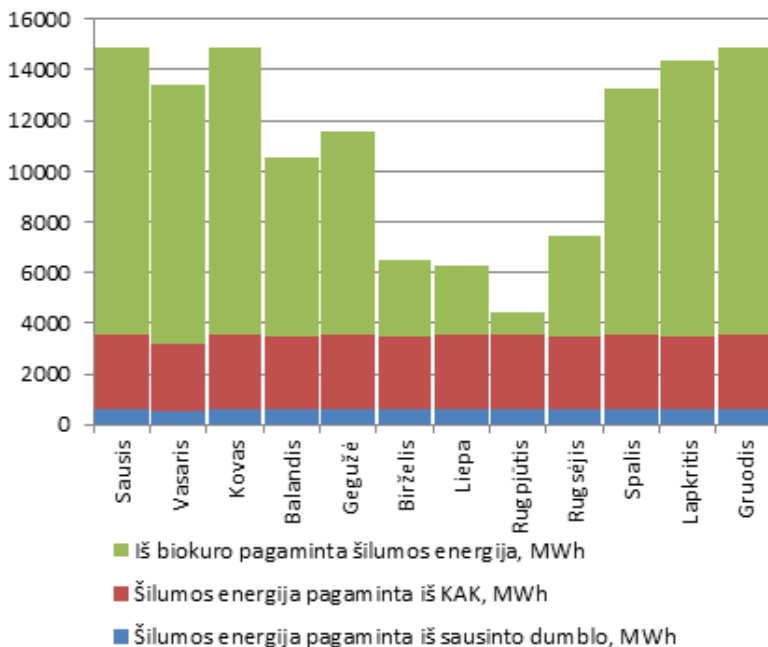
SD kuro balanse dažniausiai sudaro vos kelis procentus (5-7 proc.), todėl tai nereikalauja papildomai didelių investicijų. Deginant didesnį nuotekų dumblo kiekį su kitomis atliekomis, reikia turėti tinkamą deginimo krosnį su modernia kūryklų valymo įranga (dėl dumblo esančių žemos lydymosi temperatūros metalų junginių). Papildomai gali būti reikalingos investicijos dumblo priėmimo, sumaišymo ir pakrovimo į krosnį įrangai, taip pat kūryklų dūmų valymo įrangos apimtims išplėsti. Taigi, dėl papildomų įrengimų, reikalingos pradinės investicijos katilinei stipriai padidėja.

Išnagrinėjus Europos Komisijos rekomendacinį dokumentą apie geriausius atliekų deginimo gamybos būdus [6] bei apžvelgus šiuo metu ES sėkmingai veikiančius nuotekų dumblo kartu su kitomis atliekomis deginimo projektus, taip pat bendraujant su keletu pagrindinės įrangos tiekėjų, tolesnei analizei buvo pasirinktos ardyninės pakuros ir verdančio sluoksnio (angl. BFB/CFB – Circulating Fluidised Bed) KAK ir SD deginimo technologijos.

Naujai jėgainei buvo nagrinėjami du veikimo režimai (papildomai juos išskirstant į šilumos bei elektros kogeneraciją ir tik šilumos gamybą):

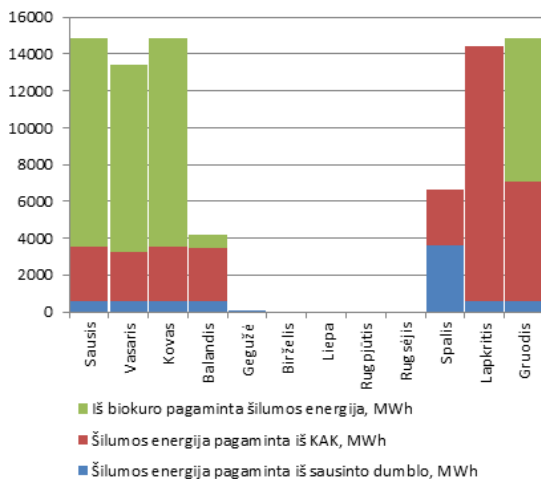
1. kai katilinė dirba prioritetiniu režimu;
2. kai katilinė dirba ne prioritetiniu režimu.

1-uoju atveju naujai projektuojamoje jėgainėje pagamintos šilumos mėnesiniai kiekiai ir jų išskaidymas pagal tam sunaudotą kurą pateiktas 1 paveiksle.

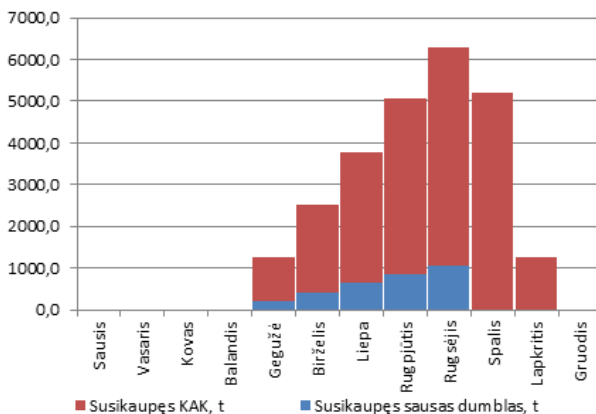


1 pav. Šilumos gamybos pasiskirstymas pagal sunaudotą kurą 1-uoju atveju

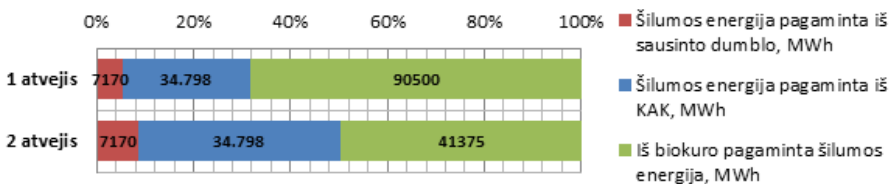
2-uoju atveju naujai projektuojamoje jėgainėje pagamintos šilumos mėnesiniai kiekiai ir jų išskaidymas pagal tam sunaudotą kurą pateiktas 2 paveiksle, o per metus susikaupiančio kuro kiekis – 3 paveiksle.



2 pav. Šilumos gamybos pasiskirstymas pagal sunaudotą kurą 2-uoju atveju



3 pav. Susikaupiantis kuro kiekis 2-uoju atveju



4 pav. Kuro balansas 1-uoju ir 2-uoju atvejais

Pagal pateiktos analizės rezultatus matyti, kad naujai jėgainei siektina užtikrinti 1-ąjį darbo variantą, t. y., kad nauja jėgainė dirbtų ištisus metus, įskaitant ir vasarą. Kitu atveju gegužę – lapkritį susidarys KAK perteklius, kurį reikės kaupti. Taip pat, iš 4 paveikslo matyti, jog abiem atvejais utilizuojamas (sudeginamas) visas KAK ir SD kiekis, tik 1-uoju atveju papildomai pagaminama daugiau šilumos (nagrinėjant ir kogeneraciją – ir elektros) energijos, kas leidžia gauti papildomų pajamų.

Deginimo įrenginių tiekėjų apklausa leido nustatyti preliminarias investicijas į tokio tipo įrenginius, kurios (atsižvelgiant ar su elektros gamyba, ar be) svyruoja nuo 28 mln. EUR iki 31 mln. EUR (pastaba – 2013/14 metų kainos).

Įvertinus šios dienos sąlygas, kad projektas taptų komerciškai patrauklus, būtinos papildomos sąlygos, t. y., parama pradinėi investicijai, gerokai mažesnės pradinės investicijos, atliekas deginančios įmonės „vartų mokestis“, arba didesnis sudegintas KAK kiekis (virš 30.000 t/metus).

Studijoje [1] išnagrinėtas ir alternatyvus variantas, kai esant toms pačioms prielaidoms, naujoje jėgainėje būtų atsisakyta KAK deginimo, o iš jo planuota pagaminti energija būtų gaunama deginant papildomą biokuro kiekį. Taigi, stipriai sumažėjusios investicijos į deginimo įrenginį ir sudėtingus valymo įrenginius lemia, jog ši alternatyva yra finansiškai priimtina, o gautas 9-10 metų projekto atsipirkimo laikotarpis būtų patrauklus verslo investuotojams. Įgyvendinus šią alternatyvą būtų išspręsta susidarančio dumblo utilizavimo problema, o nesudeginamo kieto atliekinio kuro tolesnis tvarkymas (panaudojimas) turėtų būti išnagrinėtas atskirai.

### Išvados

Kietojo atgautojo kuro kogeneracija (bendra elektros ir šilumos gamyba) yra pats pigiausias iš kogeneracijos metodų, nors ekonomiškai jį galima naudoti tik esant nuolatiniam šilumos poreikiui – apie 30-50 MW ir daugiau. Esant mažesniai baziniam šilumos poreikiui dėl didelio masto ekonomijos efekto įtakos, mažų galingumų KAK kogeneracinių įrenginių gaminamos energijos savikainos greitai kyla. Dėl nulinės ir net neigiamos kuro kainos, galutinė šilumos gamybos kaina, parduodant elektros energiją rinkoje, yra gana žema. Dalį kuro (bent 20 proc.) sudaro biomasė, bet jos pirkimo išlaidas padengia pajamos iš atliekų vartų mokesčių. Šis KAK kogeneracijos metodas turi kelis trūkumus:

1. Didelės pradinės investicijos. Atitinkamo galingumo biomasės kogeneracinės jėgainės gali būti net 2 kartus pigesnės.
2. Komplikuota ES struktūrinių fondų parama. KAK kogeneracija nėra identifikuojama kaip šilumos ar elektros gamybos priemonė, kuriai būtų galima suteikti ES struktūrinių fondų paramos lėšų. Dėl to, investicijas į tokius objektus gali skirti tik finansiškai stiprūs subjektai.
3. Ribotas kuro kiekis. Vertinama, kad Lietuvoje gali būti tik apie 160-210 tūkst. tne KAK kuro. Atsižvelgiant į tai, kad tik dalis šio kuro prieinama

dėl atliekų surinkimo, rūšiavimo ir pervežimo apribojimų, KAK kogeneracijos projektams veikti šiuo metu nėra sudaryta palankių sąlygų.

4. Apibendrinant pažymėtina, kad KAK kogeneracija – žemiausią šilumos kainą generuojanti, bet reikalaujanti daug investicijų ir galimai turinti kuro prieigos apribojimų energijos gamybos rūšis.

### **Literatūra**

1. UAB „AF-Consult“. Alytaus regiono atliekų tvarkymo centre susidarančio kietojo atgautojo kuro (KAK) ir Alytaus miesto nuotekų valykloje susidarančio sausojo dumblo (SD) panaudojimo energijos gamybai Alytaus mieste galimybių studija. Vilnius, 2014.
2. UAB „AF-Consult“. Alytaus miesto savivaldybės šilumos ūkio specialiojo plano sprendinių keitimas (TPD reg. Nr. 00112000609). Vilnius, 2013.
3. Valstybinis strateginis atliekų tvarkymo planas 2007-2013 m. (Žin., 2007, Nr. 122-5003) ir plano projektas 2014-2020 m.
4. Lietuvos Respublikos Aplinkos ministro įsakymas Nr. D1-810, „Pramoninių ir komunalinių atliekų biologiškai skaidžios dalies atskyrimo, atsižvelgiant į energijos, pagamintos iš pramoninių ir komunalinių atliekų, atsinaujinančią dalį, metodika“ (Žin., 2012, Nr. 118-5958). Vilnius, 2012-10-04.
5. Standartas LST EN 15359:2012 „Kietasis atgautasis kuras. Techniniai reikalavimai ir klasės“. 2012-02-20.
6. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2010/75/ES dėl pramoninių teršalų išmetamų (taršos integruotos prevencijos ir kontrolės), „Informacinis dokumentas apie atliekų deginimo geriausius prieinamus gamybos būdus (GPGB)“.
7. Atliekų deginimo aplinkosauginiai reikalavimai, patvirtinti aplinkos ministro 2002 m. gruodžio 31 d. įsakymu Nr. 699 (Žin., 2003, Nr. 31-1290; 2005, Nr. 122)..

### **Use of residual derived fuel and dried sludge for heat generation in Alytus region**

#### **Summary**

The feasibility study for use of residual derived fuel (RDF) and dried sludge for heat generation in Alytus region was performed. The options of burning RDF, biomass and dried sludge for production of heat to be supplied to Alytus district heating system and electricity for national grid were analysed. Analyses were carried out from technical, legal and economical point of views. The main obstacle for commercialization of such type of a project is too high investments.

## Nuotekų dumblo Lietuvos vandenvalos sistemose savybių tyrimas

Marius Praspaliauskas, Nerijus Pedišius  
Lietuvos energetikos institutas

### Įvadas

Vandenvalos sistemose susidarančio dumblo kiekiai jau dabar kelia rimtų problemų, susijusių su jo saugojimu ir panaudojimu. Vis dėlto, labai svarbu tai, kad siekiant spręsti šias problemas yra skatinamas susidariusio nuotekų dumblo panaudojimas. Nuotekų valymo direktyvoje 91/271/EEB ir jos keitinio 98/15/EB 14 straipsnyje nurodoma, kad „dumblas, susidaręs valant nutekamuosius vandenį, jei tik įmanoma, turi būti panaudojamas“. Todėl pirmumas teikiamas nuotekų dumblo antriniam panaudojimui, o ne išvežimui į sąvartynus ar saugojimo aikšteles. Taip pat nurodoma, kad nuotekų dumblo šalinimo būdai privalo iki minimumo sumažinti aplinkai daromą neigiamą poveikį. Europos Tarybos direktyva 86/278/EEC dėl nuotekų dumblo panaudojimo žemės ūkyje reglamentuoja nuotekų dumblo panaudojimą tokiu būdu, kad būtų išvengta žalingo poveikio aplinkai.

Nuotekų valymo įrenginiuose susidaręs dumblas yra įvairių organinių ir neorganinių medžiagų mišinys, jame gausu įvairios kilmės medžiagų, mikroorganizmų. Panaudojimo galimybes, sritį ir technologijas lemia dumblo sudėtis: platus spektras organinių ir neorganinių junginių, kurie daro tiek teigiamą, tiek neigiamą poveikį aplinkai.

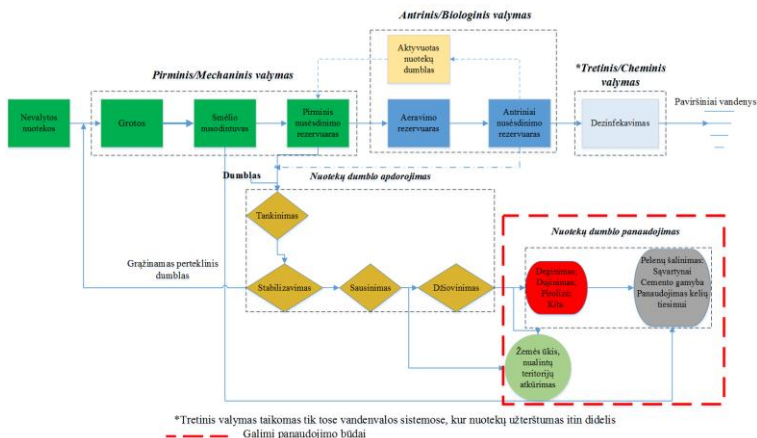
Terminiškai apdorojant dumblą iš dalies išsprendžiama nuotekų dumblo saugojimo problema, nes, pvz., jį sudeginus lieka apie 40-15 % buvusio dumblo tūrio pelenų pavidalu. Deginant, gaunama energija arba, atsižvelgus į taikomas technologijas, gaunami naudingi produktai. Tačiau dumble esantys sunkieji metalai deginant patenka į pelenus arba į aplinką su išmetamosiomis dujomis. Tai riboja pelenų naudojimą ir tenka taikyti specialias dūmų valymo priemones.

Nuotekų dumblo panaudojimas Lietuvoje verčia ieškoti tinkamiausių būdų ir priemonių jo kiekiams mažinti. Norint įvertinti esamą situaciją ir galimybes Lietuvos mastu svarbu:

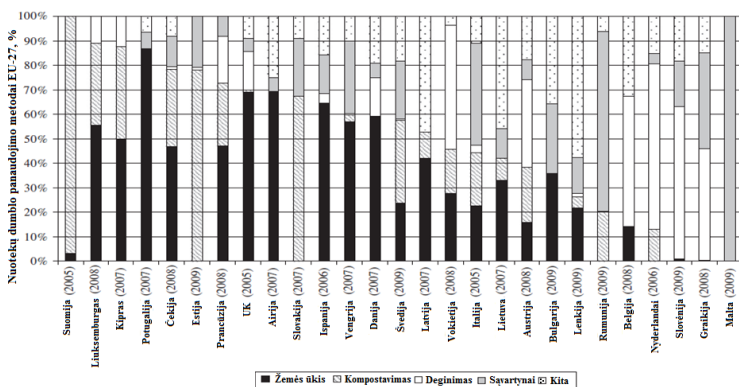
- įvertinti bendrąją padėtį ir patirtį plėtojant dumblo panaudojimo tyrimus ir technologijas Europos šalyse;
- įvertinti dumblo kiekius ir ištirti jo sudėtį bei charakteristikas įvairiose Lietuvos vandenvalos sistemose;
- įvertinti jo panaudojimo galimybes, ypač taikant terminį apdorojimą.

### Dumblo panaudojimo technologijos ES

ES šalyse (1 pav.) vienu ar kitu mastu įgyvendinamas pirminis, antrinis ir tretinis nuotekų vandens valymas, bei intensyviai plėtojamos dumblo perdirbimo ir panaudojimo technologijos (2 pav.).



1 pav. Nuotekų ir nuotekų dumбло apdorojimo technologijų schema ES (pagal [1])



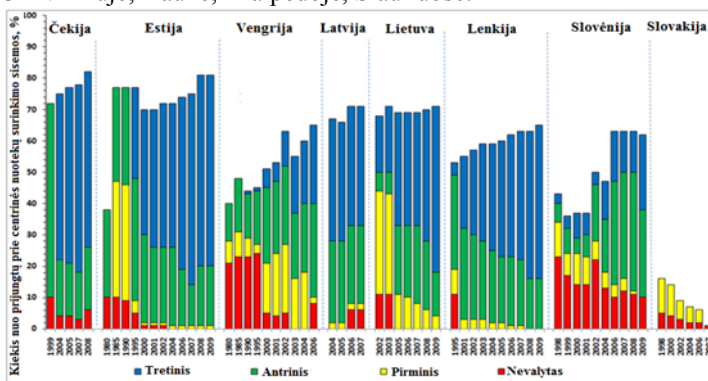
2 pav. Nuotekų dumбло panaudojimas ES [2]

2 pav. matyti, kad 2005–2009 m. pastebimai daug dumбло buvo panaudojama žemės ūkyje. Dumбло šalinimą į savartynus taikė tik nedaugelis valstybių: Bulgarija, Rumunija, Italija, Malta, Graikija ir Islandija. Maltoje, Graikijoje ir Islandijoje toks būdas taikytas beveik visam dumblui. Slovakijoje, Estijoje, Prancūzijoje, Vengrijoje, Čekijoje ir Švedijoje didžioji dalis dumбло buvo kompostuojama. Jau stebimos labai aiškios tendencijos vis daugiau nuotekų dumбло panaudoti deginimui arba alternatyviems procesams vykdyti. Čia pirmavo Nyderlandai, Šveicarija, Vokietija, Slovėnija, Belgija, ir iš dalies tokią dumбло šalinimo technologiją taikė Austrija, Prancūzija, Liuksemburgas bei Jungtinė Karalystė.

Deginant nuotekų dumblą taikomi labai griežti reikalavimai išmetimams į aplinką [3, 4, 5], tačiau vis tiek pasireiškia visuomenės nepasitenkinimas dėl padidintos oro taršos iš dumblo deginimo įrenginių. Nerimaujama dėl toksiškumu pasižyminčių sunkiųjų metalų, bei lakiųjų organinių junginių įtakos aplinkai ir žmonių sveikatai.

## 2.1. Nuotekų kiekiai ir jų tvarkymas

Lietuvoje dar 2002–2003 m. apie 12 % nuotekų buvo išleidžiamos į aplinką visiškai nevalytos ir apie 30 %, išvalytos pirminiu būdu. Antrinis ir tretinis valymas sudarė atitinkamai 6 % ir 18 % [6] ir jis buvo taikomas didžiuosiuose Lietuvos miestuose – Vilniuje, Kaune, Klaipėdoje, Šiauliuose.



3 pav. Nuotekų valymo būdai ir jų kaita Rytų Europos valstybėse [6]

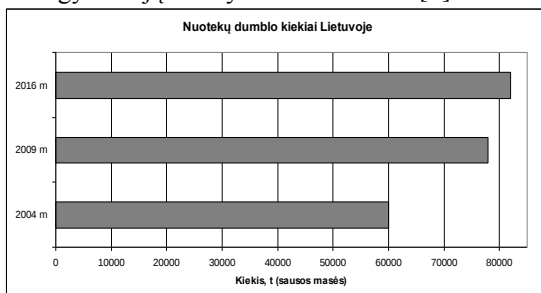
Nuo 2004 m. Lietuvoje sparčiai pradėtas gerinti nuotekų valymas. Į paviršinius vandenis nevalytų nuotekų išleidžiama labai mažai, o tretinis nuotekų valymo būdas jau 2009 m. sudarė per 50 %. Šiuo metu Lietuvoje antrinis nuotekų valymas sudaro 98 %, tretinis nuotekų valymas – 85 % (3 pav.).

Lietuvoje centralizuota nuotekų surinkimo sistema naudojasi apie 67 % visų gyventojų, nors šis rodiklis dar gerokai skiriasi miesto ir kaimo vietovėse. Jei ją naudojami 90–96 % didžiųjų miestų gyventojų, tai kaimo vietovėse tik apie 20–30 % gyventojų. Įvykdžius nuotekų valymo direktyvos tikslus iki 2018 m., Lietuvoje prie nuotekų surinkimo tinklo bus prijungta apie 95 % gyventojų, neatsižvelgiant ar tai miesto, ar kaimo vietovė.

## 2.2. Dumblo kiekiai ir jų panaudojimas

Vertinant dumblo kiekio susidarymą vadovaujantis statistikos duomenimis, šiuo metu ir perspektyvoje bent iki 2025 m., daroma prielaida, kad susidarancio nuotekų dumblo kiekiai bus tokie pat, kaip prognozuojama 2016 m., t. y. apie 82 tūkst. t/metus sauso dumblo. Ši prielaida pagrįsta prognoze, kad iki 2025 m.

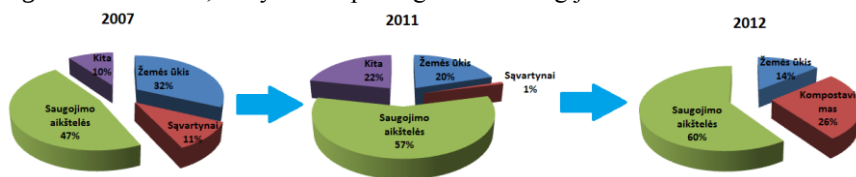
Lietuvoje pastatytos naujos pramonės įmonės su pažangia šiuolaikiška technologija neįneš pastebimos taršos, išleidžiamos į centralizuotus nuotekų tinklus, padidėjimo, o gyventojų skaičius pagal Statistikos departamento prognozę iki 2025 m. nedidės, palyginus su 2001 m. gyventojų surašymo duomenimis [7].



4 pav. Nuotekų dumblo prognozės iki 2016 m [7]

Šiuo metu didžioji susidariusio sausinto dumblo dalis laikoma didmaišiuose, uždengtose saugojimo aikštelėse. Per 5 metus kaupimo aikštelėse nuotekų dumblo kiekiai padidėjo 13 %, o sąvartynuose nuotekų dumblas nebekaupiamas, kadangi 2011 m. Lietuvoje įrengus regioninius sąvartynus, į juos buvo uždrausta vežti nuotekų dumblą. Panaudojimas žemės ūkyje taip pat sumažėjo dėl sugriežtėjusių reikalavimų dumblo kokybei.

Sumažėjusi dalis žemės ūkyje panaudojama kitais tikslais. Tačiau apskritai šiuo metu Lietuvoje susiklosčiusi situacija dėl nuotekų dumblo nėra palanki tiek aplinkosauginiu, tiek ekonominiu atžvilgiu. Didžiuliai kiekiai, apie 60 %, yra laikomi saugojimo aikštelėse ir sąvartynuose, kas reikalauja papildomų išlaidų saugumui užtikrinti. Tik dabar pradėtos svarstyti galimybės deginti dumblą atliekų deginimo katilinėse, taikyti kitas pažangias technologijas.



5 pav. Apdoroto nuotekų dumblo panaudojimo pokyčiai Lietuvoje 2007–2012 m. [8, 9, 10]

### 3.1 Dumblo savybės ir jo sudėtis

Tyrimams nuotekų dumblo mėginiai buvo surinkti iš septynių vandenvals sistemų, įrengtų Vilniaus, Kauno, Klaipėdos, Šiaulių, Panevėžio, Alytaus ir Šilutės miestuose, 2013 m. turėjusiuose atitinkamai 528; 307; 159; 107; 97; 57 ir 17 tūkst. gyventojų. Reikia pastebėti, kad pasirinktose vietose dumblas taip pat apdorojamas

skirtingais metodais: Vilniaus, Šiaulių ir Šilutės sistemose nuotekų dumbblas yra anaerobiškai dujintas ir išdžiovinintas; Kauno, Klaipėdos ir Panevėžio sistemose – tik anaerobiškai dujintas ir nusaustintas; Alytaus sistemoje – tik nusaustintas.

Tipiškos džiovinto ir dujinto, sausinto ir dujinto ir tik sausinto dumblo charakteristikos tirtose vandenvalos sistemose pateiktos 2 lentelėje.

1 lentelė. Sauso nuotekų dumblo charakteristikos Lietuvos vandenvalos sistemose

| Parametras                    | Anaerobiškai pūdytas ir džiovintas |          |        | Anaerobiškai pūdytas ir sausintas |          |           | Sausin-tas |
|-------------------------------|------------------------------------|----------|--------|-----------------------------------|----------|-----------|------------|
|                               | Vilnius                            | Šiauliai | Šilutė | Kaunas                            | Klaipėda | Panevėžys | Alytus     |
| Drėgmė, %                     | 2,23                               | 9,2      | 2,91   | 80,42                             | 74       | 88,37     | 88,47      |
| Peleningumas, %               | 41,02                              | 38,49    | 30,27  | 38,27                             | 37,97    | 22,12     | 21,60      |
| Lakūs organiniai junginiai, % | 47                                 | 49,51    | 51,02  | 49,51                             | 48,86    | 64        | 67,3       |
| Fiksuota anglis, %            | 11,98                              | 12       | 18,71  | 12,22                             | 13,17    | 13,18     | 11,1       |
| Anglis, %                     | 36,97                              | 37,04    | 39,76  | 34,31                             | 35,39    | 43,57     | 46,56      |
| Vandenilis, %                 | 4,59                               | 4,49     | 5,11   | 4,59                              | 4,82     | 6,00      | 6,52       |
| Deguonis, %                   | 11,65                              | 12,72    | 17,36  | 16,51                             | 15,99    | 19,53     | 18,49      |
| Azotas, %                     | 4,74                               | 5,36     | 5,83   | 4,98                              | 4,35     | 7,24      | 5,65       |
| Siera, %                      | 0,99                               | 1,83     | 1,53   | 1,33                              | 1,43     | 1,38      | 1,09       |
| Chloras, %                    | 0,04                               | 0,07     | 0,14   | 0,07                              | 0,05     | 0,16      | 0,09       |
| HHV, MJ/kg                    | 15,66                              | 16,01    | 17,28  | 14,81                             | 15,27    | 19,64     | 21,55      |

Iš lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad taikant anaerobinį pūdymą, tam tikrus dumblo įvairiose sistemose charakteristikų skirtumus lėmė ne tik vandenvalos nuotekų sudėtis, bet ir taikytas dumblo apdorojimo būdas. Dumblo peleningumas didesnis tuose miestuose, kur didesnis gyventojų skaičius ir daugiau pramonės, kaip Vilnius, Šiauliai, Kaunas ir Klaipėda. Šiuose miestuose, nežiūrint ar buvo taikomas papildomai džiovinimas ar nusaustinimas, visų parametų vertės yra labai artimos. Didžiausi jų nuokrypiai nuo vidutinių reikšmių 38,94 % peleningumui, 48,72 % lakiosioms medžiagoms ir 35,93 % angliai sudaro mažiau nei  $\pm 5\%$ . Mažo miesto, kaip Šilutė, dumble yra pastebimai daugiau anglies ir lakiųjų medžiagų, ir mažiau pelenų.

Nepūdant nuotekų dumblo (Alytus), smarkiai padidėja anglies ir lakiųjų medžiagų kiekiai bei sumažėja peleningumas. Panevėžio nuotekų sistemos dumblo parametrai mažai skiriasi, nors ir vykdomas anaerobinis pūdyimas, bet matyt nepakankamai efektyviai. Taigi, pagal šių 2 atvejų vidurkius, matyti, kad palyginus su didžiaisiais miestais dumble anglies padidėja nuo 35,93 % iki 45,06 %, t. y. 25 %; lakiųjų medžiagų nuo 48,72 % iki 65,65 % t. y. 35 % ir peleningumas sumažėja nuo 38,94 % iki 21,86 %, t. y. 44 %. Šie pokyčiai visiškai atitinka dumble esančio vandenilio, deguonies ir šilumingumo verčių pokyčius.

Galima teigti, kad šiluminius dumblo parametų skirtumus lemia gyventojų skaičius ir pramonės išvystymo laipsnis mieste, bet didžiausios įtakos turi taikoma dumblo apdorojimo technologija.

### 3.2 Sunkiųjų metalų koncentracijos nuotekų dumble

Atlikti tyrimai parodė, kad dumblo sudėtis, metalų ir mineralų koncentracijos nedaug tesiskiria nuo labiau industriškai išsivysčiusių šalių, kaip Vokietija ar Italija [11]. 3 lentelėje pateiktos didžiausios nustatytos metalų koncentracijos nuotekų dumble.

2 lentelė. Didžiausios sunkiųjų metalų koncentracijos (mg/kg sausos masės) Lietuvos miestų nuotekų dumble 2008-2013 m.

|                  | Pb     | Cd   | Cr      | Cu      | Ni     | Zn       | Hg    |
|------------------|--------|------|---------|---------|--------|----------|-------|
| <b>Vilnius</b>   | 66,18  | 5,1  | 105,25  | 339,4   | 64,64  | 1437,45  | 0,99  |
| <b>Šiauliai</b>  | *36,82 | -    | *811,31 | *247,85 | *51,08 | *1543,69 | -     |
| <b>Šilutė</b>    | 30,18  | 1,05 | 57,11   | 116,01  | 27,78  | 714,60   | 0,96  |
| <b>Kaunas</b>    | 124    | 19,4 | 280     | 278,027 | 70     | 1419     | 1,955 |
| <b>Klaipėda</b>  | *32,2  | -    | *118,7  | *346,29 | *35,06 | *1088,89 | -     |
| <b>Panevėžys</b> | 24,09  | 1,29 | 84,53   | 183,02  | 29,18  | 810,5    | 0,86  |
| <b>Alytus</b>    | 70,0   | 2,3  | 28,5    | 132,2   | 22,4   | 937,4    | 0,64  |

\*- 2013m. tyrimo rezultatai

Iš lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad visų metalų koncentracijos didžiųjų miestų nuotekų dumble yra didesnės nei mažųjų miestų. Į tai turi būti atsižvelgiama pasirenkant dumblo terminio apdorojimo ir emisijų mažinimo technologijas.

ES valstybės narės savo nuožiūra gali taikyti griežtesnius apribojimus, nei juos nustato direktyva 86/278/EEB. Iš 27 ES šalių, griežtesnius reikalavimus sunkiesiems metalams nuotekų dumble yra nustačiusios net 16 šalių (63 %), griežtesnės sunkiųjų metalų koncentracijų ribinės vertės dirvožemyje nustatytos 10 iš 27 šalių (37 %) [2]. Valstybės narės, esančios panašioje geografinėje padėtyje, nusistato skirtingas ribines vertes, pvz., Šiaurės ir Baltijos šalyse. Griežčiausius apribojimus sunkiųjų metalų koncentracijoms turi Šiaurės šalys (Suomija, Švedija, Danija). Prancūzijoje, Maltoje, Slovėnijoje ir Viduržemio jūros regiono šalyse priimtos ribinės vertės yra tokios pat kaip ir ES direktyvoje [12].

### 3.3 Pelenų lydymosi charakteristikos

Tiriant Lietuvos vandenvals sistemų dumblo pelenus buvo nustatytos būdingosios pelenų lydymosi temperatūros, kurių nustatymo metodiką ir kriterijus reglamentuoja norminiai dokumentai (7 pav.): susitraukimo temperatūra (ST), kurioje mažėja paruošto pelenų bandinio matmenys ir bandinio plotas nesiekia 95 % bandinio ploto, esant 550° C; pradinės deformacijos temperatūra (DT), kurioje pradeda apvalėti paruošto pelenų bandinio kampai; pusrutulio temperatūra (HT), kurioje bandinys įgauna pusrutulio formą ir jo aukštis tampa lygus pusei pagrindo skersmens; lydymosi temperatūra (FT), kurioje pelenai lydosi suskystėja ir pasiskirsto ant plokštelės taip, kad sluoksnio aukštis lygus pusei bandinio aukščio esant HT [13].

3 lentelė. Būdingosios pelenų lydymosi temperatūros

|                  | Pelenų lydymosi charakteristikos, °C |      |      |      |
|------------------|--------------------------------------|------|------|------|
|                  | DT                                   | ST   | HT   | FT   |
| <b>Alytus</b>    | 1074                                 | 1194 | 1239 | 1256 |
| <b>Kaunas</b>    | 1102                                 | 1165 | 1222 | 1244 |
| <b>Vilnius</b>   | 1145                                 | 1192 | 1243 | 1277 |
| <b>Šiauliai</b>  | 1128                                 | 1174 | 1269 | 1293 |
| <b>Panevėžys</b> | 1008                                 | 1110 | 1187 | 1212 |
| <b>Šilutė</b>    | 1045                                 | 1125 | 1248 | 1262 |
| <b>Klaipėda</b>  | 1157                                 | 1233 | 1261 | 1270 |

Nustatyta, jog esant susitraukimui, temperatūros kitimo diapazonas yra plačiausias ir kinta nuo 1010°C iki 1160°C. Kylant temperatūrai skirtumai tarp būdingųjų temperatūrų verčių mažėja: DT – kinta nuo 1110°C iki 1236°C, HT – nuo 1190°C iki 1270°C, FT – nuo 1212°C iki 1290°C.

### Išvados

1. Didžiosiose Lietuvos vandenvalos sistemose visuotinai taikomos šiuolaikiškos nuotekų valymo sistemos, analogiškos ES šalių valymo sistemoms. Plačiai taikomas anaerobinis nuotekų dumblo apdorojimas išgaunant biogujas, dumblui sausinti naudojamos centrifugos ir juostiniai džiovintuvai, galiausiai dumblas džiovinamas.
2. Vadovaujantis statistikos duomenimis, šiuo metu ir perspektyvoje bent iki 2025 m., sauso dumblo kiekiai sieks iki 82 tūkst. t/metus. Ši prielaida pagrįsta prognoze, kad iki 2025 m. Lietuvoje įsteigtos naujos pramonės įmonės, taikančios pažangias šiuolaikiškas technologijas, smarkiai napadidins taršos, išleidžiamos į centralizuotus nuotekų tinklus, o gyventojų skaičius pagal Statistikos departamento prognozę iki 2025 m., nedidės.
3. Atlikti tyrimai rodo, kad dumblo sudėtis ir metalų bei mineralų koncentracijos nedaug tesiskiria nuo ES šalių vidurkio. Aiškiai matyti, kad didžiųjų miestų nuotekų dumble visų metalų koncentracijos yra didesnės, nei mažųjų miestų vandenvalos sistemose.

### Literatūra

1. Helmut Kroiss, Helmut Rechberger and Lukas Egle (2011). Phosphorus in Water Quality and Waste Management, Integrated Waste Management – Volume II. <http://www.intechopen.com/books/integrated-waste-management-volume-ii/phosphorus-in-water-quality-and-waste-management>
2. Kelessidis A. and Stasinakis A. S. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management* 32: 1186–1195, 2012.

3. CEC (Council of the European Communities), 2001. Commission decision of 16 January 2001 amending Decision 2000/532/EC as regards the list of wastes (2001/118/EC). *Official Journal of the European Communities* No. L 47/1-31.
4. EC (European Commission), 2008. Directive 2008/98/EC of the European parliament and the council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. *Official Journal of the European Union*. 312, 3.
5. Pokorna E, Postelmans N, Jenicek P, Schreurs S, Carleer R, Yperman J. Study of bio-oils and solids from flash pyrolysis of sewage sludges. *Fuel* 88: 1344–1350, 2009.
6. European Environmental Agency:  
<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/urban-waste-water-treatment/urban-waste-water-treatment-assessment-3>
7. Investicinė programa Lietuvoje 2006:  
[http://www.taurage.lt/taurage/m/m\\_files/wfiles/file508.pdf](http://www.taurage.lt/taurage/m/m_files/wfiles/file508.pdf)
8. [http://gamta.lt/files/Nuoteku\\_ir\\_nuoteku\\_dumblo\\_tvarkymas\\_Lietuvoje\\_2007\\_m.pdf](http://gamta.lt/files/Nuoteku_ir_nuoteku_dumblo_tvarkymas_Lietuvoje_2007_m.pdf)
9. <http://gamta.lt/files/2012%20visuomenes%20informavimo%20ataskaita.pdf>
10. <http://gamta.lt/files/2014%20visuomenes%20informavimo%20ataskaita.pdf>
11. Benedikt Nowak, Philipp Aschenbrenner, Franz Winter. Heavy metal removal from sewage sludge ash and municipal solid waste fly ash — A comparison. *Fuel Processing Technology* 105: 195-201, 2013.
12. European Communities. 2001. Disposal and recycling routes for sewage sludge. *Part 2 – Regulatory report*. ISBN 92-894-1799-4.
13. Gregory Dunnu, Jörg Maier, Günter Scheffknecht. Ash fusibility and compositional data of solid recovered fuels. *Fuel* 89: 1534–1540, 2010.

## **Sewage sludge characterization of Lithuanian wastewater treatment plants**

### **Summary**

In relation with the growing population in the world and rapid industrial development, environmental pollution increased close to dangerous levels, including wastewater (sewage) collection and treatment systems. Wastewater treatment sludge resulting from the effective management of global challenges requires increased attention. It is a global problem that the EU addressed in light of the national legislation and thus the general directives and indicators. Lithuania has started a rapid development of wastewater treatment by applying contemporary technologies used in other European countries. According to statistical data, till 2016 amounts of the accumulated sewage sludge will reach 82,000 t/year of dry sludge.

## **Sausinto vandenvalos nuotėkų dumblo terminio skaidymo technologija ir jos taikymas energijai gaminti**

Nerijus Striūgas, Kęstutis Zakarauskas, Saulius Skačkauskas  
Lietuvos energetikos institutas

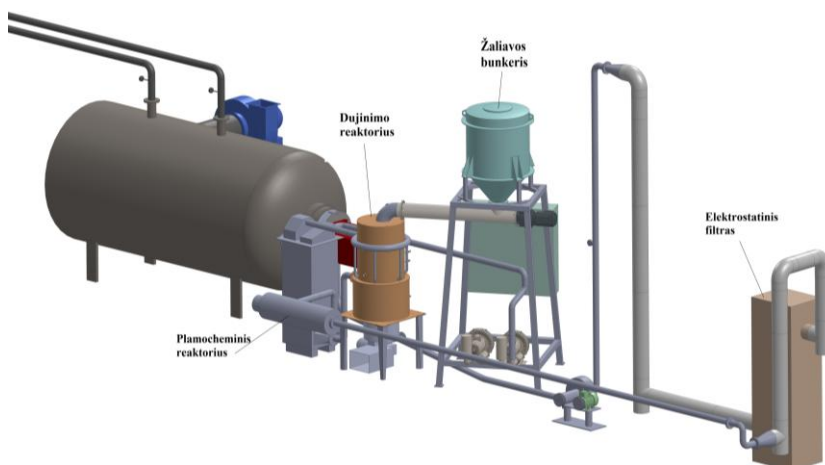
Plečiantis nuotekų surinkimo ir valdymo infrastruktūrai, proporcingai daugėja ir nuotekų valymo metu susidarančio dumblo. Saugojimo aikštelėse sukaupta daug dumblo ir jų tvarkymas iki šiol taikomais metodais nebegali išspręsti visų išskylančių problemų, todėl ieškoma efektyviausių būdų nuotekų dumblui apdoroti. Viena perspektyviausių dumblo utilizavimo technologijų yra jo dujinimas. Taikant šią technologiją, dumblo terminio skaidymo metu išsiskiria vertingas produktas – degiosios dujos, kurios gali būti panaudojamos šilumai ir elektrai gaminti.

Atsižvelgiant į tai, kad dumblo dujinimas yra viena perspektyviausių jo utilizavimo technologijų, Europos Socialinio fondo agentūra pritarė grupės Lietuvos energetikos instituto mokslininkų inicijuotam projektui „Inovatyvios terminio skaidymo technologijos sukūrimas ir pritaikymas vandenvalos nuotekų dumblo utilizavimui (INODUMTECH)“. Projektas pradėtas 2013 m. ir skirtas 2,26 mln. Lt. ES finansavimas. Projekto pabaiga 2015 m. Šio projekto dalyviai yra Lietuvos energetikos instituto (LEI) Degimo procesų, Plazminių technologijų, Branduolinės inžinerijos, Šiluminių įrengimų tyrimų ir bandymų laboratorijų mokslininkai.

Projektas tiesiogiai siejasi su atliekų utilizavimu, atsinaujinančių energijos išteklių naudojimo plėtra ir ES pagrindiniais energetikos ir aplinkosaugos politikos tikslais – mažinti atliekų susidarymą, didinti energijos tiekimo saugą, sumažinti oro taršą bei šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas, sustiprinti gaminamos produkcijos konkurencingumą, teikti gyventojams socialinę paramą bei užtikrinti užimtumą.

Pirmaisiais veiklos metais LEI darbuotojai sukūrė 100 kW galios eksperimentinį laboratorinį įrenginį, kurio pagrindinės dalys – dujinimo reaktorius, (dumblas ir jo mišiniai skaidomi 800–1000 °C temperatūroje), plazminė dujų apdorojimo įranga su pagalbinėmis sistemomis bei elektrostatinis kietųjų dalelių šalinimo filtras (žr. 1 pav.). Įrenginio techninės specifikacijos pateikiamos 1 lentelėje.

Atlikti dumblo ir jo mišinio su mediena terminio skaidymo eksperimentiniai tyrimai. Tuo tikslu imti dumblo mėginiai iš įvairių Lietuvoje esančių nuotekų dumblo tvarkymo įmonių. Mėginiai surūšiuoti ir atlikti laboratoriniai fizikinių, cheminių ir terminių savybių tyrimai. Dumblo mėginiuose buvo ištirti ir nustatyti pagrindiniai dumblo sudėtyje elementų C, H, S, N, O, Cl kiekiai, bei cheminių



1 pav. Sausinto vandenvals nuotėkų dumblo dujinimo įrenginio schema ir nuotrauka

1 lentelė. Dujinimo įrenginio techninės charakteristikos

|    | Charakteristika              | Matavimo vnt.     | Vertės    |
|----|------------------------------|-------------------|-----------|
| 1. | Gaunamų dujų nominali galia  | kW                | 80        |
| 2. | Gaunamų dujų kaloringumas    | MJ/m <sup>3</sup> | 3,8 - 5,0 |
| 3. | Gaunamų dujų kiekis          | m <sup>3</sup> /h | 80        |
| 4. | Oro pertekliaus koeficientas | -                 | 0,3-0,4   |
| 5. | Degimo kameros temperatūra   | °C                | 800       |
| 6. | Žaliavos kiekis              | kg/h              | 20        |
| 7. | Plazminio įrenginio galia    | kW                | 35        |

elementų – Sb, As, V, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, Cd, TI, Hg, Al, Ca, Fe, Mg, K, Si, Na, P, Zn – koncentracijos. Šie tyrimai parodė, kad dumblo sudėtis ir metalų bei mineralų koncentracijos nedaug tesiskiria nuo labiau už Lietuvą išsivysčiusių šalių (Vokietijos, Italijos ir kt.).

Siekiant nustatyti kuro drėgmės, peleningumo, pelenų lydumo ir lakiųjų medžiagų išsiskyrimo dėsningumus bei kuro sudėties įtaką kuro peleningumo vertinimams buvo atlikti dumblo ir medienos mišinių terminio skaidymosi tyrimai. Šiems tyrimams paruošti kuro mišiniai ir jie dujinami eksperimentiniame įrenginyje. Kuro analizė atlikta naudojant IKA C5000 kalorimetrą ir „Flash 2000“ analizatorių bei vadovaujantis standartais (EN 14918:2009, CEN/TS 15104:2005, EN 14775:2009 ir EN 14774-1:2009). Tyrimuose naudotų dumblo ir pjuvenų granulių sudėtis pateikta 2 lentelėje.

2 lentelė. Tyrimuose naudota dumblo ir pjuvenų granulių sudėtis

| Nr. | Parametras                           | Vienetai | Dumblo ir pjuvenų granulių masės santykis                                         |                                                                                    |         |
|-----|--------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------|
|     |                                      |          | 2,3 : 1                                                                           | 1 : 1                                                                              | 1 : 2,3 |
| 1.  | Drėgmės kiekis (%)                   | %        | 4,4                                                                               | 4,0 / 5,2                                                                          |         |
| 2.  | Kuro viršutinis šilumingumas (kJ/kg) | MJ/kg    | 17,8                                                                              | 17,3 / 19,0                                                                        |         |
| 3.  | Peleningumas (%)                     | %        | 21,8                                                                              | 31,0 / 0,4                                                                         |         |
| 4.  | Lakiųjų medžiagų kiekis              | %        | 59,5                                                                              | 51,1 / 79,2                                                                        |         |
| 5.  | Nelakiosios anglies kiekis           | %        | 14,3                                                                              | 13,9 / 15,2                                                                        |         |
| 6.  | Anglies (C) kiekis (sausai masei)    | %        | 41,08                                                                             | 40,05 / 49,20                                                                      |         |
| 7.  | Vandenilio (H) kiekis (sausai masei) | %        | 5,51                                                                              | 5,15 / 6,20                                                                        |         |
| 8.  | Degunies (O) kiekis (sausai masei)   | %        | 16,4                                                                              | 16,40 / 44,06                                                                      |         |
| 9.  | Azoto (N) kiekis (sausai masei)      | %        | 3,77                                                                              | 5,85 / 0,08                                                                        |         |
| 10. | Sieros (S) kiekis (sausai masei)     | %        | 0,94                                                                              | 1,55 / 0,06                                                                        |         |
| 11. | Dydis                                | mm       | 8                                                                                 | 3-10 / 8                                                                           |         |
| 12. | Mišinio vaizdas                      |          |  |  |         |

Mėginuose gauti dervų junginiai identifikuojami „Agilent 7890A“ dujų chromatografu su „Agilent 5975C“, dervų koncentracija mėginuose nustatyta „Varian GC-3800“ dujų chromatografu su liepsnos jonizacijos detektoriumi. Dujinių mėginių analizė atlikta „Agilent 7890A“ dujų chromatografu su dviejų kanalų šilumos laidumo detektoriais. Siekiant sumažinti metodo paklaidą, atliktos kelios to paties mėginio chromatogramos. Dervų ir dujinių produktų koncentracija apskaičiuota pagal trijų matavimų rezultatų vidurkį su ne daugiau 10 % neapibrėžtumu.

Naudojant 2 lentelėje nurodytus mišinius, atlikti eksperimentiniai dujinimo tyrimai. Pagrindinių tyrimo rezultatų suvestinė pateikta 3 lentelėje. Kaip matyti iš rezultatų lentelės, granuliuoto mišinio atveju nustatyta didžiausia dujų išeiga, 3,11 Nm<sup>3</sup> iš 1 kilogramo žaliavos. Naudojant kitus dumblo ir pjuvenų granulių mišinius, dujų išeiga buvo mažesnė. Pagrindinės mažesnio dujų kiekio susidarymo priežastys yra mažesnis oro pertekliaus koeficientas bei dujinimo reakcijos temperatūra. Kuo mažesnis oro pertekliaus koeficientas, tuo mažesnė dujinimo

reakcijos temperatūra. Taigi, sumažėjus temperatūrai, po dujinimo proceso susidaro didesnis pelenų/kokso likutis ir didesnis skystųjų reakcijos produktų (dervų) kiekis, kas ir lemia mažesnių dujų kiekį.

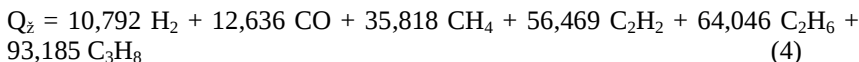
3 lentelė. Nuotėkų dumblo ir pjuvenų granulių dujinimo tyrimų rezultatai

| Parametrai                                    | Dumblo ir pjuvenų granulių masės santykis |       |         |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|-------|---------|
|                                               | 2,3 : 1                                   | 1 : 1 | 1 : 2,3 |
| Kuro kiekis, kg/h                             | 28                                        | 50    | 19      |
| Oro kiekis, kg/h                              | 49                                        | 57    | 32,6    |
| Oro pertekliaus koeficientas (ER)             | 0,39                                      | 0,24  | 0,37    |
| Dujų kiekis, Nm <sup>3</sup> /h               | 87                                        | 113   | 55      |
| Dujų išeiga, Nm <sup>3</sup> /kg              | 3,11                                      | 2,26  | 2,89    |
| Vidutinė dujų sudėtis, tūrio. %:              |                                           |       |         |
| H <sub>2</sub>                                | 14                                        | 10,4  | 13,51   |
| CO                                            | 16,4                                      | 19,0  | 19,7    |
| CH <sub>4</sub>                               | 1,05                                      | 7,1   | 1,38    |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>                 | 0,06                                      | 0,1   | 0,038   |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>                 | 0,05                                      | 0,08  | 0,043   |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>                 | 0,02                                      | 0,06  | -       |
| CO <sub>2</sub>                               | 9,2                                       | 10,1  | 11,37   |
| N <sub>2</sub>                                | 59,22                                     | 53,1  | 49,7    |
| Žemutinis dujų kalingumas, MJ/Nm <sup>3</sup> | 4,04                                      | 6,23  | 4,45    |
| Pelenų kiekis, kg/h                           | 4                                         | 5     | 7       |
| Anglies kiekis pelenuose, masės%              | 34,9                                      | 42,7  | 68,4    |
| Dervos, g/Nm <sup>3</sup>                     | 1,24                                      | 2,15  | 2,03    |

Analizuojant susidariusių dujų sudėtį, nustatyta, kad pagrindinių dujas sudarančių komponentų vandenilio (H<sub>2</sub>) ir anglies monoksido (CO) koncentracijos dujinuose produktuose nežymiai varijuoja ribose nuo 10 iki 14 tūrio proc. H<sub>2</sub> bei 16–19,4 CO. Pastebėtina, kad dujinant dumblo ir medžio pjuvenų granulių mišinį, kurių masės santykis lygus 1:1, nustatyta didžiausia metano (CH<sub>4</sub>) dujų koncentracija dujinuose produktuose, lygi 7,1 % tūrio. Manoma, kad didelę metano išeigą lėmė metanacijos reakcijos, vykstančios per kompleksinę reakcijų mechanizmą [1]:



Susidarius papildomam metano kiekiui, padidėja bendras dujų žemutinis kalingumas (4) nuo 4,04 – 4,45 iki 6,23 MJ/Nm<sup>3</sup>.



Kaip matyti iš 3 lentelėje pateiktų duomenų, iš dujinimo reaktoriaus išeinančios dujos, prieš tiekiant į vidaus degimo variklius ar turbinas, papildomai turi būti išvalytos nuo dervų, kietųjų dalelių ar pavojingų chloro organinių junginių. Siekiant užtikrinti minimalias pavojingų teršalų emisijas, kuriamoje technologijoje įdiegtas plazmocheminis reaktorius. Plazmocheminiame reaktoriuje sukurama aukštos temperatūros oro srauto plazma. Iš dujinimo reaktoriaus patekusios dujos į plazmocheminį reaktorių iš dalies sudeginamos, o išsiskyrusi šiluma, šalia plazmos šiluminės energijos, papildomai sunaudojama dujose esantiems likutiniams angliavandeniliams skaidyti. Vidutinė temperatūra reaktoriuje siekia 1100–1200 °C. Generatorinių dujų mišinio greitis reaktoriuje bandymo metu, atsižvelgiant į bandymo sąlygas, siekia 0,4–0,6 Nm/s. Reaktoriaus ilgis 1,5 m. Taigi, terminis dujinių produktų apdorojimas reaktoriuje trunka nuo 0,7 iki 0,46 sekundės. Eksperimentinio plazmocheminio įrenginio aukštesniųjų angliavandenilių visiškai konversijai neužtenka. Nustatyta, kad dervų kiekis už šio įrenginio sumažėja nuo pradinės koncentracijos 2,03 iki 0,08 g/Nm<sup>3</sup>, t. y. konversijos efektyvumas siekia tik 96 %.

Siekiant įvertinti vandenvalos nuotėkų dumblo dujinimo metu galimą chloro organinių junginių susidarymą, atlikti heksachlorbenzeno (HCB) dujiniuose mėginiuose tyrimai. Stacionaraus dujinimo režimo metu HCB junginio aptikti nepavyko. Tačiau pereinamojo dujinimo režimo metu, šio junginio koncentracija už plazmocheminio reaktoriaus siekė 91,7 μg/Nm<sup>3</sup>. Tad galima teigti, kad eksperimentinių įrenginių parametrai yra tinkami apdoroti nuotėkų dumblą, tačiau siekiant išvengti ir užtikrinti pereinamaisiais proceso režimais gamtosauginius rodiklius, sukurtoje technologijoje būtina papildomai įdiegti „rūgščių“ dujų, dioksinų, lakiųjų metalų ir pan. junginių absorbavimo įrenginius.

Atlikus technologinio įrenginio energijos srautų ir masių balansą, nustatyta, kad didžiausias šaltų dujų efektyvumas 81 % už dujinimo reaktoriaus buvo pasiektas naudojant nuotėkų dumblo/medienos pjuvenų granules santykiu 1:1, mažiausias dujų efektyvumas 75,1–75,4 % likusių kitų dviejų mišinių atveju. Karštų dujų efektyvumas didesnis nuo 6,6 iki 10,9 %. Bendras sukurtos dujinimo technologijos naudingo veiksmo koeficientas lygus 69.

### Išvados

1. Sukurtas sausinto vandenvalos dumblo dujinimo technologijos maketas ir atliktais dujinimo tyrimais nustatyta, kad išvalytos nuo teršalų generatorinės dujos gali būti naudojamos dumblo džiovinimo technologijoje kaip alternatyvus kuras gamtinėms dujoms;
2. Vidutinė generatorinių dujų išeiga ~2,7 Nm<sup>3</sup>/kg, kalingumas 4–4,5 MJ/Nm<sup>3</sup>;
3. Šiuo tyrimo etapu optimizuoto dujinimo proceso metu susidaro ~10 masės % kokso, kuriame yra ~ 68 % masės anglies. Būtinai papildomas anglies išdeginimas;

4. Sukurto dujinimo technologijos naudingumo koeficientas siekia 69 %.
5. Vadovaujantis geriausiai prieinamais gamybos būdais (GPGB), atliekų deginimo technologijomis ir siekiant užtikrinti gamtosauginius rodiklius sukurtoje technologijoje, būtina papildomai įdiegti „rūgščių“ dujų, dioksinų, lakiųjų metalų ir pan. junginių absorbavimo įrenginius, optimizuoti degimo procesą, siekiant išvengti didelių NO<sub>x</sub> koncentracijų, arba statyti šių dujų mažinimo įrenginius.

### Literatūra

1. Striūgas N., Zakarauskas K., Džiugys A., Navakas R., Paulauskas R. An evaluation of performance of automatically operated multi-fuel downdraft gasifier for energy production. *Applied Thermal Engineering*. 2014. ISSN 1359-4311. Vol. 73, Issue 1, p. 1149–1157

### **Technology for thermal treatment of dried sewage sludge and its use for energy production**

#### Summary

Since the water treatment infrastructure is increasing, amount of produced sewage sludge proportionally increases. Therefore, effective processes for utilization of obtained waste are needed. One of the most promising ways of utilizing sewage sludge is gasification. During this process, the low calorific gas is produced, which could be further used for heat production in the sludge dryers or for power production in the IC engines or micro-turbines. The group of scientists from Lithuanian Energy Institute, during the implementation of EU Structural Funds project “Development of innovative thermal decomposition technology and its application for utilization of sewage sludge” (INODUMTECH), developed a new technology for thermal treatment of sewage sludge based on principle of gasification. This paper presents the results and analysis of investigation of gasification process adapted for various mixtures of dried sewage sludge and pelletized biomass.

## Elektrostatinio filtro panaudojimo galimybės sintetinėms dujoms išvalyti

Robertas Poškas, Arūnas Sirvydas  
Lietuvos energetikos institutas

**Įvadas.** Nuotekų dumblo tvarkymas ir panaudojimas – daugeliui savivaldybių aktuali problema. Jau seniai kalbama apie dumblo naudojimo žemės ūkyje galimybes, tačiau retas ūkininkas savo laukus tręšia šia organine medžiaga (daugeliui žemdirbių tręšimas dumblu pirmiausia asocijuojasi su nemaloniu kvapu), o vandenvals įmonės nežino kur dėti išdžiovintą, kompostuotą ar kitaip paruoštą nuotekų dumblą [1].

Antrinio dumblo naudojimas žemės ūkyje yra labai išplėtotas tokiose Vakarų šalyse kaip JAV, Belgija, Vokietija, Austrija. Šiose šalyse dumblo naudojimas dirvožemiui gerinti tiksliai reglamentuotas, nustatytos dumblo įterpimo į dirvožemį metodikos. Lietuvoje toks dumblo panaudojimo būdas nereglamentuotas. Dažnai organinių atliekų įterpimą į dirvą reglamentuoja aplinkosauginiai teisės dokumentai ar įvairios taisyklės. Organinių atliekų tiesioginio įterpimo į dirvą (ar paskleidimo paviršiuje) draudimai ir apribojimai dažniausiai susiję su potencialiu infekcijų pavojumi ar galimu kenksmingų medžiagų pasklidimu aplinkoje (pvz., sunkieji metalai, organiniai mikroteršalai ir t. t.). Taip pat turi būti reguliuojamas į aplinką per dirvą patenkančių tokių makroelementų, kaip azotas ir fosforas, bendras kiekis. Nesilaikant reikalavimų visos šios medžiagos gali užteršti dirvožemį, gruntinius ar paviršinius vandenis [2].

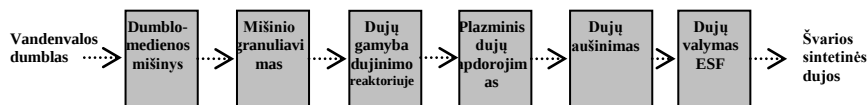
Kita alternatyva antriniam dumbliui panaudoti – jo terminė destrukcija (deginimas, pirolizė, dujinimas). Šių termocheminių procesų metu dumbblas utilizuojamas aukštoje temperatūroje. Gautus produktus (karštus dūmus, generatorines dujas, pirolizės skysčius ir angis) galima panaudoti įvairioms reikmėms – šildymui, technologiniam procesui, elektrai ar chemikalams gaminti.

Šiame straipsnyje apžvelgiama inovatyvi terminio skaidymo technologija, sukurta vandenvals nuotekų dumbliui utilizuoti. Sukurta technologinė linija, susidedanti iš kelių pagrindinių įrenginių: dujinimo ir plazmocheminio nukenksminimo reaktoriaus bei elektrostatinio filtro. Pastarojo veikimas ir svarba valant terminio skaidymo būdu gautas sintetines dujas šiame straipsnyje yra išsamiai analizuojami.

**Eksperimentinių tyrimų metodika.** Lietuvos energetikos instituto mokslininkai sukūrė inovatyvaus terminio skaidymo technologiją ir pritaikė ją vandenvals nuotekų dumbliui utilizuoti (1 pav.).

Paruoštas kuras (dumblo (30 %) ir medienos granulių (70 %) mišinys) sraigtiniu transporteriu tiekiamas į dujinimo įrenginį, kuriame 800–1000°C

temperatūroje organiniai komponentai virsta iš dalies oksiduotomis generatorinėmis dujomis, o neorganinės kilmės medžiagos pašalinamos su likutiniais pelenais.



1 pav. Principinė inovatyvios terminio skaidymo technologijos schema

Nuotėkų dumble esantys įvairūs teršalai ir pavojingos medžiagos neutralizuojamos naudojant plazmocheminį reaktorių. Plazmos srautas susimaišo su generatorinių dujų srautu, pakyla temperatūra iki 2000 °C, ir esantys teršalai neutralizuojami aktyvioje plazminėje aplinkoje. Plazmos šaltiniu naudotas 50–100 kW galios dvikamerinis linijinis atmosferinio slėgio plazmos generatorius su karštu katodu ir laiptuotu anodu. Apdorotos dujos, ištekęsios iš plazmocheminio reaktoriaus, aušinamos ir galutiniam apdorojimui patenka į elektrostatinį filtrą, kuriame išvalomos nuo kietųjų dalelių. Elektrostatiniai filtrai plačiai taikomi įvairios galios katilinėse, kadangi jais gana efektyviai galima sugaudyti kietąsias daleles.

Šiame darbe nagrinėtas Lietuvos energetikos institute suprojektuotas ir pagamintas elektrostatinis filtras (2 pav.).

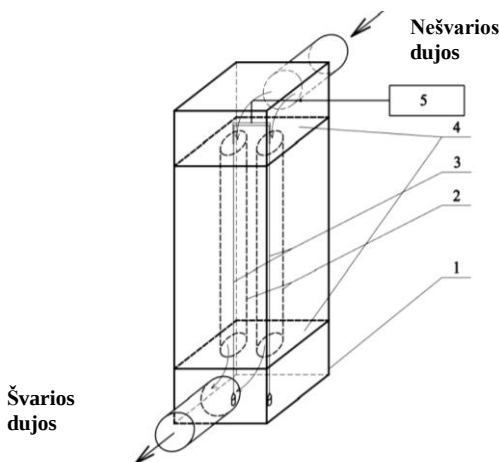
Elektrostatinį filtrą sudaro metalinis rėmas, kuriame sumontuoti du surinkimo ( $d = 120$  mm,  $l \approx 1000$  mm) ir du išlydžio elektrodai (išlydžio elektrodams naudota 0,2 mm skersmens nichromo viela). Išlydžio elektrodai sujungti su aukštos įtampos šaltiniu, kuriuo įtampa galima keisti nuo 0 iki 30 kV.

Išlydžio elektrodams tiekiamą pastovią aukštos įtampos srovę. Aukšta įtampa sukuria vainikinį išlydį ir dauguma dujų tarp elektrodų įgauna neigiamą krūvį (gaunasi neigiami jonai). Neigiami jonai veikiant elektros laukui juda prie surinkimo elektrodų, kurie yra teigiamo krūvio. Judėdami jonai susiduria su dujose esančiomis kietosiomis dalelėmis ir jų paviršiuje yra absorbuojami. Taip dalelės įgauna neigiamą krūvį ir pradeda judėti surinkimo elektrodų link.

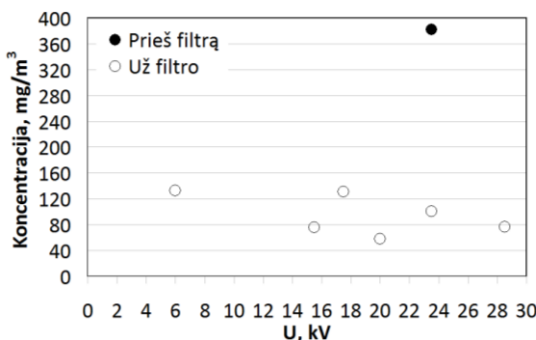
Išmatavus elektrostatinio filtro voltamperinę charakteristiką (V/A) paaiškėjo, kad jai geriausiai galima taikyti modifikuotą Townsend lygtį, kuri dažnai taikoma elektrostatinų filtrų voltamperinėms charakteristikoms aprašyti [3]. Pagal išmatuotą V/A nustatyta, kad įtampa, kuriai esant atsiranda vainikinis išlydis, yra lygi 8 kV.

Kietųjų dalelių kiekis dūmuose buvo matuojamas kietųjų dalelių matuokliu, galinčiu matuoti kietąsias daleles, kurių diametras nuo 0,4  $\mu\text{m}$  iki 300  $\mu\text{m}$ . Kietųjų dalelių matuoklio veikimas pagrįstas infraraudonųjų spindulių išsklaidymu. Infraraudonuosius spindulius išsklaido kietosios dalelės judėdamos per matavimo zoną. Kiekviena dalelė judėdama per matavimo zoną generuoja elektrinį impulsą, proporcingą sferinės dalelės diametrai. Jei dalelė yra ne sferinė, tada impulso dydis priklauso nuo to, kaip dalelė yra orientuota matavimo zonoje. Taigi, šiuo įrenginiu

yra matuojamas tik vienas dalelės matmuo. Kietųjų dalelių matavimai buvo atliekami po 10 min.



2 pav. Elektrostatinio filtro schema: 1 – korpusas, 2 – surinkimo elektrodai, 3 – išlydžio elektrodai, 4 – laikančios plokštės, 5 – aukštos įtampos šaltinis.



3 pav. Kietųjų dalelių koncentracijos kitimas atsižvelgiant į įtampą, tiekiamą į elektrostatinį filtrą

**Tyrimų rezultatai.** Kietųjų dalelių koncentracijos kitimas, atsižvelgiant į elektrostatinį filtrą tiekiamą įtampą, parodytas 3 pav. Kaip matyti iš šio paveikslo, kietųjų dalelių koncentracija prieš elektrostatinį filtrą siekia  $400 \text{ mg/m}^3$ , kai už elektrostatinio filtro koncentracija svyruoja 130 ir  $60 \text{ mg/m}^3$  ribose, kas byloja, jog dujų gavybos procesas dujinimo reaktoriuje yra nestabilus. Tai atsiliepia ir elektrostatinio filtro darbui, t. y. jo efektyvumas, esant didesnėms kietųjų dalelių

koncentracijoms, yra apie 65 %, o mažesnių koncentracijų atveju yra apie 85 %. 3 pav. matyti vainikinio išlydžio įtaka kietųjų dalelių sugaudymui (t. y. jam atsiradus (virš 8 kV) padidėja kietųjų dalelių sugaudymas).

### Išvados

1. Minimali įtampa, kuriai esant atsiranda elektrodo išlydis, yra 8 kV.
2. Elektrostatinio filtro efektyvumas nėra aukštas, todėl reikia toliau jį tobulinti bei reikia tolesnių eksperimentinių tyrimų, norint nustatyti kietųjų dalelių koncentracijų pasiskirstymo dėsningumus.

### Literatūra

1. <http://manoukis.lt/naujienos/technika/13061-ar-nuoteku-dumblu-bus-tresiami-lietuvos-laukai>.
2. <http://www.asu.lt/nm/l-projektas/atliekutvarkymas/32.htm>.
3. Leal Ferreira G.F. Oliveira O.N. Giacometti J.A. Point-to-plane corona: Current-voltage characteristics for positive and negative polarity with evidence of an electronic component. *Journal of Applied Physics*, 1986, 59 (9): p. 3045–3049.

### The possibility to use electrostatic precipitator for synthetic gas cleaning

#### Summary

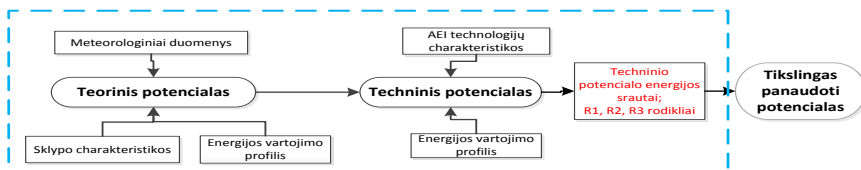
The results of the experimental investigations of the characteristics of electrostatic precipitator designed at Lithuanian Energy Institute are presented in this paper. The application of the ESP is intended for synthetic gas cleaning. It was shown that the minimum voltage of the corona discharge equalled 8 kV. The highest collection efficiency of 85% was achieved at 20 kV.

## Pirminė atsinaujinančiųjų energijos išteklių technologijų atranka, integruotai kuriant pastato modelį

Vygantas Žėkas, Vytautas Martinaitis  
Vilniaus Gedimino technikos universitetas

**Įvadas.** Pastatų modelių kūrimo procesas tampa vis labiau skaitmenizuotas. Šiuolaikiniai techninių alternatyvų vertinimo metodai ir kompiuterinės priemonės sudaro sąlygas uždavinius spręsti taikant integruotus kūrimo metodus, vis daugiau modeliavimo veiksmų perkeltiant į virtualią erdvę. Aprūpinimas energija yra vienas pagrindinių tokio proceso uždavinių. Siekiant kompleksiskai įvertinti vietoje esančius atsinaujinančiųjų energijos išteklius (AEI), kaip rodo atlikta apžvalga [1], sprendimų paieškai racionalu taikyti termodinaminės analizės principus. Pastato teritorija, sklypas formuojamas kaip menamomis ribomis apribota termodinaminė sistema. Šios sistemos ribose sprendžiami įvairūs uždaviniai. Ieškant racionaliausio sprendimo analizuojamos hibridinės AEI sistemos [2–3]. Energijos tiekimo užtikrinimui planuoti taikomos kompiuterinės modeliavimo priemonės [4]. Kaip rodo Mendes ir kt. atliktas tyrimas [5], optimizuojant sprendinius siekiama ekonominio efektyvumo. Luna-Rubio ir kt. tyrime [3] aprašomi tokie hibridinių sistemų optimizavimo rodikliai: energijos tiekimo pertrūkio tikimybė; energijos kaina; autonomijos lygis; energijos tiekimo perviršio tikimybė; ekonominiai rodikliai. Šie rodikliai apibūdina jau parinkto technologinio sprendimo naudą. Gautas optimizavimo rezultatas neperteikia AEI potencialo santykio su formuojamu sklype energijos poreikiu. Tikslinga, neapsiribojant konkrečiu technologiniu sprendimu, įvertinti sklype disponuojamą AEI potencialą ir atsižvelgus į tai, kaip potencialas dera su energijos poreikiu, parinkti labiausiai inžineriškai derančią technologiją.

**Atsinaujinančiuosius energijos išteklius naudojančių technologijų atranka.** AEI technologijos suderinamumui su pastato sklype formuojamu energijos poreikiu įvertinti (1 pav.), siūlomi naudoti AEI potencialo ir energijos poreikio suderinamumo rodikliai.



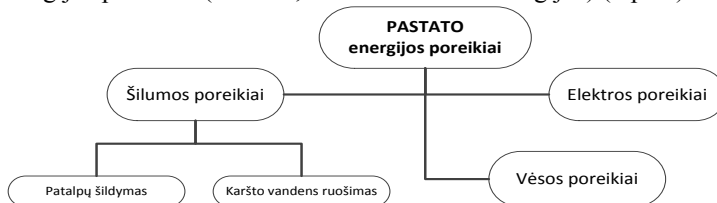
1 pav. AEI potencialo nustatymo lygmenys ir suderinamumo rodiklių identifikavimo vieta (punktyrinė linija žymi tyrimo apimtį)

Dėl paprastumo rodikliai žymimi R simboliu. AEI technologinio sprendinio suderinamumui įvertinti atliekami veiksmai, kurie struktūriškai pavaizduoti 1-ame paveiksle. Atrankos rodikliai R skaitinėje formoje pateikia technologijų atrankos rezultatus, leidžiančius modeliotojui nustatyti taikytinos technologijos prioritetą. Lentelėje Nr. 1. pateiktas rodiklių R paaiškinimas.

1 lentelė. Technologijų atrankai taikomi rodikliai

| Nr. | Rodiklis | Rodiklio trumpas apibūdinimas                            | Rodiklio skaitinė reikšmė                                             |
|-----|----------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1.  | R1       | Poreikio užtikrinimo rezervas                            | Nedimensinis dydis kaip santykis                                      |
| 2.  | R2       | Poreikio užtikrinimo nuoseklumas                         | Valandinė loginė „taip = 1“ arba „ne = 0“ reikšmė, nedimensinis dydis |
| 3.  | R3       | Energijos potencialo prasilenkimas su poreikiu per laiką | Valandinis galios skirtumas, kW                                       |

Nustatant pastato sklype formuojamą energijos poreikį, įvertinami pagrindiniai pastato energijos poreikiai (šilumos, vėsos ir elektros energijos) (2 pav.).



2 pav. Pastato energijos poreikių struktūra

Elektros energijos poreikiai apima apšvietimo ir šilumnešiams transportuoti reikalingus energijos poreikius be buitinių vartotojų poreikių.

**Technologijų atrankos rodiklių nustatymas.** Rodiklis R1 –apibūdina atitinkamo šaltinio kiekybinę derėjamą su sklype formuojamu energijos poreikiu. Valandinis rodiklis R1 nustatomas kaip nedimensinis dydis:

$$R1_{h,x} = Q_{AEI,h,y} / Q_{P,h,x} \quad (1)$$

čia:  $R1_{h,x}$  – AEI energijos potencialo ir pastato energijos poreikio santykio rodiklis; reikšmė „1“ reikštų poreikio ir AEI potencialo atitikimą. Kuo šio santykio reikšmė didesnė, tuo AEI labiau patikimas, tuo didesnis jo rezervas. Indeksas „y“ reiškia poreikio tipą. Galimi trys rodiklio R1 variantai:

1.  $R1_{h,x} = 1$  – poreikis ir energijos potencialas atitinka.
2.  $R1_{h,x} < 1$  – energijos potencialo nepakanka poreikiui patenkinti.
3.  $R1_{h,x} > 1$  – poreikiui patenkinti panaudojamas ne visas disponuojamas energijos potencialas.

Pasirinkto laikotarpio R1 rodiklis nustatomas kaip vidurkis visų nustatytų valandinių atitinkamo laikotarpio vidurkių.

Rodiklis R2 – suprantamas kaip AEI potencialo palyginimas su valandinio rezultato poreikiu, taikant loginę atitikties funkciją (atitinka / neatitinka). Valandinis R2 rodiklis nustatomas:

$$R2_{h,x} = \begin{cases} Z_i = 0, & \text{kai } Q_{p,h,x} > Q_{AEI,h,y} \\ Z_i = 1, & \text{kai } Q_{p,h,x} \leq Q_{AEI,h,y} \end{cases} \quad (2)$$

čia:  $Z_i$  – poreikio ir AEI energijos srauto palyginimo atvejais; galimos palyginimo reikšmės 0 ir 1.

Pasirinkto laikotarpio R2 rodiklis nustatomas pagal šią formulę:

$$R2_{p,x} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3)$$

čia:  $W_i$  – valandinio poreikio atvejais. Galimi du dydžio  $W_i$  nustatymo atvejai:

$$Q_{p,h,x} > 0, W_i = 1; \quad (4)$$

$$Q_{p,h,x} = 0, W_i = 0. \quad (5)$$

Poreikių užtikrinimas vertinamas atskirai pagal poreikių tipą. Suminis efektas nėra vertinamas.

Rodiklis R3 – yra artimas poreikio užtikrinimo rezervo rodikliui R1. Rodiklis R3 išreiškia kiekybinį AEI ir poreikio palyginimą energijos vienetais, kW. Rodikliu R1 išreiškiamas atitinkamo laikotarpio potencialo ir poreikių santykis, nedetalizuojant jų apimtys, o rodikliu R3 išreiškiamas kiekybinis jų palyginimas. Rodiklis R3 apibūdina tiek perteklinį, tiek trūkstamą energijos potencialo dydį poreikio pasireiškimo metu. Energijos potencialo prasilenkimas vertinamas atskirai pagal poreikių tipą. Suminis poreikių efektas nėra vertinamas. Valandinis R3 rodiklis nustatomas:

$$R3_{h,x} = \Delta Q_i \quad (6)$$

čia:  $\Delta Q_i$  – AEI potencialo energijos srauto ir poreikio valandinis skirtumas, kW; galimos ir teigiamos, ir neigiamos reikšmės.

Energijos srauto ir poreikio valandinis skirtumas nustatomas:

$$\Delta Q_i = Q_{AEI,h,y} - Q_{p,h,x} \quad (7)$$

Pasirinkto laikotarpio R3 rodiklis nustatomas:

$$R3_{p,x} = \sum_{i=1}^n \Delta Q_i \quad (8)$$

Papildomai nustatomi daliniai pasirinkto laikotarpio R3 rodikliai. Perteklinį potencialą apibūdinantis  $+R3_{p,x}$  nustatomas:

$$+R3_{p,x} = \sum_{i=1}^n +\Delta Q_i \quad (9)$$

Trūkstantį energijos potencialą apibūdinantis  $-R3_{p,x}$  nustatomas:

$$-R3_{p,x} = \sum_{i=1}^n -\Delta Q_i \quad (10)$$

Nustatant AEI potencialo suderinamumą su pastato sklype formuojamu energijos poreikiu, atsižvelgiant į energijos naudojimo paskirtį, sudaroma tinkamiausių AEI technologijų seka. AEI potencialo nustatymo ir technologijų atrankos rezultatams pateikti gali būti suformuota pradinių duomenų rinkmena. Tai būtų struktūrizuotos informacijos masyvas, leidžiantis pagrįstai pasirinkti tinkamiausią sklypo alternatyvą, ir padedantis suformuoti pirminę sklypo technologinę koncepciją. Valandiniu žingsniu atlikto suderinamumo ar tarpinių skaičiavimų informacija gali būti perkelta į specializuotas kompiuterinio modeliavimo priemones.

**Technologijų atrankos atvejo analizė.** Sklypo energijos potencialo skaitinės reikšmės paimtos iš pirmajame kompleksinio sklypo energijos potencialo vertinimo etape atliktų skaičiavimų. Sklypo formuojamų energijos poreikių valandinės reikšmės paimtos iš VGTU Pastatų energetikos katedroje atliekamų pastatų energijos poreikių modeliavimo darbų. Technologijų atranka atlikta esant 95 % energijos poreikio padengimui iš AEI.

Tolesniame skaičiavimų etape nustatomi rodikliai R. Skaičiavimų rezultatai suskirstomi pagal generuojamos energijos tipą: energija patalpoms šildyti, karštam vandeniui ruošti, vėsinti ir elektrai generuoti. Skaičiavimai atlikti pasirinkus metų laikotarpį, todėl gautos išvados atspindi metinius rezultatus. Skaičiavimai atlikti laisvai pasirinktame neužstatytame, lygiame sklype be didesnio aplinkinio šešėliavimo į sklypą. Sklypo centro koordinatės (WGS): 54.7917, 25.2775 (sutrumpintas sklypo pavadinimas „Lygus“). Atvejo analizėje nagrinėjamos technologijos: saulės kolektoriai (SC), pratakus saulės kolektorius (SW), gruntinis šilumos siurblys su vertikaliu ir horizontaliu kolektoriais (HGv ir HGh), orinis šilumos siurblys (HA/HW), saulės fotoelementai (SE), vėjo jėgainė (WE) ir adsorbcinė vėsinimo mašina (AC).

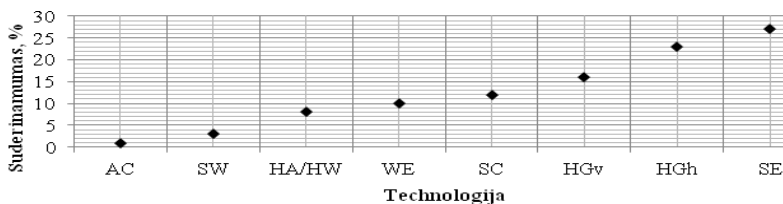
Technologijų suderinamumas su sklype formuojamais poreikiais išreiškiamas procentiniu dydžiu (100 proc. reiškia maksimalų galima suderinamumą). Nustatant atitinkamos technologijos bendrąjį svorį (neišskiriant galutinės energijos formos) yra įvertinami visi energijos poreikių patenkinimo variantai, į kuriuos technologija yra orientuota. Pvz., saulės fotoelementų technologija gali būti naudojama tiek šilumos, tiek vėsos, tiek ir elektros poreikiams patenkinti.

Atlikus skaičiavimus, gautos suvestinės rodiklių R procentinės reikšmės pateiktos 2 lentelėje.

## 2 lentelė. Suvestiniai technologijų suderinamumo su energijos poreikiais rodikliai

| Sklypas    | Technologija |    |     |     |       |    |    |    |
|------------|--------------|----|-----|-----|-------|----|----|----|
|            | SC           | SW | HGv | HGh | HA/HW | SE | WE | AC |
| „Lygus“, % | 12           | 3  | 16  | 23  | 8     | 27 | 10 | 1  |

Grafinė suderinamumo interpretacija pateikta 3 paveiksle.



## 3 pav. Atskirų atsinaujinančiuosius energijos išteklius panaudojančių technologijų bendras suderinamumo su pastato energijos poreikiais procentas

Kaip matyti iš gautų rezultatų, didžiausias bendras AEI technologijų suderinamumas su sklype formuojamais poreikiais yra saulės fotoelementų ir geoterminio siurblio su horizontaliu kolektoriumi. Saulės fotoelementų suderinamumas siekia 27 %, gruntinio šilumos siurblio – 23 %. Mažiausias suderinamumas yra adsorbcinio vėsinimo įrenginio bei pratakais saulės kolektoriaus – atitinkamai 1 % ir 3 %.

Patalpų šildymo alternatyva. Patalpų šildymo poreikiams padengti tinka visos nagrinėjamos technologijos, išskyrus adsorbcinį vėsinimo įrenginį. Pritaikius procentinio svorio metodą ir sujungus visų trijų rodiklių skaitines reikšmes, nustatyta bendra technologijų prioritetinga seka (3 lentelė).

## 3 lentelė. Technologijų atrankos patalpų šildymo alternatyvai suvestinė

| Prioritetas | Technologija | Procentinis svoris* |
|-------------|--------------|---------------------|
| 1           | HGh          | 94                  |
| 2           | SE           | 51                  |
| 3           | SW           | 35                  |
| 4           | SC           | 34                  |
| 5           | WE           | 32                  |
| 6           | HA/HW        | 28                  |
| 7           | HGv          | 27                  |

\*bendras procentinis svoris yra 300 %.

Bendras gruntinio šilumos siurblio su horizontaliu kolektoriumi technologinio sprendinio svoris 94 % rodo, kad šios technologijos suderinamumas yra aiškiai

prioritetinis. Nesprendžiant akumulavimo reiškinį ir galimybių, šios technologijos pasirinkimas tolesniame detaliame modeliavime turėtų būti prioritetinis.

Karšto vandens ruošimo alternatyva. Karšto vandens ruošimo poreikiams patenkinti netinka adsorbcinio vėsinimo įrenginio ir nepratakaus saulės kolektoriaus technologijos. Likusių technologijų prioritetinė seka pateikta 4 lentelėje.

4 lentelė. Technologijų atrankos karšto vandens ruošimo alternatyvai suvestinė

| Prioritetas | Technologija | Procentinis svoris* |
|-------------|--------------|---------------------|
| 1           | SC           | 108                 |
| 2           | HGh          | 81                  |
| 3           | SE           | 48                  |
| 4           | HGv          | 24                  |
| 5           | HA/HW        | 22                  |
| 6           | WE           | 17                  |

\*bendras procentinis svoris yra 300 %.

Bendri rezultatai rodo, kad karštam vandeniui ruošti tinkamiausia technologija yra saulės kolektorių technologija. Gruntinis šilumos siurblys su horizontaliu kolektoriumi turintis 80 % suderinamumo svorį yra taip pat naudinga technologija. Detaliau modeliuojant karšto vandens aprūpinimo sistemas, šios technologijų alternatyvos gali būti pasirinktos kaip prioritetinės.

Vėsinimo alternatyva. Vėsinimo poreikiams padengti tinka tik šilumos siurblių ir adsorbcinio vėsinimo įrenginio technologijos. 5-oje lentelėje pateikiama prioritetinė šių technologijų seka.

5 lentelė. Technologijų atrankos vėsinimo alternatyvai suvestinė

| Prioritetas | Technologija | Procentinis svoris* |
|-------------|--------------|---------------------|
| 1           | HGv          | 141                 |
| 2           | HGh          | 97                  |
| 3           | HA/HW        | 50                  |
| 4           | AC           | 12                  |

\*bendras procentinis svoris yra 300 %.

Bendri rezultatai rodo, kad vėsinimo poreikiams padengti naudingiausia yra gruntinio šilumos siurblio su vertikaliu kolektoriumi technologija (141 % suderinamumas). Adsorbcinis vėsinimo įrenginys, nors ir orientuotas į vėsinimo poreikių padengimą, tačiau be akumulavimo galimybių įvertinimo rodo mažą, tik 12 proc. suderinamumą su poreikiais, rezultata. Ši technologija negali būti pasirinkta prioritetine nagrinėjant vėsos poreikių padengimą.

Elektros generavimo alternatyva. Elektros generavimo poreikiams padengti tinka tik saulės fotoelementai ir vėjo jėgainės. 6 lentelėje pateikiama prioritetinė šių technologijų seka.

6 lentelė. Technologijų atrankos elektros generavimo alternatyvai suvestinė

| Prioritetas | Technologija | Procentinis svoris* |
|-------------|--------------|---------------------|
| 1           | SE           | 229                 |
| 2           | WE           | 71                  |

\*bendras procentinis svoris yra 300 %.

Bendri rezultatai rodo, kad 229 % svoriu elektros energijos poreikiams padengti atitenka saulės fotoelementų technologija. Tai akivaizdus pranašumas, ir, renkantis elektros generavimo technologinį sprendinį, saulės fotoelementų technologija būtų tinkamas inžinerinis pagrindas racionaliai išspręsti apsirūpinimo elektros energija uždavinį.

Suvestiniai technologijų atrankos rodiklių rezultatai. Sklype formuojami energijos poreikiai perteikia skirtingos dinamikos energijos formų ir energijos srautų poreikį. Turint omenyje, kad pavienės technologijos gali generuoti tik tam tikros formos ar intensyvumo energiją, tai tos pačios technologijos panaudojimas skirtingiems poreikiams padengti yra komplikotas uždavinys. Dažnai šis uždavinys būna susijęs su hibridinių sistemų nagrinėjimu. Nevertinant galimo technologijų persidengimo ir galimybių lygiagrečiai panaudoti skirtingiems energijos poreikiams padengti, toliau 7-oje lentelėje pateikiama bendra technologijų atrankos rodiklių suvestinė (7 lentelė). Kiekviena technologijos panaudojimo paskirtis bendrai sudaro 100 proc. svorį, kuris padalijamas technologijoms pagal suderinamumo su poreikiais skaičiavimo rezultatus. Naudingiausia yra didžiausią procentinę išraišką turinti technologija.

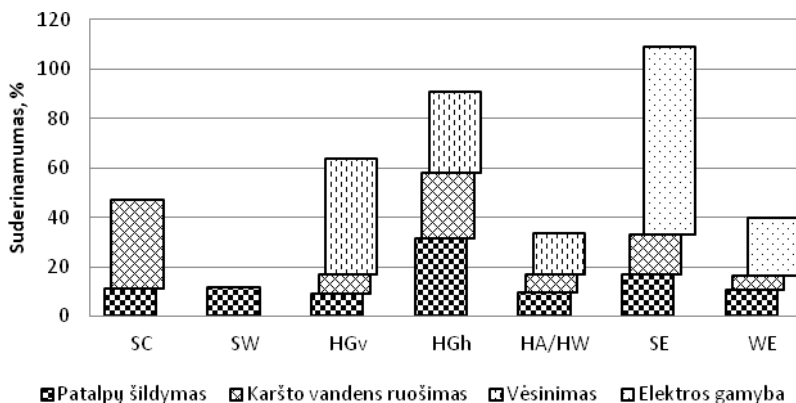
7 lentelė. Bendra technologijų atrankos pagal panaudojimo paskirtį suvestinė

| Prioritetas | Technologijos panaudojimo paskirtis |    |                         |    |           |    |                 |    |
|-------------|-------------------------------------|----|-------------------------|----|-----------|----|-----------------|----|
|             | Patalpų šildymas                    |    | Karšto vandens ruošimas |    | Vėsinimas |    | Elektros gamyba |    |
| 1           | HGh                                 | 31 | SC                      | 36 | HGv       | 47 | SE              | 76 |
| 2           | SE                                  | 17 | HGh                     | 27 | HGh       | 32 | WE              | 24 |
| 3           | SW                                  | 12 | SE                      | 16 | HA/HW     | 17 |                 |    |
| 4           | SC                                  | 11 | HGv                     | 8  | AC        | 4  |                 |    |
| 5           | WE                                  | 11 | HA/HW                   | 7  |           |    |                 |    |
| 6           | HA/HW                               | 9  | WE                      | 6  |           |    |                 |    |
| 7           | HGv                                 | 9  |                         |    |           |    |                 |    |

Kaip matyti iš skaičiavimų rezultatų, skirtingoms energijos formoms prioritetine technologija tampa vis kitas sprendimas. Tai sąlygoja hibridinių sistemų sprendimo uždavinį. Atsižvelgiant į vyraujančios technologijos panaudojimo paskirtį, gali būti

pasirinkta labiausiai pasirinktą paskirtį atitinkanti technologija, kuri iš dalies padengtų ir kitus energijos poreikius.

Grafinė 7-os lentelės duomenų interpretacija pateikta 4 paveiksle.



4 pav. Atsinaujinančiuosius energijos išteklius naudojančių technologijų atrankos suderinamumo su pastato energijos poreikiais pasiskirstymas

**Tyrimo išvados.** Mokslinėje literatūroje gausu techninės informacijos apie atskirus atsinaujinančiosios energijos išteklius, tačiau trūksta metodo, kuriuo, panaudojant kompleksiskai įvertintą sklypo ir jame numatomų vartotojo energetinių poreikių informaciją, būtų galima suformuoti sklypo AEI pirminę technologinę plėtros koncepciją.

Norint parinkti labiausiai su energijos poreikiais derančias AEI technologijas, siūlomas AEI potencialo ir poreikio suderinamumo nustatymo metodas, pagrįstas trimis suderinamumą apibūdinančiais rodikliais. Taikant šį metodą atlikta atvejo analizė ir skaičiavimais nustatyta, kad su priemiesčio sklype formuojamais mažaeenergio pastato energijos poreikiais geriausiai suderinami: gruntinis šilumos siurblys patalpų šildymo ir vėsinimo poreikiams patenkinti (suderinamumo procentas šildymui – 31 % ir patalpoms vėsinti – 47 %); saulės kolektoriai karštam vandeniui ruošti (36 %); saulės fotoelementai elektros poreikiams patenkinti (76 %).

## Literatūra

1. Liao W.; Heijungs R.; Huppes G. 2012. Thermodynamic analysis of human-environment systems: A review focused on industrial ecology. *Ecological Modelling* 228: 76–88.
2. Bajpai P.; Dash V. 2012. Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 2926–2939.

3. Luna-Rubio R.; Trejo-Perea M.; Vargas-Vazquez D.; Rios-Moreno G.J. 2012. Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies. *Solar Energy* 86: 1077–1088.
4. Connolly D. *et al.* 2010. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy* 87: 1059–1082.
5. Mendes G. *et al.* 2011. On the planning and analysis of Integrated Community Energy Systems: A review and survey of available tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 4836– 4854.

### **Primary selection of renewable energy technologies for integrated building model design**

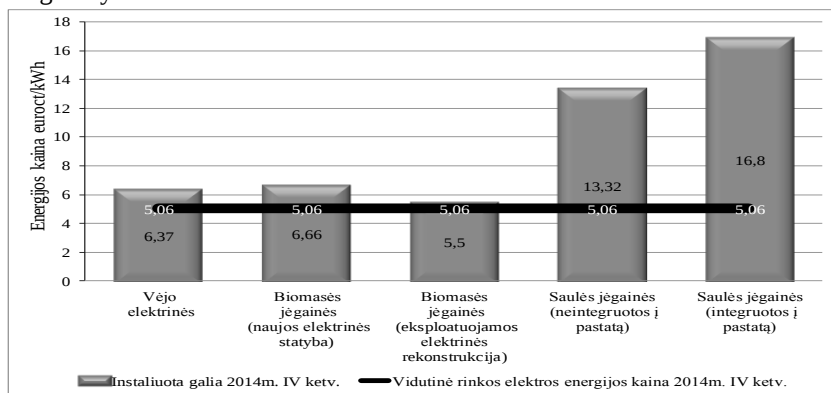
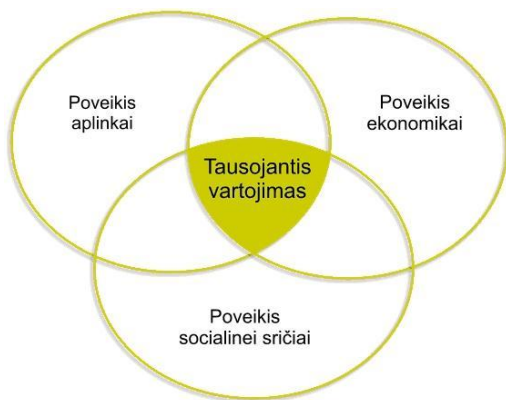
#### Summary

Increased popularity of technological solutions of RES integration requires to take a comprehensive look at RES and to evaluate them at the same level of technical options. There is a growing need to evaluate the RES potential available at energy consumer site as well as to design the initial technological concept of the site development on the basis of the obtained data. This should be an information reference point of integrated designing as a starting point for the next stages of simulation.

## Darnios raidos principų taikymas naudojant saulės, vėjo ir biokuro energetinius išteklius

Giedrius Gecevičius, Antanas Markevičius, Mantas Marčiukaitis  
Lietuvos energetikos institutas

Darnios raidos koncepcijos įgyvendinimas yra vienas pagrindinių strateginių tikslų Europos Sąjungoje (ES) bei Lietuvoje. Terminas apibrėžia subalansuotą raidą, minimizuojant neigiamą poveikį aplinkai, stiprinant ekonomiką bei darant teigiamą poveikį socialinei sričiai. Nors darnios plėtros terminas ilgą laiką yra plačiai vartojamas, tačiau nesistengta suteikti jam analitinio pagrindo, kurį būtų galima naudoti „darnios“ ekonominės politikos plėtrai. Pirmą kartą tai padarė JAV mokslininkas ekonomistas John Pezzey Pasaulio banko užsakyму atliktoje studijoje [1], kurioje ne tik suformulavo ekonominės plėtros ir aplinkos apsaugos aspektų darnumo sąvoką, bet ir atskleidė jos praktinio taikymo galimybes.



1 pav. Elektros energijos, pagamintos iš skirtingų pirminės energijos išteklių, fiksuotas supirkimo tarifas

Kalbant apie energetikos sektorių, daugelį metų elektros energijos, pagamintos iš skirtingų pirminės energijos išteklių, kaštų palyginimas (1 pav.) neatspindėjo tikrosios padėties dėl išorinių kaštų neapibrėžtumo. Išoriniai kaštai neturėjo tikslios

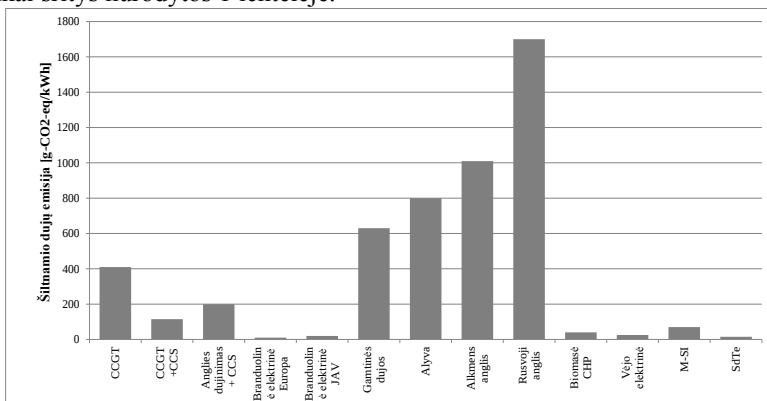
piniginės išraiškos, todėl, lyginant elektros ar šilumos gamybos būdus, atsinaujinantys energijos ištekliai (AEI) prarasdavo konkurencinį pranašumą. Pavyzdžiui, įvertinus išorines sąnaudas, vėjo elektrinių energija tampa konkurecinga, lyginant su iškastinių organinių kurą deginančiomis jėgainėmis. Dabartinė darnios plėtros koncepcija, be ekonominių, apima ir kitus aspektus, vertinančius išorinius kaštus pagal poveikį t. y.: *socialinius kaštus* – tai tiesioginė žala žmonių sveikatai bei gyvenimo trukmei, pastatų ir medžiagų greitesnis senėjimas, derliaus nuostoliai, gyvenimo kokybės sumažėjimas; *aplinkos kaštus* – ekoįvairovės ir ekosistemų nykimas ir atrofavimas, globalus šiltnamio efektas, globaliu mastu didėjančių gamtos stichijų sugriovimai, smogas; *politinius kaštus* – priėjimo prie žaliavos šaltinių politinės ir karinės apsaugos išlaikymas, kova dėl radioaktyvių atliekų saugojimo, atominių incidentų nuolatinis pavojus [2] žaliavų rezervų; *branduolinius kaštus* – atominių elektrinių.

Reikia atkreipti dėmesį, kad vertinant išorinius kaštus, vertėtų neapsiriboti vien elektra ir (arba) šilumą gaminančių technologijų vertinimu, būtina vertinti išorinius kaštus viso kuro ciklo: kuro išgavimo, transportavimo bei paskirstymo, kuro konversijos (deginimo), pagamintos elektros energijos perdavimo, jos vartojimo, pačių įrenginių statybos bei įrenginių gamybos, įrenginių veiklos sustabdymo. Pavyzdžiui, vėjo jėgainės, gamindamos elektrą, tiesiogiai aplinkos neteršia, bet ją teršia gamyboje naudojamos medžiagos ir procesai. Šiuo metu tik dalis kuro ciklo išorinių kaštų yra perkeliama teršėjams, dažniausiai mokesčių dėka, bet dalis išorinių kaštų taip ir lieka nepriskaičiuoti nei energijos gamintojams, nei vartotojams, o primestos visuomenei ir aplinkai, t. y. jie neįtraukti į rinkos kainą. Pvz., nustatyta, kad aplinkos kaštams labiausiai įtakos turi CO<sub>2</sub> išmetimai (2 pav.), pasauliniu mastu daro poveikį mirtingumui, sergamumui, pakrančių erozijai, žemės ūkiui, energijos paklausai ir sukelia kitas ekonomines pasekmes dėl temperatūros pokyčio ir kylančio jūros lygio, tačiau šios žalos elektrinės ar katilinės savininkai neatlygina ir tokių išlaidų neįtraukia į elektros ar šilumos generavimo kaštus (arba įtraukia tik iš dalies) [3].

1 lentelė. AEI poveikis aplinkai

| Vėjo energetika          | Saulės energetika             | Bioenergetika                           |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------|
| Triukšmas                | Užimami dideli žemės plotai   | Išlakos                                 |
| Šešėliavimas             | Vizuali tarša                 | Užimami dideli žemės plotai (pasėliams) |
| Poveikis paukščiams      | Poveikis biologinei įvairovei | Gėlo vandens naudojimas                 |
| Poveikis kraštovaizdžiui |                               |                                         |
| Poveikis gyventojams     | Atliekų utilizavimas          |                                         |

Pagrindinių AEI naudojimas energijos gavybai sukelia poveikį aplinkai, atsižvelgiant į būvio ciklo vertinimo metodiką, t. y. nuo žaliavų išgavimo iki galutinio produkto ar technologinio įrenginio utilizavimo. Pagrindinės poveikio aplinkai sritys nurodytos 1 lentelėje.



2 pav. CO<sub>2</sub> išmetimų palyginimas gaminant energiją iš skirtingų pirminės energijos išteklių [4]

Lyginant CO<sub>2</sub> išmetimų kiekius gaminant energiją iš skirtingų pirminės energijos išteklių (2 pav.), didžiausi CO<sub>2</sub> išmetimai gaunami deginant rusvą bei akmens anglis, mažiausi – branduolinėse elektrinėse bei biomasės kombinuoto ciklo, vėjo ir saulės elektrinėse. Šiuo požiūriu AEI turi neigiamą pranašumą.

Analizuojant soc-ekonominiu požiūriu pateiktus duomenis, sukuriamų darbo vietų skaičių per metus (2 lentelė) bei metinės apyvartos lėšų (3 lentelė) vėjo, saulės fotoelementų bei kieto biokuro atžvilgiu matome, kad daugiausiai darbo vietų pasaulyje sukuria saulės energetika elektrai gaminti (2,273 mln.), bioenergetika (1,453 mln.) bei vėjo energetika (834 tūkst.). Lietuvoje daugiausiai darbo vietų sukuria bioenergetika (2975).

2 lentelė. Sukuriamos darbo vietos

|                      | Regionas | Sukuriamos darbo vietos |        |
|----------------------|----------|-------------------------|--------|
|                      |          | 2011                    | 2012   |
| Vėjo energetika      | Lietuva  | 250                     | 400    |
|                      | ES       | 276000                  | 303445 |
| Saulės fotoelementai | Lietuva  | 50                      | 100    |
|                      | ES       | 330630                  | 252570 |
| Kietasis biokuras    | Lietuva  | 2950                    | 2975   |
|                      | ES       | 270730                  | 282095 |

Pagal apyvartines lėšas ES pirmąją vėjo energetiką, nedaug atsilieka saulės fotoelementai bei kietasis biokuras. Iš ES šalių į AEI plėtrą daugiausiai investuoja

Vokietija, pirmąja investicijomis į saulės fotoelementus (12420 mln. Eurų), o į vėjo energetiką investuojama žymiai mažiau (5180 mln. Eurų). Tai rodo, kad Vokietijoje vėjo energetikos rinka mažėja, o saulės fotoelementų (FV) ir kietojo biokuro auga. Lietuvoje daugiausia investuojama į kietojo biokuro 290 mln., vėjo 55 mln. bei saulės 20 mln eurų technologijas (2012 metais).

3 lentelė. Apyvartinės lėšos AEI mln. eurų 2012 m.

|                | Iš viso    | Vėjo energetika | Saulės FV | Kietasis biokuras |
|----------------|------------|-----------------|-----------|-------------------|
| Vokietija      | 34 260     | 5 180           | 12 420    | 7 525             |
| Italija        | 14 355     | 1 950           | 4 600     | 1 180             |
| Prancūzija     | 11 320     | 1 910           | 2 430     | 1 560             |
| Vengrija       | 672        | 40              | 5         | 415               |
| Slovakija      | 662        | 0               | 150       | 210               |
| Latvija        | 581        | 25              | <1        | 505               |
| Slovėnija      | 566        | <5              | 250       | 163               |
| Estija         | 530        | 120             | <1        | 295               |
| Airija         | 456        | 250             | <1        | 60                |
| <b>Lietuva</b> | <b>444</b> | <b>55</b>       | <b>20</b> | <b>290</b>        |
| Kipras         | 66         | 15              | 35        | <1                |
| Malta          | 45         | 0               | 40        | 0                 |
| Iš viso ES:    | 129 424    | 34 410          | 30 758    | 27 679            |

Kadangi Lietuvoje daugiausiai investicijų sutelkta kietojo biokuro technologijų plėtrai, todėl reikėtų aiškiai apibrėžti šios ūkio šakos darnios plėtros principus. Jie turėtų apimti visą gamybos grandinę nuo biomasės auginimo, jos surinkimo, biokuro konversijos į šilumą/šaltį, elektros energiją ar biodegalus transportui iki paskirstymo ir pateikimo galutiniam vartotojui. Visus šiuos aspektus apima aiškiai suformuluoti principai, kurie gali būti panaudoti įvairių šalių vykdomos politikos faktinės darnumo būklei įvertinti bei tolesnei raidai valdyti. Tam reikia, kad bioenergetika, kaip atskiras energetikos ūkio pošakis, atitiktų šiuos bendrus socialinius, ekonominius bei aplinkosauginius principus:

1. Biokuro gamyba ir naudojimas energetikai neturi kelti grėsmės aprūpinimo maistu saugumui ir vietinei biomasės, turinčios kitą paskirtį, gamybai.

2. Biokuro gamyba neturėtų kelti pavojaus kultūros paveldui ar vietinių bendruomenių bei kultūrų klestėjimui.

3. Bioenergijos gamyba, išgavimas ir naudojimas turėtų prisidėti prie miškininkystės ir žemės ūkio veiklos augimo ir gyvybingo verslo bei patikimo energijos tiekimo plėtros. Atliekos, kaip jos apibūdintos Atliekų direktyvoje, taip pat turi būti taikomos darnios bioenergijos gamybai.

4. Energijos vartojimo efektyvumo principas: tvariai bioenergijos gamybai ir naudojimui energijos balansas turi būti teigiamas. Tiekiamą energiją turi būti minimizuojama visoje gamybos grandinėje, paskirstyta ir įskaitoma į pagrindinių ir

šalutinių produktų energetinę vertę.

5. Klimato kaitos švelninimo efektyvumo principas: reikia sumažinti šiltnamio dujų emisijas iš bioenergijos gamybos ir naudojimo.

6. Bioįvairovės išsaugojimo principas: biomasės auginimas ir naudojimas negali kelti pavojaus kraštovaizdžio bioįvairovei, o turi, kur tai įmanoma, ją didinti bei prisidėti prie kraštovaizdžio įvairovės. Ypač daug dėmesio turi būti skiriama rūšims, kurioms gresia išnykimas.

7. Išteklų naudojimo efektyvumo principas: gamtos ištekliai, tokie kaip dirvožemis, vanduo, oras, natūralios maitinančios medžiagos ir žemė, turi būti naudojami efektyviai ir biomasės auginimas bei panaudojimas neturi sukelti grėsmės jų kokybei ir kiekiui.

Taigi, šie principai į vientisą sistemą jungia socialines, ekonomines ir aplinkosaugines problemas, sudarydami pagrindą jų laikymosi stebėsenos sistemai sukurti.

### Išvados

AEI vartojimas Lietuvoje tik iš dalies tenkina darnios plėtros principus prisidedamas prie socialinės, ekonominės bei aplinkosauginės gerovės kūrimo.

### Literatūra

1. Pezzey J. Sustainable Development Concepts. An Economic Analysis. World Bank Environment paper number 2, ISBN 0-8213-2278-8. The World Bank, Washington, 1992.
2. Tsai W.T. Energy sustainability from analysis of sustainable development indicators: A case study in Taiwan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 7, pp. 2131–2138, 2010
3. Baležentis A. and Baležentis T. Sustainable energy development: trends of energy consumption and greenhouse gas emissions, *Ekonomika ir vadyba: aktualijos ir perspektyvos*, Vol. 4, no. 24, pp. 81–91, 2011.
4. Andersen O. Unintended Consequences of Renewable Energy. *Green Energy and Technology*, 2013.

### Application of sustainability principles to consumption of wind, solar and biomass energy sources

#### Summary

The application of sustainability principles to protection of environment, economic and social aspects of usage of wind, solar and biomass energy sources is analyzed. Currently biomass, wind and solar sources are already the most important sources for development of sustainable energy system in Lithuania. At the moment, the possibilities for testing such renewable energy sources for their sustainability are inadequate, because the system of criteria and indicators has not been developed on the EU level yet.

## **Biodegalų panaudojimo Lietuvoje aspektai ir poveikio aplinkai analizė**

Juozas Savickas, Vladislovas Katinas, Marijona Tamašauskienė  
Lietuvos energetikos institutas

Biodegalų pramonės atsiradimo ir plėtros idėja siejama su besikartojančiais teiginiais, kad sparčiai senkant iškastiniams energijos ištekliams, būtina alternatyvių degalų paieška transportui. Be to, biodegalų plėtra skatina papildomų darbo vietų kūrimą ir mažina aplinkos taršą. Lietuvoje transporto priemonių sukeliama atmosferos tarša priskiriama iki 70 %, todėl viena iš galimų efektyvių priemonių šiai taršai sumažinti yra mineralinių degalų pakeitimas biodegalais. ES šalys, pasirašiusios Kioto protokolą, pagal direktyvos 2003/30/EB reikalavimus įsipareigojo mažinti anglies dioksido emisiją, sutinkamai su kiekvienai šaliai rekomenduotais biodegalų gamybos ir vartojimo transporto kiekiais.

### **Biodegalų gamybos ir vartojimo raida Lietuvoje**

Biodegalų gamintojų požiūriu, biodegalų pramonė įgalina teigiamai spręsti daugelį svarbių problemų: mažinti žalingą poveikį aplinkai; sukurti papildomų darbo vietų skaičių pramonėje ir žemės ūkyje, racionaliai panaudojant nenaudojamus, dirvonuojančius žemių plotus; mažinti priklausomumą nuo iškastinio kuro rūšių ir stiprinti šalies energetinį nepriklausomumą.

Pirmieji žingsniai biodegalų gamybos srityje buvo pakankamai optimistiniai, bet praktiniai rezultatai – ganėtinai kuklūs. Pagal pateikiamas rekomendacijas buvo siūloma galimybė iš augalinio aliejaus patiems pasigaminti pigaus, beveik „*nieko nekainuojančio*“ biodyzelino. Vieno litro tokio biodyzelino gamybos savikaina turėjo neviršyti penktadalio mineralinio dyzelino kainos. Tačiau realiai biodegalų pramonės kūrimas ir plėtra vyko daug sudėtingiau, nes prireikė įveikti pakankamai daug ne tik technologinių naujovių, bet ir teisinių bei biurokratinių kliūčių.

Biodegalų (bioetanolio ir biodyzelino) gamybos pramonės kūrimas Lietuvoje nuo 1993 m. įveikė sudėtingą raidos kelią. Pirmi pramoniniai bandymai buvo atlikti UAB „Biostartas“. Kadangi tuo metu šalyje rapsų metilo esteris (RME) nebuvo gaminamas, reikalingi kiekiai sertifikuoto RME autocisternomis buvo importuojami iš Čekijos. Biodyzelino mišiniais su 5 % RME buvo prekiaujama dviejuose degalinėse. Tačiau netrukus ši verslininkų idėja, negavusi jokių dotacijų bei būtino Vyriausybės palaikymo, nepateisino verslininkų ekonominių lūkesčių ir žlugo.

Kuriantis ir stiprėjant teisei bazei, šalyje kūrėsi vietinės įmonės, kuriose buvo pradėti gaminti biodegalai. 2007 m. Lietuvos Nacionalinėje energetikos strategijoje buvo numatyta, kad 2020 m. biodegalai turės sudaryti 15 %, o 2025 m. – 20 % viso transporte suvartojamo degalų kiekio. Todėl siekiant įvykdyti Europos Parlamento ir Tarybos direktyvų rekomendacijas, biodegalų gamybos pajėgumai Lietuvoje 2008–2010 m., remiami subsidijomis, sparčiai didėjo. Biodyzelino gamintojų metiniai

pajėgumai sudarė 151 tūkst. tonų, bioetanolio 2007–2010 m. planuojami pajėgumai – 376 tūkst. tonų [1].

Optimistiniai biodegalų vartojimo transporte poveikio klimato kaitai aplinkosauginiai prioritetai paskatino visomis priemonėmis didinti biodegalų gamybos apimtis. Jau 2007 m. Lietuvoje pasiekti ES direktyvoje reikalaujami biodegalų gamybos kiekiai, o 2009 m. įvyko pakankamai staigus biodegalų gamybos apimčių šuolis dėl naujai įkurtų gamybos įmonių bei senųjų įmonių gamybos pajėgumų didėjimo. ES Direktyvoje **2009/28/EB** dėl skatinimo naudoti atsinaujinančių išteklių energiją buvo nustatyti privalomi planiniai rodikliai, pagal kuriuos 2020 m. visos suvartojamos energijos balanse atsinaujinančių išteklių energija turi sudaryti 20 %, o transporto sektoriuje šis rodiklis turi sudaryti 10 % [2].

Kompleksiškai įvertinus biodegalų vartojimo privalumus ir neigiamas puses ėmė ryškėti nauji aspektai. Atsirado poreikis papildyti ankstesnių direktyvų, susijusių su biodegalais, reikalavimus ir prognozes. Jau 2012 m. Europos Komisija dėl daugelio iškilusių ekonominių priežasčių buvo priversta keisti ankstesnių Direktyvų nurodytus tikslus. Planuota apsiriboti 6 % biodegalų priedais mineraliniams degalams. Lietuvos biodegalų gamintojams, investavusiems į biodegalų gamyklų statybas, dėl sumažėjusio biodegalų poreikio ir rinkų trūkumo, grėsė dideli finansiniai sunkumai [3].

### Biodegalų efektyvumo analizė

Plėtojant biodegalų gamybos apimtis, vis dažniau iškyla jų realios gamybos savikainos klausimai. Tai, kad atsinaujinančių energijos išteklių vartojimas kainuoja ne mažiau, bet dažnai ir daugiau nei tradicinių išteklių energija, paskatino įvertinti biodegalų gamybos ir vartojimo efektyvumą. Tai nesunkiai paskaičiuojama iš biodegalams gaminti suvartojamos energijos santykio su iš jų gaunamo energijos kiekiu.

$$\eta = \frac{\sum E_n}{\sum E_s}. \quad (1)$$

čia:  $E_n$  – energija, išgaunama vartojant biodegalus (MJ/t);

$E_s = (E_{žū} + E_{gam})$  – energijos sąnaudos biodegalams pagaminti (MJ/t), kur

$E_{žū}$  – energijos sąnaudos aliejingos kultūros sėkloms užauginti (MJ/t);

$E_{gam}$  – energijos sąnaudos RME pagaminti.

Lemiamos reikšmės biodyzelino gamybos savikainai turi rapsų derlingumas, kuris, esant vienodoms kitoms sąlygoms, mūsų šalyje yra dažnai nepastovus ir geroai mažesnis nei kitose ES šalyse. Be to, dėl nepalankių oro sąlygų, žeminių rapsų plotus dažnai tenka atsėti vasariniais, ir tai papildomai padidina gamybos išlaidas. Visuomenėje vyrauja dvi prieštaringos nuomonės dėl biodegalų gamybos įtakos maisto produktų kainoms mūsų šalyje. Netolimoje praeityje buvo teigiama,

kad didžiausią įtaką maisto produktų kainoms augti turi naftos ir jos produktų kainų didėjimas. Nepaisant to, kad dyzelinas sudaro tik 18 % energijos sąnaudų auginant rapsų derlių, tačiau didėjant naftos kainoms kartu didėja ir gamtinių dujų kainos, o gamtinės dujos yra pagrindinė mineralinių trąšų žaliava. Todėl, turėtų būti ryšys tarp iškastinių energijos išteklių ir maisto produktų kainų augimo. Tačiau pastarųjų metų naftos kainų ženklus kritimas pakoregavo šį, atrodytų neginčijamą, priklausomumą – nafta atpigė, o maisto produktų kainos augo. Tai leidžia teigti, kad lemiamos įtakos gali turėti politiniai sprendimai. Valstybės subsidijos, teikiamos biodegalų gamintojams, kurių pvz., 2014 m. išmokėta per 8 mln. EUR (28 mln. litų) [4], palengvina gamintojų darbus, bet į degalų savikainos išlaidas turi būti įskaičiuotos ir jų nė kiek nesumažina.

### **Alternatyvūs degalai**

Pastarųjų metų praktikuota biodegalų vartojimo patirtis nevisiškai pateisino jiems keliamus reikalavimus. Kiti alternatyvūs degalai transporte – suspaustos gamtinės dujos – realiai užima dalį šios rinkos. Yra tikimybė, kad tai gali sudaryti prielaidas ir biodujų vartojimui transporte, kurios šiuo metu tuo tikslu nevartojamos visų pirma dėl to, kad jų pagaminami kiekiai yra palyginti maži, todėl ekonomiškai nuostolinga taikyti biodujų valymo technologijas, kas būtina prieš jas vartojant degalais transporte ar tiekiant į gamtinių dujų tinklus.

Iš kitų alternatyvių degalų, planuotų transportui – vandenilis, kuris 2015 m. turėjo sudaryti 2%, kol kas realiai šalyje nenaudojamas. Taip pat kelia abejonių, ar 2020 m. vandenilis sudarys įsipareigotus 5 % degalų transporte.

### **Išvados**

1. Keičiantis ES Tarybos nuostatomis 1-os kartos biodegalų gamybos atžvilgiu, būtina atitinkamai reaguoti į pirmos kartos biodegalų gamybos pajėgumų optimizavimą šalyje, nes jie gerokai viršija vartojimui reikalingus kiekius, o gamintojai, gaudami dideles finansines subsidijas, biodegalus eksportuoja. Todėl būtina vyriausybiniu lygiu skubiai koordinuoti 2-os kartos biodegalų gamybos programų kūrimo, taikomųjų bei mokslo-tiriamųjų darbų technologijų tobulinimo finansavimo teisinius klausimus.
2. Sprendžiant transporto neigiamo poveikio aplinkai mažinimo klausimus, mažinant 1-os kartos biodegalų gamybą iš maistui tinkamų žaliavų, bet, sekant Vakarų Europos šalių pavyzdžiu, rekomenduojama aktyviau remti alternatyvių degalų vartojimą transporte bei skatinti ekologiškesnio transporto (pvz., elektromobilių) platesnį naudojimą.
3. Pradedant 2-os kartos biodegalų gamybos galimybių tyrimus šalyje, tikslinga įvertinti jų gamybos potencialą, nes praktiškai dauguma šių išteklių gali būti tiesiogiai panaudojama šiluminei energijai gaminti.

## Literatūra

1. Nacionalinė energetikos strategija, patvirtinta LR Seimo 2007 m. sausio 18 d. Nutarimu Nr. X-1046. Valstybės žinios, 2007, Nr.II-430.
2. Europos parlamento ir tarybos direktyva 2009/28/EB [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_2009\\_140.01.0016.01.LIT#ntr3-L\\_2009140LT.01005201-E0003](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_2009_140.01.0016.01.LIT#ntr3-L_2009140LT.01005201-E0003)
3. Katinas V., Savickas J. Biodegalų gamybos ir vartojimo plėtros Lietuvoje įvertinimas. *Energetika*. 2012. T.58. Nr. 2.P. 77-85.
4. <https://www.nma.lt/index.php/aktualijos/biodegalu-gamintojams-28-mln-litu-paramos/4719>
5. <http://www.theguardian.com/environment/climate-consensus-97-percent/2013/sep/11/global-warming-ethanol-will-o-wisp>

### **The aspects of application of biofuel in Lithuania and analysis of environmental impact**

#### Summary

The article provides an overview of the biofuel industry development in Lithuania from 1993 till 2015. The increasing roles of biofuel production, integrated in the other technology together with other types of alternative fuels, are shortly analyzed. A brief summary of the analysis of development experience of biofuels, such as bioethanol and biodiesel, is presented. Despite the EU Directives and other legal acts and the national normative documents for renewable energy development in Lithuania, practical implementation of legal regulation is uneven. More attention for the production and use of second-generation biofuels is required according to the changed specification of EU Directives, which lead to the decrease of biofuel production.

## Biologiškai skaidžių atliekų panaudojimo energetikoje tyrimas

Eugenijus Perednis, Vladislovas Katinas, Juozas Savickas

Lietuvos energetikos institutas

Augant Europos Sąjungos ekonomikai, daugėja susidarančių biologiškai skaidžių atliekų, darančių didelę žalą aplinkai ir neigiamą poveikį sveikatai bei gyvenimo kokybei, be to, joms tvarkyti be reikalo švaistomos lėšos ir energija. ES požiūris į atliekų tvarkymą pagrįstas trimis principais: atliekų prevencija, antrinis perdirdimas ir panaudojimas, geresnis galutinis šalinimas. Pagrindiniai ES teisės aktai [1, 2] nustatė atliekų tvarkymo būdų hierarchiją, kuria siekiama užtikrinti, kad kiekviena valstybė narė remtų labiausiai aplinką tausojančius sprendimus.

Atliekų tvarkymas Lietuvoje – prioritetinė aplinkos apsaugos sritis, kurios svarba nurodyta Valstybinėje aplinkos apsaugos strategijoje [3]. 2012 m. žemės ūkyje šiaudų susidarė virš 3,2, grūdų valymo atliekų – 0,19, mėšlo – 3,4 ir srutų – 1,72 mln. t. Metinis šiaudų gamybos potencialas siekia 4 mln. tonų. Apie 25–40 % šio kiekio sunaudojama pašarams ir kraikui, dalis lieka laukuose ir apie 60 % šiaudų derliaus nepanaudojama. Beveik 55–75 % šio kiekio gali būti panaudota energetinėms reikmėms. Šalyje smulkūs ūkininkų ūkiai (3–10 ha.) sudaro 41 % visų ūkių skaičiaus. Juose auginama apie 80 % galvijų ir apie 35 % kiaulių. Ūkiuose susidarantys dideli mėšlo ir srutų kiekiai kelia rūpestį gamtosaugininkams. Maisto pramonės įmonėse susidarančių biologiškai skaidžių atliekų tvarkymo programos paskirtis įgyvendinti biologiškai skaidžių atliekų tvarkymą.

Ūkininkų ūkių registro ir Lietuvos Respublikos 2010 m. visuotinio žemės ūkio surašymo rezultatų duomenimis, Lietuvoje 2010 m. buvo įregistruoti 106986 ūkininkų ūkiai. Jų valdomas bendras žemės plotas sudarė 1040808,72 ha, (1 lentelė), o vidutinis ūkio dydis siekė 9,73 ha. Ūkininkai valdė daugiau kaip 86 % visos Lietuvoje dirbamos žemės. 2013 m. buvo įregistruoti 116911 ūkininkų ūkiai, o jų žemės plotas sudarė 942843 ha.

1 lentelė. Ūkininkų ūkių pasiskirstymas pagal ūkių skaičių 2010 ir 2013 m.

| Intervalas, ha | 2010 m        |    | 2013 m        |    |
|----------------|---------------|----|---------------|----|
|                | Ūkių skaičius |    | Ūkių skaičius |    |
|                | Vnt.          | %  | Vnt.          | %  |
| 0-3            | 30044         | 28 | 44576         | 31 |
| 3--10          | 45316         | 42 | 46906         | 41 |
| 10–50          | 30012         | 28 | 23927         | 26 |
| >50            | 1814          | 2  | 1502          | 2  |

Šalyje vyraujantys ūkininkų ūkiai yra nuo 3 iki 10 ha. Jų skaičius (46906) sudaro 41 % visų ūkininkų ūkių skaičiaus. 31 % proc. (44576) sudaro ūkiai iki 3 ha,

26 % (23927) – ūkiai, kurių bendras žemės plotas yra nuo 10 iki 50 ha.

Biodegraduojančioms atliekoms tvarkyti ūkininkų ir šeimos gyvulininkystės bei paukštininkystės ūkiuose, kurie nėra dideli, perspektyvu taikyti mažų gabaritų bioreaktorius. Todėl nagrinėjant Lietuvos ūkius daugiausia dėmesio skiriama galvijininkystės, kiaulininkystės, paukštininkystės ūkiams, kurių Lietuvoje yra daugiausia. Europoje plačiai naudojami įvairių konstrukcijų, nedideli, iki 50 m<sup>3</sup> našumo bioreaktoriai. Vieni paprasčiausių – plėvele uždengti mėšlo talpyklos, kurių danga praleidžia saulės spindulius ir sulaiko biomasėje akumuluotą šilumą bei išsiskyrusias biodujas. Biodujų gamybos procesas tokiomis sąlygomis vyksta psichrofilinėje aplinkoje, esant substrato temperatūrai 10–25 °C ribose. Šiuo atveju nereikia papildomo šilumos šaltinio procesui palaikyti, ypač vasaros metu. Tokiu pačiu principu bioreaktoriuje galima įrengti cilindro formos talpyklą, tačiau šiuo atveju tinkamesnis mezofilinis temperatūrinis režimas (25–40 °C). Augalininkystės ūkiuose susidaro nemažai bioskaidžių atliekų – tai vaisių, daržovių ūkio naudmenų priežiūros ir tvarkymo atliekos. Dauguma ūkininkų susidarancias atliekas naudoja gyvulių pašarams arba kompostuoja, todėl pagrindinė smulkiems ūkiams tenkanti problema – gyvulininkystės ir paukštininkystės ūkiuose susidarancias srutos ir gyvūninės kilmės atliekos.

Įvairius mažų gabaritų bioreaktorius siūloma naudoti įmonėms kaip bandomuosius. Jos gali naudoti įvairių mišinių substratus: įvairų silosą, gyvulių srutas, riebalus ir aliejaus atliekas, vaisių ir daržovių, pieno produktus, grūdus, viešojo maitinimo įstaigose susidarancias biologiškai skaidžias atliekas, skerdyklų atliekas. Svarbu teisingai parinkti įvairių perdirbamų biodegraduojančių atliekų sudėtį ir užtikrinti temperatūrinį režimą. Biodujų gamyba taip pat priklauso ir nuo metų sezono įtakos. Daugeliui įmonių tai yra perspektyvi alternatyva gauti šilumai ir elektros energijai bei spręsti gamtosaugines problemas. Tačiau biodujų gamyba visų pirma sprendžia ne tik elektros energijos ir šilumos gamybos, bet ir ekologines problemas. Kaupiant mėšlą atviroje vietovėje ar srutas – atvirose lagūnose, į atmosferą garuoja amoniakas bei, vykstant psichrofiliniam procesui, išsiskiria biodujos, turinčios įtakos klimato kaitos procesui. O anaerobiškai apdorojant organines atliekas uždaruose bioreaktoriuose, pasigaminančios biodujos neišsiskiria į atmosferą, o naudingai sunaudojamos energijai gaminti.

Mažo našumo bioreaktorių rekomenduojama diegti ūkiuose, turinčiuose ne mažiau kaip penkis gyvulius. Apklausos rezultatų duomenimis, ūkininkai, turintys kelias karves, papildomai augina dar kelis gyvulius, todėl ir į bioreaktorių gali būti vienu metu tiekiamos kelių rūšių galvijų srutos. Ūkių skaičius mažėja, didėjant ūkyje auginamų galvijų skaičiui. Galvijų skaičiaus pasiskirstymas kaimo ūkiuose pateiktas 2 lentelėje. Skaičiavimams priimama vienoda kelių skirtingų galvijų mėšlo išeiga – 40,5 kg/para/galv.

Žinant ūkyje auginamų galvijų skaičių ir mėšlo išeigą iš vieno gyvulio, galima apskaičiuoti susidarancio mėšlo kiekį. Galvijininkystės ūkiuose naudojant laistymo

sistemas srutų kiekis vidutiniškai padidėja 1,5 karto.

2 lentelė. Bioreaktorių taikymas galvijininkystės, kiaulininkystės ir paukštininkystės ūkiuose

| Bioreaktoriaus tūris, m <sup>3</sup> | Gyvulininkystės ūkiai |                | Paukštininkystė   |
|--------------------------------------|-----------------------|----------------|-------------------|
|                                      | Galvijininkystė       | Kiaulininkystė |                   |
|                                      | Gyvulių skaičius      |                | Paukščių skaičius |
| 5                                    | 5–10                  | 30–50          | 800–1500          |
| 10                                   | 11–20                 | 51–100         | 1501–3000         |
| 20                                   | 21–30                 | 101–200        | 3001–5000         |
| 30                                   | 31–40                 | 201–300        | 5001–7000         |
| 40                                   | 41–50                 | 301–400        | 7001–10000        |
| 50                                   | 51–60                 | 401–500        | 10001–15000       |

Nuo bioreaktoriuose įkrauto substrato rūšies priklauso biodujų išeiga. Iš 1 m<sup>3</sup> biodujų galima pagaminti iki 2 kWh elektros ir 3,4 kWh šilumos energijos. Todėl daugėjant į bioreaktorių tiekiamų bioskaidžių atliekų, išgaunama daugiau biodujų, o tai leidžia pagaminti daugiau šilumos ir elektros energijos. Siekiant išgauti didesnę energetinį efektyvumą, ūkiams siūloma kooperuotis. Dauguma didesnių ūkių turi savo skerdienos perdirbimo cechus, todėl siekiant išgauti didesnę biodujų išeigą, galvijų srutas būtina maišyti su gyvulinės kilmės atliekomis, dėl to biodujų išeiga padidėja apie 1,5 karto.

Kiaulių mėšlo išeiga yra mažesnė nei galvijų, todėl 5 m<sup>3</sup> mažų gabaritų bioreaktorius gali aptarnauti ūkį, turintį 30–50 kiaulių. Atsižvelgiant į kiaulių skaičių, tokio tūrio įrenginys per metus anaerobiškai gali apdoroti 80 tonų atliekų, o auginant 400–500 kiaulių – 760 tonas.

Igyvendinant Kaimo plėtros 2007–2013 m. programos priemones, Lietuvos žemės ūkio politika buvo sutelkta į žemės ūkio modernizavimą ir intensyvumo didinimą. Daug projektų įgyvendinta ūkių valdoms modernizuoti, jaunųjų ūkininkų ūkiams įkurti. Lietuvos žemės ūkio plėtros po 2013 m. strateginis tikslas – sudaryti sąlygas šalies ūkininkams sukurti pelningą ir į ilgalaikę perspektyvą orientuotą, moderniomis gamtą tausojančiomis technologijomis pagrįstą ir iš kartos į kartą perduodamomis ūkininkavimo tradicijomis verslą, kuris patenkintų kokybiškų žemės ūkio ir maisto produktų paklausą vietos rinkoje ir užtikrintų eksporto galimybes. Lietuvos žemės ūkio strategijos 2014–2020 m. kryptyse numatyta, kad būtina didinti smulkiųjų ir vidutinių ūkių gyvybingumą ir tuose ūkiuose sukuriamą pridėtinę vertę, plačiau diegti inovacijas ir skatinti žinių perdavimą, plėtoti gyvulininkystę, žemės ūkyje racionaliau panaudoti šalies gamtinius ir žmoniškuosius išteklius.

### **Išvados**

1. Daugelį Lietuvos žemės ūkių sudaro smulkūs ūkiai, kuriuose auginama iki 20 galvijų. Iš viso šiuose ūkiuose auginama 276 tūkst. galvijų ir tai sudaro 38 % visų gyvulių. Tinkamiausias tokio dydžio ūkiuose yra 20 m<sup>3</sup> bioreaktoriaus modulis. Auginantiems daugiau galvijų efektyviausia diegti 50 m<sup>3</sup> tūrio bioreaktorius.
2. Lietuvoje kiaulininkystės sektoriuje taip pat vyrauja smulkūs ūkiai, kuriuose auginama iki 500 kaulių. Šiems ūkiams tinkamiausia diegti 50 m<sup>3</sup> bioreaktorių. Siekiant išgauti didesnę biodujų išėigą, į substratą įmaišomos gyvūnines kilmės atliekos, kurioms apdoroti būtina įrengti 2 m<sup>3</sup> pasterizacijos bioreaktoriaus modulį.
3. Vidutinis bioreaktorių atsipirkimo laikas siekia 3–6 metus. Gyvulininkystės ūkyje 50 m<sup>3</sup> įdiegtas bioreaktorius atsipirktų per 4 metus, kiaulininkystės – 4,5, paukštininkystės – per 3 metus. Nors mažesnio našumo, iki 20 m<sup>3</sup>, bioreaktorių atsipirkimo laikas yra ilgesnis ir siekia apie 9 metus, tačiau įvertinus įrenginio aplinkosauginį efektą bei Europos Sąjungos paramą, įrenginio atsipirkimo laikas gali gerokai sutrumpėti.
4. Išanalizuotos Lietuvos žemės ūkio strategijos kryptys 2014–2020 m, siekiant didinti smulkiųjų ir vidutinių ūkių gyvybingumą ir tuose ūkiuose sukuriamą pridėtinę vertę, diegiant inovacijas ir skatinant žinių perdavimą.

### **Literatūra**

1. Directive 2008/98/EC of the european parliament and of the council of 19 November 2008, on waste and repealing certain Directives
2. Council Directive (99/31/EC) of 26. April 1999 on the landfill of waste (LFD).
3. Valstybinė aplinkos apsaugos strategija, Lietuvos Respublikos Seimo patvirtinta 1996 m. rugsėjo 25 d. nutarimu Nr. I-1550 (Žin., 1996, Nr. 103-2347).

### **Investigation of application of biodegradable waste in energy**

#### **Summary**

In this article, biodegradable vegetables and animal waste generated in agriculture utilization are overviewed. Small rural farms according to their size, relative generated biodegradable waste and specifics were analysed. The information was collected on the low power bioreactor, its structure, principles of operation, scalability.

## Vėjo parametrų pasiskirstymo dėsningumų tyrimas

Donatas Sankauskas, Vladislavas Katinas  
 Lietuvos energetikos institutas

Atliekant vėjo greičių pasiskirstymo statistines analizes, viena dažniausiai taikomų funkcijų vėjo greičių pasiskirstymui aprašyti – Veibulo funkcija.

Veibulo tikimybių pasiskirstymo tankio funkcija aprašoma (1) formule. Koeficientas  $k$  aprašo Veibulo funkcijos formą. Koeficientas  $c$  aprašo vidutinį vėjo greitį. Taikant  $k$  ir  $c$  koeficientus, galima apskaičiuoti teoriškai dažniausiai pasitaikantį vėjo greitį (2), t. y. (2) formulė aprašo Veibulo funkcijos maksimumą [2]. Taip pat galima apskaičiuoti teorinį galios tankį (3), tai atitinka plotą, esanti po kreive.

Tačiau  $k$  ir  $c$  koeficientams apskaičiuoti taikomi įvairūs metodai [1, 2]. Dažniausiai taikomi metodai šiems koeficientams nustatyti: didžiausios tikimybės metodas, galios tankio metodas, vidutinio standartinio nuokrypio metodas. Yra ir empiriniai galios tankio ir vidutinio standartinio nuokrypio metodai [1], pagal kuriuos nereikia atlikti skaičiavimų priartėjimo keliu skaičiuojant  $k$  ir  $c$  koeficientus.

Veibulo tikimybių pasiskirstymo tankio funkcija apskaičiuojama:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v_i}{c}\right)^{k-1} \exp \left[ -\left(\frac{v_i}{c}\right)^k \right]; \quad (1)$$

$k$  ir  $c$  koeficientais apskaičiuojamas dažniausiai pasitaikantis vėjo greitis:

$$V_f = c \left( \frac{k-1}{k} \right)^{1/k}, \text{ m/s}; \quad (2)$$

Galios tankis apskaičiuojamas pagal formulę

$$P = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left( 1 + \frac{3}{k} \right), \text{ W/m}^2 \quad (3)$$

$$k = \left[ \left( \frac{\sum_{i=1}^N v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^N v_i^k} \right) - \left( \frac{\sum_{i=1}^N \ln(v_i)}{N} \right) \right]^{-1}; \quad (4)$$

Veibulo funkcijos koeficientams nustatyti yra daug metodų, vienas populiariausių – didžiausios tikimybės metodas. Kadangi  $k$  koeficientas yra abiejose

(4) formulės lygybės pusėse, tai šiuo atveju,  $k$  koeficientą reikia skaičiuoti priartėjimo keliu.

Apskaičiavus koeficientą  $k$ , apskaičiuojamas koeficientas  $c$  pagal (5) formulę:

$$c = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^k \right)^{\frac{1}{k}}, \text{ m/s}; \quad (5)$$

Galios tankio metodas buvo pasiūlytas gan neseniai [3]. Šiuo metodu paprasčiau apskaičiuojami  $k$  ir  $c$  koeficientai. Koeficientas  $k$  apskaičiuojamas sulyginant (6) ir (7) formules:

$$E_{pf} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^3}{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \right)^3}; \quad (6)$$

$$E_{pf} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{k}\right)}; \quad (7)$$

Taip pat šis metodas turi ir supaprastintą  $k$  koeficiento apskaičiavimą:

$$k = 1 + \frac{3,69}{E_{pf}^2}; \quad (8)$$

Apskaičiavus  $k$  koeficientą galios tankio metodu, koeficientas  $c$  apskaičiuojamas:

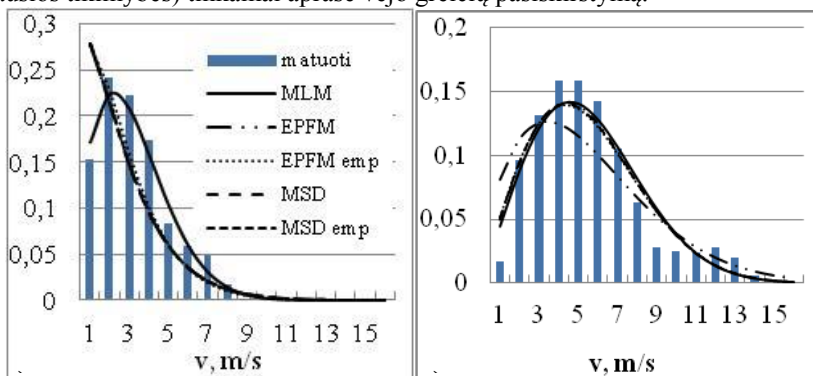
$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}, \text{ m/s}; \quad (9)$$

Standartinio nuokrypio metodas patogus tuo, kad daugelis vėjo greičio matavimo prietaisų automatiškai apskaičiuoja standartinį nuokrypį, dėl to supaprastėja tolesni skaičiavimai. Sprendžiant (10) formulę, apskaičiuojamas  $k$  koeficientas. Kaip ir galios tankio metodas, šis metodas turi ir supaprastintą  $k$  koeficiento apskaičiavimą (11)

$$\left(\frac{\sigma_v}{v}\right) = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1; \quad (10)$$

$$k = \left(\frac{\sigma_v}{v}\right)^{-1,086} \quad (11)$$

Skaičiavimai atlikti naudojant skirtingų vietovių vieno mėnesio duomenis. Giruliuose matavimai atlikti dviejuose aukščiuose (30 m ir 60 m). Kadangi arti bokšto yra miškas, tai 30 m aukštyje vyraujantys vėjo greičiai 2–3 m/s. Didžioji dalis vėjo greičių yra 1–4 m/s intervale (1 a) pav.), tai tik vienas metodas (didžiausios tikimybės) tinkamai aprašė vėjo greičių pasiskirstymą.



1 pav. Veibulo pasiskirstymo funkcija, Giruliai. a) 30 m aukštyje, b) 60 m aukštyje. Koeficientai apskaičiuoti: didžiausios tikimybės metodu (MLM), galios tankio metodu (EPFM), galios tankio empiriniu metodu (EPFM emp), vidutinio standartinio nuokrypio metodu (MSD), vidutinio standartinio nuokrypio empiriniu metodu (MSD emp).

1 b) pav. išsiskyrė tik EPFM metodas. Kaip tolesni skaičiavimai parodė, šis metodas prasčiausiai aprašė vėjo greičių pasiskirstymus nagrinėtais atvejais – apskaičiuotas vidutinis greitis mažesnis, nei išmatuotas, o apskaičiuotas galios tankis didesnis, nei apskaičiuotas momentinių vėjo greičių vidutinis galios tankis (1 lentelė).

1 lentelė. k ir c koeficientai Giruliuose

| Metodas | k    |      | c<br>m/s |      | Koreliacijos<br>koef. |      | P<br>W/m <sup>2</sup> | P<br>W/m <sup>2</sup> |
|---------|------|------|----------|------|-----------------------|------|-----------------------|-----------------------|
|         | 30m  | 60m  | 30m      | 60m  | 30m                   | 60m  | 30m                   | 60m                   |
| MLM     | 1,75 | 2,09 | 3,54     | 6,23 | 0,99                  | 0,97 | 41,46                 | 184,5                 |
| EPFM    | 1,21 | 1,64 | 2,60     | 6,09 | 0,87                  | 0,90 | 34,38                 | 233,6                 |
| EPFMemp | 1,31 | 1,99 | 2,65     | 6,15 | 0,88                  | 0,97 | 29,70                 | 186,1                 |
| MSD     | 1,21 | 2,01 | 2,60     | 6,15 | 0,87                  | 0,97 | 34,65                 | 184,5                 |
| MSDemp  | 1,22 | 2,03 | 2,61     | 6,15 | 0,87                  | 0,97 | 33,89                 | 182,2                 |

Analogiški skaičiavimai atlikti su vėjo greičių duomenimis iš Sarnate (Latvija) bei Virtsu (Estija). Abejose vietovėse, kaip ir aukščiau atliktuose skaičiavimuose, išsiskyrė EPFM metodas, kaip prasčiausiai aprašantis vėjo greičių pasiskirstymus (2 lentelė). Atsižvelgiant į koreliacijos koeficientą ir galios tankių palyginimus, matome, kad duotuoju atveju, Sarnate Veibulo pasiskirstymo funkcijos koeficientus galima tiksliau nustatyti taikant MLM metodą, o Virtsu – EPFM emp.

2 lentelė. k ir c koeficientai Sarnate ir Virtsu

| Metodas | k    |      | c<br>m/s |      | Koreliacijos<br>koef. |      | P<br>W/m <sup>2</sup> | P<br>W/m <sup>2</sup> |
|---------|------|------|----------|------|-----------------------|------|-----------------------|-----------------------|
|         | S*   | V**  | S*       | V**  | S*                    | V**  | S*                    | V**                   |
| MLM     | 2,29 | 2,56 | 6,18     | 6,07 | 0,95                  | 0,99 | 352,3                 | 146,0                 |
| EPFM    | 1,82 | 1,94 | 5,12     | 6,10 | 0,89                  | 0,95 | 445,6                 | 186,9                 |
| EPFMemp | 2,32 | 2,54 | 6,25     | 6,10 | 0,95                  | 0,99 | 351,9                 | 148,2                 |
| MSD     | 2,33 | 2,63 | 6,25     | 6,09 | 0,95                  | 0,99 | 351,7                 | 144,7                 |
| MSDemp  | 2,34 | 2,64 | 6,28     | 6,09 | 0,95                  | 0,99 | 349,4                 | 144,3                 |

S\* - Sarnate; V\*\* - Virtsu.

Kaip matome iš 1 lentelės ir 2 lentelės, vien koreliacijos koeficientas tiksliai nenusako, kuris metodas labiausiai tinka koeficientams nustatyti, patogiau lyginti galios tankius, apskaičiuotus (3) formule.

Pridėjus vėjo greičių matavimo duomenis iš dar kelių skirtingų vietovių, apskaičiuota galios tankio santykinė paklaida (3 lentelė).

3 lentelė. Santykinės paklaidos

| Metodas | Santykinė paklaida, % |
|---------|-----------------------|
|         |                       |
| MLM     | 5,6                   |
| EPFM    | 25,8                  |
| EPFMemp | 1,0                   |
| MSD     | 3,1                   |
| MSDemp  | 3,0                   |

Reikia paminėti, kad atmetus Girulių matavimo duomenis 30 m aukštyje, MLM metodo paklaida sumažėja iki 1 procento.

### Išvados

1. Veibulo pasiskirstymo funkcijos koeficientams nustatyti yra daug metodų. Atsižvelgiant į vėjo greičių pasiskirstymą, vietovę, koeficientų nustatymo metodai gali būti skirtingi.
2. Vyraujant mažiems vėjo greičiams, tik didžiausios tikimybės metodas leidžia tiksliausiai nustatyti koeficientus.
3. Išnagrinėti atvejai parodė, kad empirinėmis formulėmis apskaičiuoti koeficientai gerai aprašo vėjo greičių pasiskirstymą.

### Literatūra

1. Salahaddin A. Ahmed. Comparative study of four methods for estimating Weibull parameters for Halabja, Iraq, *International Journal of Physical Sciences* Vol. 8(5), pp. 186-192, 9 February, 2013.
2. Oyedepo O. et al.: Analysis of wind speed data and wind energy potential in three selected locations in south-east Nigeria, *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 2012 3:7.
3. Akdag S.A., Ali D. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications, *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, pp. 1761-1766, July, 2009.

### Investigation of regularities of wind parameter distribution

#### Summary

For analysis of wind speed distribution, most often Weibull distribution function is used. Comparison of a few methods for calculation of Weibull function coefficients was made in this paper. The maximum probability method showed most reliable results. However, there is no best method for calculation of most precise parameters for any location.

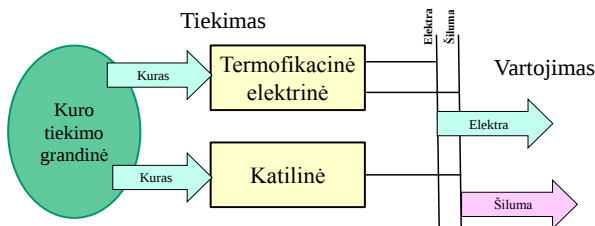
## Biokuro tiekimo energetikos sektoriui grandinės modeliavimas

Arvydas Galinis, Vidas Lekavičius  
Lietuvos energetikos institutas

**Platesnio atsinaujinančių energijos išteklių (AEI) naudojimo poreikis.** Lietuvoje, tuo pačiu ir visoje Europos Sąjungoje, nemažą AEI dalį gali sudaryti biomasė – mediena ir žemės ūkio produktai bei jų gamybos atliekos. Nuolat augantis AEI poreikis energetikos sektoriuje ne tik turės įtakos energetikos raidai, bet ir sąlygos išorinių ekonominių efektų formavimąsi. Atsižvelgiant į tai, svarbu korektiškai įvertinti šių išteklių išgavimo, tiekimo ir vartojimo galimybes, analizuojant energetikos sektoriaus perspektyvinę plėtrą ir funkcionavimą. Šiame straipsnyje daugiausia dėmesio skiriama biomasės auginimui modeliuoti.

**Energetikos sektoriaus perspektyvinės plėtros ir funkcionavimo analizės priemonės.** Energetikos sektoriaus perspektyvinės plėtros ir funkcionavimo analizė paprastai vykdoma pasitelkiant atitinkamus ekonominio modeliavimo paketus: MESSAGE [1], MARKAL [2], BALMOREL [3], OSeMOSYS [4] ir kitus. Energetikos sektorių matematiniuose modeliuose įprasta reprezentuoti naudojant orientuotą grafą. Grafo šakos vaizduoja technologijas, t. y., procesus, vykstančius energetikos sektoriuje, o grafo mazgai – atskiras kuro ar energijos rūšis. Todėl matematiniame modelyje suformuojama aibė tarpusavyje persipynusių energijos tiekimo grandinių, bendru atveju apimančių visus procesus, pradedant energetinių resursų išgavimu ir baigiant galutiniu ar naudingu energijos vartojimu. Energetikos sektoriaus perspektyvinės plėtros ir funkcionavimo analizė leidžia gauti pasirinkto kriterijaus (dažniausiai suminių diskontuotų išlaidų sektoriaus plėtrai ir funkcionavimui) atžvilgiu optimalią technologijų ir energetinio balanso struktūrą tiek ilgalaikėje perspektyvoje, tiek ir atskiruose charakteringuose energetikos sektoriaus funkcionavimo režimuose. Žvelgiant iš matematinio modelio, orientuoto grafo pozicijų optimalus energetikos sektoriaus raidos ir funkcionavimo sprendinys rodo tas pirminio orientuoto grafo grandis, kuriomis energetiniai ištekliai pasiekia galutinį vartotoją, koks srautas, tuo pačiu ir technologijos galia yra kiekvienoje orientuoto grafo (kiekvienoje energetikos sektoriaus) vietoje.

Energetikos sektoriaus orientuoto grafo (schemos) pavaizdavimo principas parodytas 1 pav. Energetikos sektoriaus matematinio modelio grafo (schemos) fragmente daugiausia dėmesio skiriama dviem *mazgams*, pažymėtiems „Elektra“ ir „Šiluma“, taip pat dviem *technologijoms* „Termofikacinė elektrinė“ ir „Katilinė“. (Bendru atveju mazgų ir technologijų gali būti labai daug). Šie elementai yra pagrindiniai matematinėse lygtyse, aprašančiose energetikos sektoriuje vykstančius procesus [1].



1. pav. Energetikos sektoriaus matematinio modelio schemos fragmentas

Vienos pagrindinių lygčių matematiname modelyje yra energijos balansų grafo mazguose lygtys. 1 pav. parodyto grafo atveju energijos balanso lygtis galutiniame grafo (schemos) mazge yra:

$$\sum_{j=1}^{j=J} \sum_{k=1}^{k=K} \eta_{kijt} \times x_{kijt} \geq D_{it}; \quad (1)$$

čia:  $x_{kijt}$  – energijos  $j$  įėjimas į technologiją  $k$ , gaminančią energijos rūšį  $i$  laikotarpiu  $t$ ;  $\eta_{kijt}$  – technologijos  $k$ , iš energijos rūšies  $j$  gaminančios energijos rūšį  $i$ , naudingo veiksmo koeficientas laikotarpiu  $t$ ;  $D_{it}$  – energijos  $i$  poreikis laikotarpiu  $t$ .

Energijos balanso lygtis bet kuriame tarpiniame energetikos sektoriaus grafo (schemos) mazge yra:

$$\sum_{j=1}^{j=J} \sum_{k=1}^{k=K} \eta_{kijt} \times x_{kijt} \geq \sum_{m=1}^{m=M} \sum_{l=1}^{l=L} x_{lmit}; \quad (2)$$

čia:  $x_{lmit}$  – technologijos  $l$ , gaminančios energiją  $m$ , energijos  $i$  suvartojimas (įėjimas) laikotarpiu  $t$ .

Kitą pagrindinę lygčių grupę energetikos sektoriaus plėtros ir funkcionavimo matematinuose modeliuose sudaro technologijų galios lygtys. 1 pav. pavaizduotos „Termofikacinės elektrinės“ ar „Katilinės“ galios lygtys, pašalinus vartojamos ir gaminamos energijos rūšių indeksus, atrodytų taip:

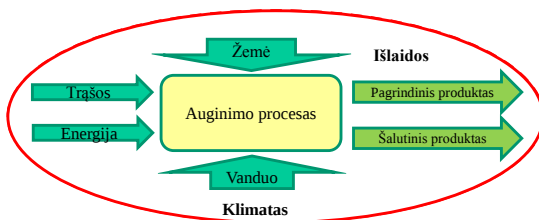
$$\frac{\eta_t \cdot x_t}{\tau_t} - \sum_{r=1}^{r=R-1} \Pi_t \cdot y_r \leq \Pi_t \cdot Y_o; \quad (3)$$

čia:  $\tau_t$  –  $t$ -ojo laikotarpio trukmė;  $\Pi_t$  – technologijos galios išnaudojimo

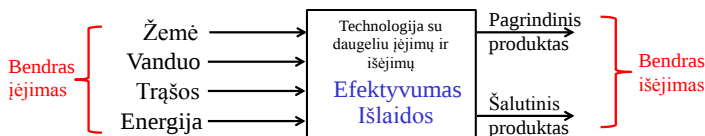
koeficientas  $t$ -uoju laikotarpiu;  $y_r$  –  $r$ -aisiais metais naujai instaliuota technologijos galia;  $Y_o$  – istorinė technologijos galia (galia buvusi prieš nagrinėjamo laikotarpio pradžią, bet įvertinanti galios sumažėjimą baigus eksploatuoti, technologiją, pasibaigus jos eksploatavimo laikui).

Iš pateiktų pagrindinių matematinio modelio lygčių matyti, kad kiekvienam reprezentuojamam procesui reikia numatyti įėjimo ir išėjimo energijos formas, proceso (technologijos) naudingo veikimo koeficientą ir galią. Be to, atitinkamai reikia įvertinti investicijas bei kintamąsias ir pastoviąsias eksploatacines išlaidas, statybos ir eksploatavimo laikus ir kai kuriuos kitus rodiklius. Modeliuojant AEI tiekimo grandinės energetikos sektoriaus netipinis, tačiau itin reikšmingas ekonominės analizės ir išorinių ekonominių efektų prasme elementas yra biomasės auginimo procesas. Kiti AEI tiekimo grandinėje vykstantys procesai kaip skiedrų, granulių ar briketų, biodujų ar skystųjų biodegalų gamyba, jų transportavimas ir paskirstymas yra labai artimi energetikos sektoriuje vykstantiems procesams. Jų modeliavimo šiam straipsnyje plačiau nenagrinėsime, tačiau išsamiai apžvelgsime kaip energetikos plėtos ir funkcionavimo matematinuose modeliuose gali būti reprezentuojami atskirų augalų (pavyzdžiui, žemės ūkio kultūrų) auginimo procesai.

**Augalų (biomasės) auginimo proceso modeliavimas.** Bet kurio augalo auginimo procesas schematiškai gali būti pavaizduojamas taip, kaip parodyta 2a pav.



a) Augalo auginimo procesas



b) Augalų auginimo proceso reprezentavimas energetikos plėtos ir funkcionavimo matematiniam modelyje

2 pav. Augalų auginimo modeliavimas

Bendru atveju, auginant augalus galima gauti pagrindinį produktą, pavyzdžiui, grūdus ir šalutinį produktą (ar produktus), pavyzdžiui, šiaudus. Šių produktų išeiga priklauso nuo žemės ploto, kuriame nagrinėjama kultūra auginama, žemės

derlingumo (tai gali būti įvertinama, jei žemės ūkio naudmenos papildomai skirstomos pagal žemės tipą), tręšimo, energijos, reikalingos žemei įdirbti, augalų priežiūrai, jų sėjai ir derliui nuimti, taip pat drėgmės kiekio ir jo pasiskirstymo laike augalo vegetacijos laikotarpiu.

Augalo auginimas susijęs su tam tikromis išlaidomis – išlaidos žemei įdirbti, augalų priežiūrai, tręšimui, sėjai, derliui nuimti. Išlaidos trąšoms įtraukiamos į augalo auginimo išlaidas, jei trąšų naudojimas nemodeliuojamas atskira trąšų tiekimo grandine. Analogiškai elgiamasi su išlaidomis degalams, naudojamiems įvairiose su auginimo procesu susijusiose mašinose ir įrengimuose.

Drėgmės kiekis ir jos pasiskirstymas augalo vegetacijos laikotarpiu gali kisti, esat klimato pokyčiams, todėl nagrinėjant ilgalaikę energetikos sektoriaus perspektyvinę plėtrą, tikslinga vertinti ir ilgalaikes klimato kaitos tendencijas.

Aukščiau aprašytą augalų auginimo procesą energetikos sektoriaus plėtros ir funkcionavimo matematiniame modelyje galima pavaizduoti technologija, turinčia daugelį įėjimų ir išėjimų (žr. 2b pav.). Vienas svarbiausių technologijos įvesties parametru – efektyvumas arba naudingo veikimo koeficientas – šiuo atveju nusakomas taip:

$$\eta_i = \frac{PP_i}{PI_i}; \quad (4)$$

čia:  $\eta_i$  –  $i$ -osios technologijos efektyvumas (naudingo veikimo koeficientas). Žvelgiant iš agronomijos taško, tai žemės derlingumas, kai auginama  $i$ -oji kultūra;  $PP_i$  – metinė  $i$ -osios technologijos pagrindinio produkto išeiga (pavyzdžiui, metinis  $i$ -ojo tipo grūdų kiekis;  $PI_i$  –  $i$ -osios technologijos pagrindinis įėjimas ( $i$ -ąja kultūra apsėtas žemės plotas).

Produkto auginimo išlaidos taip pat yra technologijos įvesties parametras. Jo reikšmė nusakoma taip::

$$c_i = \frac{IA_i}{PP_i}; \quad (5)$$

čia:  $c_i$  – lyginamosios  $i$ -osios kultūros auginimo išlaidos;  $IA_i$  – metinės  $i$ -osios kultūros auginimo išlaidos (gali būti diferencijuojamos pagal žemės tipą).

Išeities informacija augalų auginimo technologijoms apibūdinti gali būti gaunama iš mokslinės literatūros agronomijos klausimais ir statistikos duomenų bazių. 1 lentelėje pateiktas tokios informacijos pavyzdys 4 žemės ūkio kultūroms auginti.

1 lentelė. Atskirų žemės ūkio kultūrų derlingumas ir auginimo išlaidos (pavyzdys) [5,6]

| Kultūros | Auginimo išlaidos, EUR/ha | Vidutinis derlingumas (arba technologijos efektyvumas $\eta$ )*, t/ha | Auginimo išlaidos $c_i^*$ , EUR/t |
|----------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Kviečiai | 430.7                     | 4.2                                                                   | 102.5                             |
| Rugiai   | 323.2                     | 2.5                                                                   | 127.8                             |
| Miežiai  | 328.7                     | 3.0                                                                   | 108.6                             |
| Rapsai   | 356.2                     | 2.2                                                                   | 164.4                             |

\*Dydžiai naudojami augalų auginimo technologijoms (žr. 4b pav.) apibūdinti.

Skirtingi trąšų kiekiai ir asortimentas, kitoks žemės įdirbimas ar drėgmės kiekis skirtingai veiks augalų augimą ir sąlygos skirtingą pagrindinio ir šalutinių produktų išeigą bei pareikalaus skirtingų išlaidų. Šioms skirtingoms ūkininkavimo sąlygoms atspindėti, vienos ir tos pačios kultūros auginimui modeliuoti energetikos perspektyvinės plėtros ir funkcionavimo analizės matematiname modelyje reikia panaudoti keletą 2b pav. parodytų technologijų. Jos, kartu su kitomis AEI tiekimo grandinėje vykstančius procesus (skiedrų, granulių, briketų, biodujų ir kitų kuro rūšių gamybą, transportavimą, paskirstymą ir t. t.) modeliuojančiomis technologijomis apjungiamos į tiekimo grandines, leidžiančias korektiškai aprašyti šių išteklių tiekimo ir panaudojimo galimybes bei lyginamąjį su kitomis kuro ir energijos rūšimis efektyvumą. Toks atvaizdavimas leidžia įvertinti, kiek ir kokių augalų tikslinga auginti, norint patenkinti šalies poreikius maistui, pašarams, energetikai bei kitiems galimiems tikslams. Taigi, yra užtikrinama, kad modeliujamo žemės ūkio kultūrų panaudojimo energetikoje išoriniai ekonominiai efektai nekeltų grėsmės egzogeniškai užduotiems poreikiams kitose panaudojimo srityse patenkinti. Kita vertus, išsamus atskirų žemės ūkio kultūrų auginimo modeliavimas sudaro galimybes korektiškai įvertinti tokius išorinius ekonominius energetikos plėtros efektus kaip poveikis užimtumui, nes leidžia geriau atspindėti su bioenergetikos plėtra susijusius ekonomikos struktūros pokyčius.

### Išvados

1. Numatomas ženklus iš biomasės gaunamų AEI paklausos augimas reikalauja korektiškai įvertinti galimą biomasės prieaugį ir biomasės asortimentą. Tuo tikslu AEI tiekimo, perdirbimo ir vartojimo grandines tikslinga įtraukti į energetikos perspektyvinės plėtros ir funkcionavimo matematinį modelį, kartu reprezentuojant ir alternatyvų biomasės panaudojimą.
2. Augalų auginimo modeliavimas nėra būdingas energetikos funkcionavimo ir perspektyvinės plėtros analizei skirtuose ekonominiuose modeliuose, tačiau augalų auginimo procesai gali būti pavaizduoti energetikos raidos matematinuose modeliuose naudojamomis įprastinėmis technologijomis,

o augalų auginimo procesą galima aprašyti įprastinėmis tuose modeliuose taikomomis lygtimis.

3. Augalų auginimą modeliuojančias technologijas galima apibūdinti išeities informacija, parengiama laisvai prieinamos agronominės informacijos bazėje.

*Tyrimą finansavo Lietuvos mokslo taryba (sutarties Nr. MIP-078/2014).*

### Literatūra

1. MESSAGE. Internetinė prieiga: <https://www.iaea.org/sites/default/files/INPROPESS-brochure.pdf>.
2. MARKAL. Internetinė prieiga: <http://www.iea-etsap.org/web/Markal.asp>.
3. Balmorel. Internetinė prieiga: <http://www.eabalmorel.dk/>.
4. OSeMOSYS. Internetinė prieiga: <http://osemosysmain.yolasite.com/>.
5. Irena Kriščiukaitienė, Antanina Tamošaitienė, Selemutė Andrikienė ir kt. Lietuvos agrarinio sektoriaus veiklos rezultatų prognozės. Lietuvos agrarinės ekonomikos institutas. Mokslo studija, 2011. ISBN 978-9955-481-29-4.
6. Žemės ūkio kultūrų derlingumas. Lietuvos statistikos departamentas. Internetinė prieiga: <http://osp.stat.gov.lt/web/guest/statistiniu-rodikliu-analize?portletFormName=visualization&hash=aef2ec35-a92a-4656-8817-d8ff4b464dd9>.

### Modelling the biofuel supply chain to the energy sector

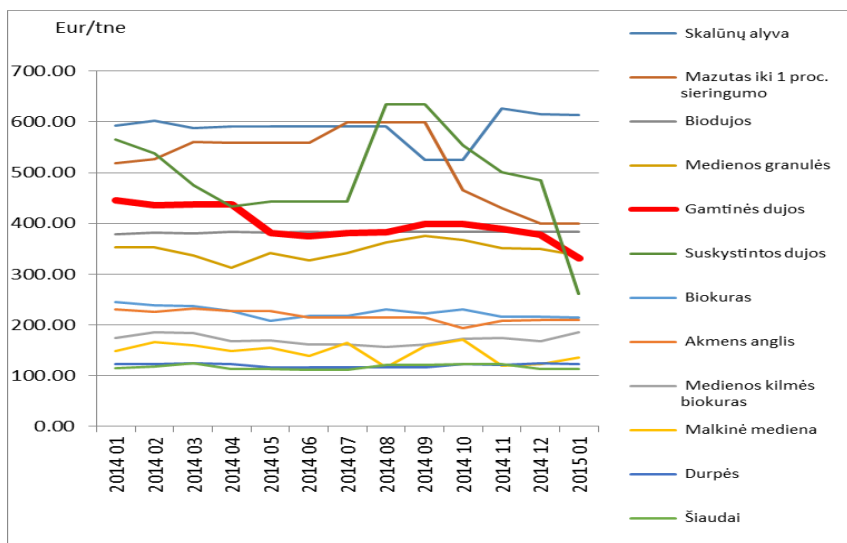
#### Summary

The paper deals with the problem of mathematical modelling of broader utilisation of biomass based renewable energy sources (RES) in the energy sector. The main idea is incorporation of RES supply chains into mathematical models for the analysis of energy sector development and operation. The paper describes modelling principles of growing processes of the products, which can be used for food, feed, energy and other alternative purposes. Presented modelling principles allow analysis of optimal integration of RES into energy system and give an opportunity for a better evaluation of external economic effects such as use and employment on the alternative land.

## Šalies centralizuoto šilumos tiekimo sistemos plėtra

Arvydas Galinis, Irena Alėbaitė, Eimantas Neniškis  
Lietuvos energetikos institutas

**Šilumos sektoriaus apžvalga.** Lietuvoje 53 % pastatų aprūpinami šiluma iš centralizuoto šilumos tiekimo sistemos (CŠT). Miestuose CŠT sistemos šiluma aprūpinama net 76 % visų pastatų. Didžioji dalis šiluminės energijos didžiųjų miestų CŠT sistemose pagaminama deginant gamtines dujas, kurių kaina gerokai didesnė nei galimų pigesnių alternatyvių šaltinių, kaip biokuras, šiaudai, durpės (žr. 1 pav.).



1 pav. Vidutinės šalies kuro (žaliavų) kainos. [1]

Nediskriminacinių konkurencijos sąlygų nebuvimas, esama šilumos pirkimo tvarka, kai gamintojai skirstomi į priklausomus ir nepriklausomus, reguliuojamus ir nereguliuojamus, šilumos gamybos veiklą daro sudėtingą, sunkiai nuspėjamą ir labiau rizikingą investuotojams, kas riboja naujų šilumos gamintojų atėjimą į rinką bei mažina tiekimo patikimumą. Ilgalaikis ir žymus investicijų trūkumas stabdo naujų efektyvesnių technologijų diegimą ir neužtikrina minimalios būtinos įrangos atnaujinimo spartos (ypač šilumos perdavimo grandyje). Esama skatinimo tvarka neužtikrina investicijų į termofikacinių elektrinių plėtrą patrauklumo, todėl CŠT sektoriaus raidos planai grindžiami katilinių plėtra, o termofikacinių elektrinių technologiniai pranašumai yra neišnaudojami. Visa tai kartu su vyraujančiu brangiu kuru mažina galimybes sumažinti šilumos kainas galutiniams vartotojams. Dėl nepakankamų daugiabučių namų ir visuomeninių pastatų modernizavimo apimčių

didelės dalies vartotojų energetinis efektyvumas yra žemas. Prasta pastatų termoizoliacija gerokai prisideda prie vartotojams nepriimtinių sąskaitų už šildymą.

Šilumos kainos vartotojams pigiausių ir brangiausių šilumą tiekiančiose sistemose skiriasi du kartus, kas negali būti paaiškinama tik objektyviomis priežastimis. Daugiausia tai susiję su labai skirtinga CŠT sistemų valdymo kokybe. Vartotojams tiekiamos šilumos kainos pagal CŠT įmones pateiktos 1 lentelėje.

**Pagrindiniai analizės metodiniai principai.** CŠT sistemų perspektyvinės plėtros analizė atlikta pagal optimalius šilumos sektoriaus plėtros scenarijus, kurie buvo skaičiuojami matematinio modeliavimo programine įranga MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental impacts) [3]. CŠT sistema modeliuota kartu su elektros energijos tiekimo sistema dėl glaudaus jų tarpusavio sąryšio per technologijas, kurios gamina tiek elektros energiją, tiek šilumą (kogeneracinės elektrinės). Modeliuojant perspektyvinę sistemų raidą ir funkcionavimą buvo atsižvelgiama į energetikos politikos nuostatas, galimas paramos formas technologijoms, prognozuojamus kuro, elektros kainų augimą rinkose bei technologijų kainų pokyčius, galimus ekonomikos augimo tempų ir skirtingų energijos poreikių scenarijus, gamtos sauginius apribojimus ir kitus veiksnius. Blokinė matematinio modelio schema pateikta 2 pav.

Eurostat duomenimis, Lietuva yra viena labiausiai energetiškai priklausomų ES valstybių, importuojanti net 78 % [4] suvartojamos šalyje energijos. Didžioji dalis energijos importuojama iš vienos šalies – Rusijos. Iki suskystintų gamtinių dujų importo terminalo pastatymo, Rusija turėjo dujų tiekimo monopoliją ir taikė itin aukštas kainas. Didelis energetinis priklausomumas nuo Rusijos ir jos piktnaudžiavimas monopoline padėtimi, bei naudojimasis energetika kaip politine priemone, ypač įvykių Ukrainoje fone, lėmė politinius siekius didinti Lietuvos energetinį saugumą. Siekiant įvertinti galimas politines nuostatas dėl energetinio saugumo užsiduoti 4 energetinio saugumo lygiai, išreikšti per vietinės faktinės ir galimos elektros energijos gamybos apimtis:

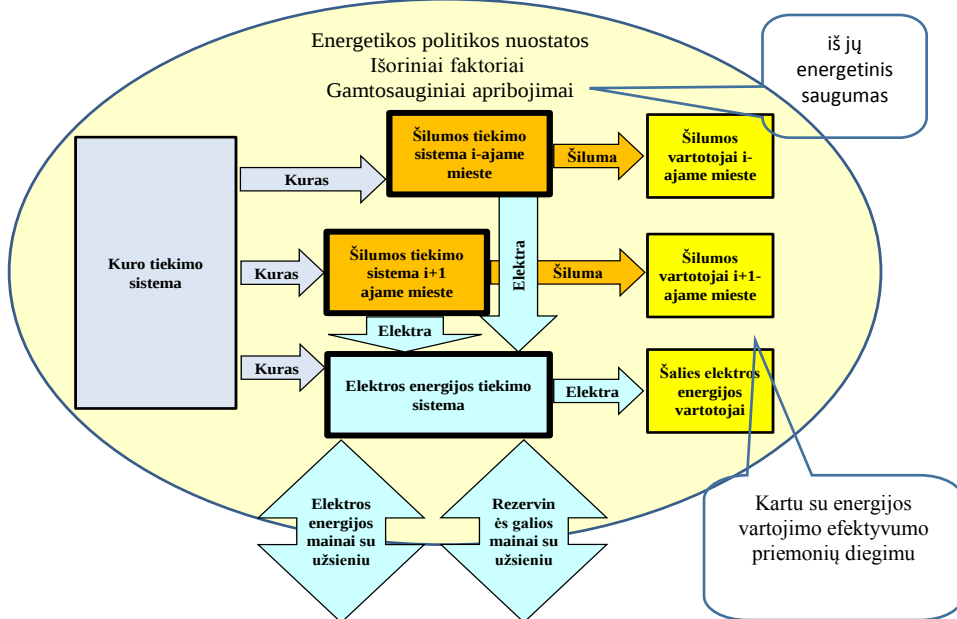
- *Nereglamentuoto elektros energijos importo.* Šiuo atveju laikoma, kad elektros energijos importo sąlygos yra palankios ir nekeliami jokie reikalavimai vietinės elektros energijos gamybai, t. y. šalyje gaminama tik rinkoje konkurencinga elektros energija, o trūkstama dalis importuojama;

- *50 % vietinės faktinės ar galimos gamybos.* Pradedant 2025 m., šalyje gaminama (ar galima gaminti) ne mažiau 50 % reikiamos elektros energijos. Likusi elektros energijos dalis importuojama, taikant papildomus apribojimus elektros energijos importui iš ne ES šalių (ne daugiau 30 % 2025 m. ir ne daugiau 10 % 2050 m.);

- *80 % vietinės faktinės ar galimos gamybos.* Pradedant 2025 m., šalyje gaminama (ar galima gaminti) ne mažiau 50 % reikiamos elektros energijos, 2030 m. vietinė gamyba pasiekia 70 %, o 2050 m. – ne mažiau 80 % nuo bendrųjų šalies elektros energijos poreikių. Likusi elektros energijos dalis importuojama,

taikant papildomus apribojimus elektros energijos importui iš ne ES šalių (ne daugiau 30 % 2025 m. ir ne daugiau 10 % 2050 m.);

- 100 % galimos vietinės gamybos. Pradedant 2014 m., užtikrinama galimybė šalyje pasigaminti visą reikiamą elektros energijos kiekį, jei elektros energijos importas negalimas dėl fizinių apribojimų ar dėl per didelės kainos.



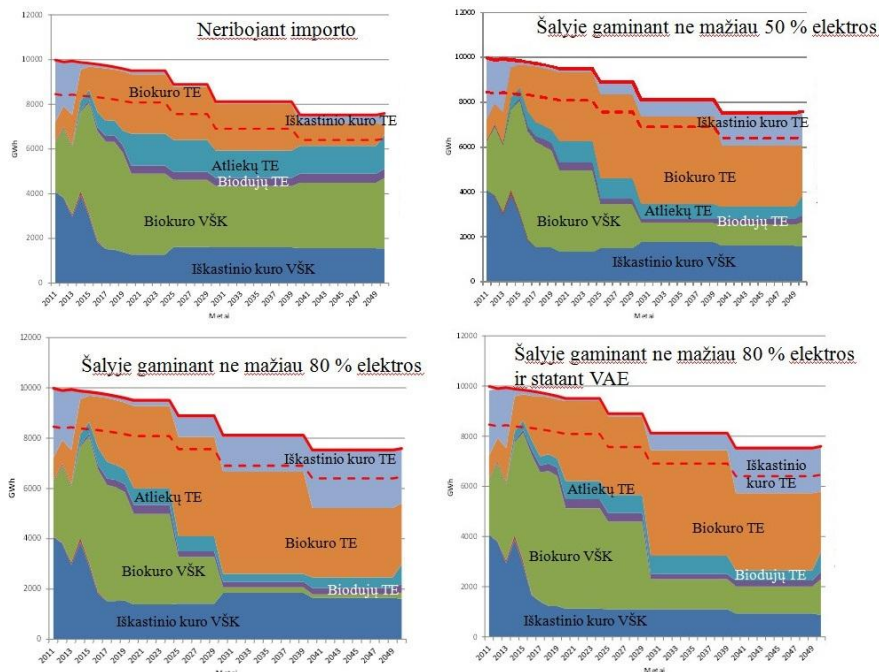
2 pav. Blokinė matematinio modelio schema

1 lentelė. Šilumos kainos vartotojams pagal CŠT įmones. [2]

| Šilumos tiekimo įmonė          | Šilumos kaina vartotojams su PVM nuo<br>2015-01-01 ct/kWh | Šilumos kaina vartotojams su PVM nuo<br>2015-01-01 euro ct/kWh |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| UAB "Utenos šilumos tinklai"   | 16,95                                                     | 4,91                                                           |
| UAB "Šiaulių energija"         | 18,44                                                     | 5,34                                                           |
| UAB "Širvintų šiluma"          | 18,70                                                     | 5,42                                                           |
| UAB "Šilalės šilumos tinklai"  | 18,75                                                     | 5,43                                                           |
| UAB "Molėtų šiluma"            | 19,02                                                     | 5,51                                                           |
| UAB "Šilutės šilumos tinklai"  | 19,10                                                     | 5,53                                                           |
| UAB "Birštono šiluma"          | 19,36                                                     | 5,61                                                           |
| UAB "Jonavos šilumos tinklai"  | 19,67                                                     | 5,70                                                           |
| UAB "Tauragės šilumos tinklai" | 19,84                                                     | 5,75                                                           |
| UAB "Raseinių šilumos tinklai" | 20,23                                                     | 5,86                                                           |
| UAB "Varėnos šiluma"           | 20,27                                                     | 5,87                                                           |

|                                                     |       |      |
|-----------------------------------------------------|-------|------|
| UAB "Radviliškio šiluma"                            | 20,29 | 5,88 |
| UAB "Ignalinos šilumos tinklai"                     | 20,74 | 6,01 |
| UAB "Mažeikių šilumos tinklai"                      | 21,44 | 6,21 |
| UAB "Fortum Švenčionių energija"                    | 21,95 | 6,36 |
| UAB "Plungės šilumos tinklai"                       | 22,41 | 6,49 |
| UAB "Lazdijų šiluma"                                | 22,49 | 6,51 |
| UAB "Kaišiadorių šiluma"                            | 22,68 | 6,57 |
| AB "Panevėžio energija"                             | 22,76 | 6,59 |
| AB "Klaipėdos energija"                             | 23,05 | 6,68 |
| UAB "Vilniaus energija"                             | 23,96 | 6,94 |
| UAB "Litesko" fil. "Kelmės šiluma"                  | 24,20 | 7,01 |
| AB "Kauno energija"                                 | 24,72 | 7,16 |
| UAB "Akmenės energija"                              | 25,44 | 7,37 |
| UAB "Šakių šilumos tinklai"                         | 26,00 | 7,53 |
| UAB "Litesko" fil. "Marijampolės šiluma"            | 26,30 | 7,62 |
| UAB "Litesko" fil. "Telšių šiluma"                  | 26,67 | 7,72 |
| UAB "Elektrėnų komunalinis ūkis"                    | 26,81 | 7,76 |
| UAB "Litesko" fil. "Druskininkų šiluma"             | 27,15 | 7,86 |
| UAB "Litesko" fil. "Kazlų Rūda"                     | 27,25 | 7,89 |
| UAB "Litesko" fil. "Alytaus energija"               | 27,36 | 7,92 |
| UAB "Litesko" fil. "Palangos šiluma"                | 27,47 | 7,96 |
| UAB "Anykščių šiluma"                               | 27,76 | 8,04 |
| UAB "Litesko" fil. "Marijampolės šiluma" Sargėnuose | 28,01 | 8,11 |
| UAB "Litesko" fil. "Vilkaviškio šiluma"             | 28,06 | 8,13 |
| UAB "Pakruojo šiluma"                               | 28,21 | 8,17 |
| UAB "Šalčininkų šilumos tinklai"                    | 29,38 | 8,51 |
| UAB "Fortum Joniškio energija"                      | 30,39 | 8,80 |
| UAB "Litesko" fil. "Biržų šiluma"                   | 30,50 | 8,83 |
| UAB "Prienų energija" Trakų padalinys               | 30,97 | 8,97 |
| UAB "Prienų energija"                               | 33,66 | 9,75 |

**Analizės rezultatai.** CŠT sistemose gaminamos šilumos apimčių dinamika keleto charakteringų scenarijų atveju parodyta 3 pav.



3 pav. Optimalus šiluminės energijos gamybos pasiskirstymas pagal technologijas iki 2050 m., esant skirtingiems vietinės elektros gamybos lygiams

Scenarijų modeliavimo rezultatai rodo, kad šiuo metu egzistuojančią tendenciją, kuomet CŠT sistemose beveik išimtinai diegiami tik biokuro vandens šildymo katilai, tikslinga būtų keisti. Baziniams ir iš dalies šildymo sezono poreikiams tenkinti, kiek tai ekonomiškai pagrįdžiama, tikslingiausia būtų naudoti biokurą, komunalines atliekas, biodujas ir kitą kurą naudojančias termofikacines elektrines, o biokuro ir iškastinio kuro katilines orientuoti šildymo sezono poreikiams tenkinti. Tai ypač aktualu didžiųjų miestų centralizuoto šilumos tiekimo sistemose, turinčiose itin palankias sąlygas kombinuotai šilumos ir elektros gamybai plėtoti.

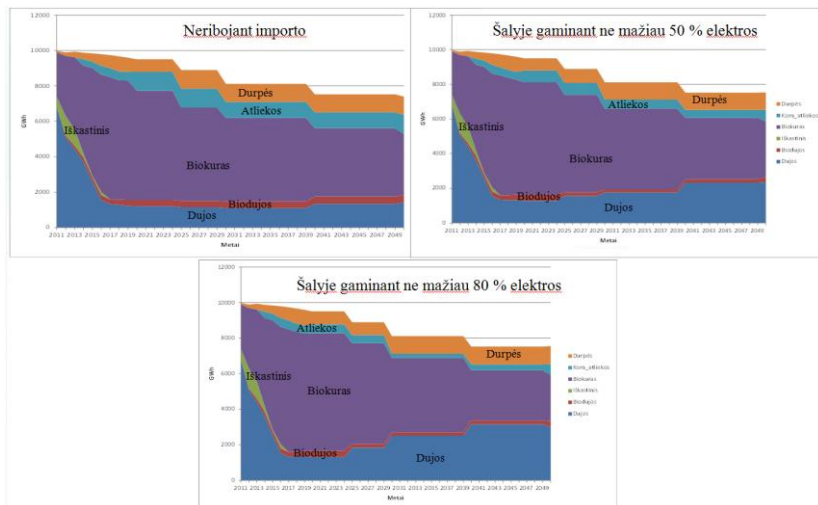
Daugelio įvairių energetikos sektoriaus raidos scenarijų analizės išvadose nustatyta, jog norint užtikrinti racionalią CŠT sistemų raidą, turi būti siekiama, kad jau 2015–2018 m. šilumos gamyba biokuro katilinėse neviršytų 4,4–4,8 TWh/metų, o šilumos gamyba biokuro ir komunalinių atliekų termofikacinėse elektrinėse iki 2020 m. išaugtų iki 3,9–4,1 TWh/metų. 2019–2025 m. dėl mažėjančių šilumos poreikių ir augančios šilumos gamybos panaudojant rūšiuotas komunalines atliekas tikslinga būtų mažinti šilumos gamybą biokuro vandens šildymo katiluose. Vėliau,

2025–2040 m. laikotarpiu ar net iki 2050 m., esant palankioms elektros energijos importo sąlygoms, šilumą gaminti šiuose katiluose tikslinga 2,7–3,1 TWh/metus intervale. Mažėjant šilumos poreikiams ir esant palankioms elektros energijos importo sąlygoms, biokuro ir komunalinių atliekų termofikacinių elektrinių šilumos gamyba kartu paėmus taip pat mažės, ir 2030 bei 2040 m. sieks ~3,3 TWh ir ~2,2 TWh atitinkamai, o komunalines atliekas naudojančių termofikacinių elektrinių gamyba liks gana stabili.

Visagino AE statyba didina biokuro vandens šildymo katilų lyginamąją svorį šilumos gamyboje, tačiau mažina iškastinį kurą naudojančių katilų panaudojimą. Stebimas taip pat kiek didesnis biokuro TE ir atitinkamai mažesnis komunalinių atliekų TE dalyvavimas šilumos gamyboje.

Šalies centralizuoto šilumos tiekimo sistemose iki 2020 m. tikslinga būtų įrengti naujų ar modernizuotų (pritaikytų prie nuo 2016 m. pasikeisiančių gamtos saugos reikalavimų) 1000–1160 MW iškastinį kurą naudojančių vandens šildymo katilų, 460–520 MW naujų biokuro vandens šildymo katilų, apie 40 MW šiluminės galios biodujų termofikacinių elektrinių, 180–220 MW šiluminės galios biokurą ir komunalines atliekas naudojančių termofikacinių elektrinių ir 30–70 MW (atsižvelgiant į reikalavimus energetiniam saugumui) šiluminės galios iškastinį kurą naudojančių termofikacinių elektrinių. Taip pasiekama diversifikuota generuojančių galių struktūra, leidžianti lanksčiai reaguoti į besikeičiančią situaciją kuro ir energijos rinkose.

Pagrindine kuro rūšimi centralizuotai tiekiamos šilumos gamyboje turėtų tapti biokuras (žr. 4 pav.) Tikslinga, kad esant palankioms elektros energijos importo galimybėms, iš jo pagaminta šiluma sudarytų 65 % – 2020 m., 55 % – 2025 m. ir 50 % – 2030 m. Siekiant, kad po 2025 m. šalyje būtų gaminama ne mažiau 50 % reikiamos elektros energijos, racionali iš biokuro pagamintos šilumos dalis būtų 68 % – 2020 m., 59 % – 2025 m. ir 49 % – 2030 m. Norint, kad po 2050 m. šalyje būtų gaminama ne mažiau 80 % reikiamos elektros energijos, siektina iš biokuro pagamintos šilumos dalis būtų 70 % – 2020 m., 60 % – 2025 m. ir 44 % – 2030 m. Gamtines dujas centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje tikslinga būtų palikti antru pagal svarbą kuru. Esant palankioms elektros energijos importo galimybėms, racionali iš dujų pagaminta centralizuotai tiekiamą šilumą sudarytų 13 % – 2020 m., 12 % – 2025 ir 2030 m. Siekiant, kad po 2025 m. šalyje būtų gaminama ne mažiau 50 % reikiamos elektros energijos, iš dujų pagamintos šilumos dalis būtų 14 % – 2020 m., 16 % – 2025 m. ir 19 % – 2030 m. Norint, kad po 2050 m. šalyje būtų gaminama ne mažiau 80 % reikiamos elektros energijos, iš dujų pagamintos šilumos dalis būtų 14 % – 2020 m., 19 % – 2025 m. ir 27 % – 2030 m. Esant palankioms elektros energijos importo galimybėms, šilumos gamyba iš durpių ir komunalinių atliekų sudarytų po ~10–11 % nuo bendros šilumos gamybos.

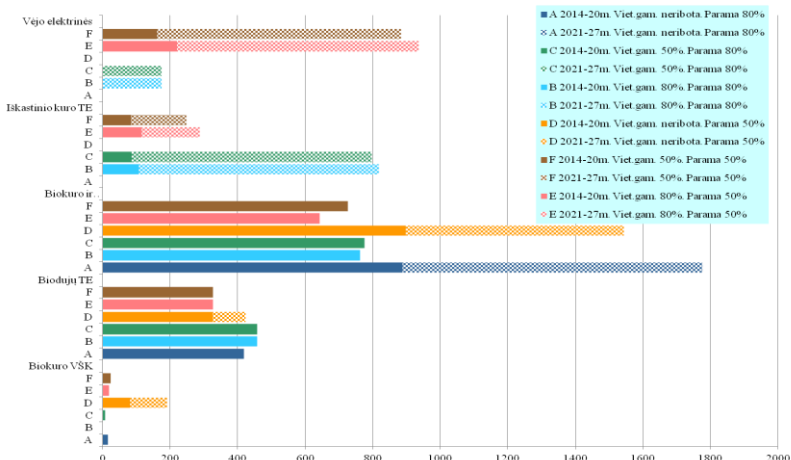


4 pav. Optimalus kuro CŠT tiekiamos šilumai gaminti pasisiskirstymas iki 2050 m., esant skirtingiems vietinės elektros gamybos scenarijams.

Investicijų poreikis vandens šildymo katilams 2015 – 2050 m. vertinamas 0,5–1,2 mlrd. eur. Siekis nuo 2050 m. šalyje gaminti 80 % elektros energijos investicijas vandens šildymo katilams sumažina nuo 1 mlrd. eur iki 0,5 mlrd. eur, esant santykinai pigioms dujomis, ir nuo 1,1 mlrd. eur iki 0,6 mlrd. eur, esant brangioms dujomis (daugiau šilumos gaminama termofikacinėse elektrinėse ir reikia mažiau investicijų vandens šildymo katilams, tačiau daugiau kogeneracijai). Tuo atveju, kai energetinis saugumas užtikrinamas instaliuotomis ir darbui parengtomis elektrinių galiomis, investicijos vandens šildymo katilams vertinamos ~1,1 mlrd. eur. Reikalingos investicijos biokuro ir atliekų termofikacinėms elektrinėms vertinamos 0,8–2,3 mlrd. eur ir 0,3–2,9 mlrd. eur kitoms termofikacinėms elektrinėms.

Norint pritraukti investicijas reikiamoms katilinėms ar elektrinėms statyti, reikia sudaryti galimybes toms technologijoms konkurencingai dirbti rinkos kainomis. Tai gali būti pasiekama skiriant tam tikrą paramą. Daugumai biokuro vandens šildymo katilų, racionaliu režimu dirbančių biokuro termofikacinių elektrinių ir komunalines atliekas naudojančių termofikacinių elektrinių, paramos skyrimas nėra būtinas jų konkurencingumui užtikrinti. Tačiau, atsižvelgiant į susiklosčiusią situaciją centralizuoto šilumos tiekimo įmonėse, įmonių finansines galimybes investuoti ir į siekį sumažinti šilumos kainas galutiniams vartotojams, parama šioms technologijoms diegti yra tikslinga ir reikalinga. Modeliuojant energetikos sektoriaus, tuo pačiu ir CŠT sistemų perspektyvinę raidą, absoliutus paramos fondo dydis energetikos sektoriui buvo iš anksto užduotas, vadovaujantis atitinkamu Lietuvos Respublikos Vyriausybės nutarimu, tačiau fondo paskirstymas

tarp atskirų technologijų tipų buvo optimizuojamas, siekiant gauti didžiausią ekonominį efektą. Modeliuojant scenarijus nustatyta, kad didžiąją finansinės paramos fondo dalį tikslinga skirti biokuro, įskaitant komunalinių atliekų, ir biodujų termofikacinėms elektrinėms (žr. 5 pav.). Šiai technologijų grupei skiriamos paramos dalis, atsižvelgiant į paramos intensyvumą ir vietinės elektros energijos gamybos poreikį, vertinama 43–99 % nuo visų paramos lėšų. Didžiausias paramos kiekis biokuro termofikacinėms elektrinėms skiriamas tuo atveju, kai atskirai technologijai leidžiama skirti didelę (iki 80 % paramą) ir nėra jokių objektyvių sąlygų ar energetikos politikos nuostatų, ribojančių elektros energijos importo galimybes. Šiuo atveju visa parama skiriama rinkoje labiausiai konkurencingoms technologijoms (biokuro katilams ir termofikacinėms elektrinėms, taip pat ir komunalines atliekas naudojančioms termofikacinėms elektrinėms), teikiančioms didžiausią naudą nuo įdėtos paramos. Mažinant atskirai technologijai skiriamos paramos dalį (paramos intensyvumą) iki 50 % ir nekeičiant kitų sąlygų, parama skirstoma tarp didesnio objektų skaičiaus. Taip daugiau paramos (~9 %) gauna biokuro vandens šildymo katilai. Siekiant didinti vietinės elektros energijos gamybos apimtį (didinti energetinį saugumą), tačiau atskiroms technologijoms skiriant didelę dalį (iki 80 %) paramos nuo reikiamų investicijų, paramą tikslinga koncentruoti biokurą ir iškastinį kurą naudojančioms termofikacinėms elektrinėms. Biokurą ir komunalines atliekas naudojančioms technologijoms būtų paskirstoma apie 55 %, o iškastinį kurą naudojančioms technologijoms – apie 36 % paramos fondo lėšų.



5 pav. Finansinės paramos pasiskirstymas energetikos sektoriuje pagal technologijų grupes, kai suminis paramos fondas yra iš anksto fiksuotas

Paramos intensyvumą pirmiausia apspręstų paramos fondo dydis ir įmonių finansinė situacija. Vertėtų panagrinėti ir kitas finansų inžinerijos galimybes, pavyzdžiui, paramą teikti kaip lengvatinę paskolą, kuri būtų grąžinama, o sukaupti pinigai naudojami kitoms, vėlesnėms, investicijoms paremti. Taip pat tikslinga būtų optimizuoti paramos paskirstymą tarp atskirų šalies ūkio šakų.

### **Išvados**

1. Visiems rinkos dalyviams turi būti užtikrintos lanksčios ir nediskrimancinės veiklos sąlygos, siekiant nuolat tobulinti šilumos gamybos technologijų struktūrą, įgalinančią naudoti įvairias kuro rūšis, mažinti šilumos kainas ir gerinti paslaugų kokybę galutiniams vartotojams.
2. Reikia racionaliai išnaudoti šilumos gamybos potencialą efektyvioms termofikacinėms elektrinėms, didinančioms vietinės elektros energijos gamybos galimybes, diegti.
3. Turime siekti šilumos gamyboje orientuotis į konkurencingą vietinių ir atsinaujinančių energijos išteklių panaudojimą.

### **Šaltiniai**

1. Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija. Vidutinės šalies kuro (žaliavos kaina). [Interaktyvus] [Publikuota 2014 02 05] Prieiga internete: <<http://www.regula.lt/siluma/Puslapiai/kuro-ir-perkamos-silumos-kainos/vidutine-salies-kuro-zaliavos-kaina.aspx>>
2. Lietuvos Šilumos Tiekėjų Asociacija. Šilumos kainos nuo 2015 m. vasario 1 d. [Interaktyvus] [Publikuota 2014 02 17] Prieiga internete: <[http://www.lsta.lt/files/SILUMOS%20KAINOS/1502\\_silumos\\_kainos.xlsx](http://www.lsta.lt/files/SILUMOS%20KAINOS/1502_silumos_kainos.xlsx)>
3. MESSAGE. [Interaktyvus] Prieiga internete: <<https://www.iaea.org/sites/default/files/INPROPESS-brochure.pdf>>
4. Eurostat. Energy dependence, [Interaktyvus] [Publikuota 2014 12 11] Prieiga internete: <<http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/graph.do?tab=graph&plugin=1&pcode=tsdcc310&language=en&toolbox=data>>

### **Development of the country's district heating system**

#### **Summary**

Analysis of the prospective development of Lithuanian district heating is based on the most economically feasible scenarios of heat sector development, which have been calculated with mathematical modeling software MESSAGE. The results are presented with possible different levels of energy security.

## Avižų lukšto degimo tyrimai

Ignas Ambrazevičius, Gediminas Kabišius, Agnė Šliumbaitytė  
 UAB „Enerstena“ Mokslinių tyrimų ir vystymo centras

Avižų lukštas (*angl. Oat hull*) – gamybinė atlieka, susidaranti valant avižų grūdą. Šių tyrimų tikslas – įvertinti galimybes avižų lukštą panaudoti kaip biokurą, tuo tikslu ištiriant lukštų savybes bei pateikiant konkrečius pasiūlymus tokį kurą deginančio įrenginio konstrukcijai.

UAB „Enerstena“ Mokslinių tyrimų ir vystymo centro laboratorijoje gavus kuro mėginį, atlikta pilna avižų lukšto cheminė analizė, apskaičiuoti charakteringieji kuro pelenų lydymosi, šlakavimosi rodikliai. Atlikti avižų lukšto drėgmės, peleningumo, pelenų lydymosi temperatūros ir šilumingumo tyrimai. Bendradarbiaujant su Kauno technologijos universiteto Šilumos ir atomo energetikos katedra, atlikti avižų lukšto deginimo tyrimai, nustatytos susidarantios emisijos, stebėta ar degimo procesas ir jo metu susidarantių pelenų tipas bei šlakas atitinka charakteringuosius rodiklius.

### Bendros žinios apie avižų lukštus ir atlikti tyrimai

Pagrindinė avižų lukštų struktūra – tai mažo tankio lukštai, kurių sudėtyje taip pat yra avižų grūdų liekanos. Cheminės ir fizikinės avižų lukštų savybės pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. Cheminės ir fizikinės avižų lukštų savybės

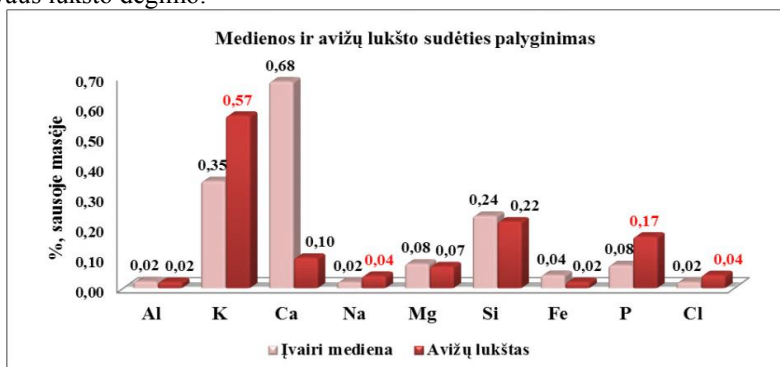
|                                                |       |        |
|------------------------------------------------|-------|--------|
| Drėgmės kiekis                                 | %     | 11,4*  |
| Pelenų kiekis sausoje masėje                   | %     | 3,4*   |
| Sauso avižų lukšto viršutinis šilumingumas     | MJ/kg | 18,79* |
| Drėgno avižų lukšto viršutinis šilumingumas    | MJ/kg | 15,28* |
| Pelenų deformacijos temperatūra (DT)           | °C    | 750*   |
| Pelenų lydymosi – išsiliejimo temperatūra (FT) | °C    | 950*   |

\*Tyrimų rezultatai gauti „UAB Enerstena“ Mokslinių tyrimų ir vystymo centro Kuro laboratorijoje.

2 lentelė. Avižų lukštų elementinė sudėtis [3]

|                |                  |          |
|----------------|------------------|----------|
| Anglis (C)     | sausoje masėje % | 43–47    |
| Vandenilis (H) | sausoje masėje % | 4,7–6,1  |
| Azotas (N)     | sausoje masėje % | 0,8–1,8  |
| Siera (S)      | sausoje masėje % | 0,04–0,1 |
| Degūnis (O)    | sausoje masėje % | 35–41    |

Elementinė sudėtis panaši į medienos. Avižų lukšto šilumingumas ganėtinai aukštas ir siekia 15,28 MJ/kg, dėl sąlyginai mažo drėgmės kiekio tikėtasi gana intensyvaus lukšto degimo.



1 pav. Medienos ir avižų lukštų sudėties palyginimas

Avižų lukštų sudėtyje yra didelis alkani grupės metalų kiekis. Natriui (Na) ir kaliui (Ka) dalyvaujant reakcijose kartu su kitais elementais stipriai mažėja pelenų lydumo temperatūra [1]. Taip pat atsiranda didelė tikimybė, kad tokie pelenai bei šlakas pradės „stikluotis“, kadangi sudėtyje pastebimas žymus silicio kiekis. Avižų lukšto sudėtyje esantis fosforas spartina cheminę metalo koroziją.

3 lentelė. Elementų koncentracijos sausuose avižų lukštuose.

| Pagrindiniai elementai |                                      |        |
|------------------------|--------------------------------------|--------|
| Aluminis (Al)          | sausoje masėje mg/kg <sub>kuro</sub> | 200*   |
| Kalis (K)              | sausoje masėje mg/kg <sub>kuro</sub> | 5700*  |
| Natris (Na)            | sausoje masėje mg/kg <sub>kuro</sub> | 200*   |
| Kalcis (Ca)            | sausoje masėje mg/kg <sub>kuro</sub> | 1100*  |
| Fosforas (P)           | sausoje masėje mg/kg <sub>kuro</sub> | 3500*  |
| Silicis (Si)           | sausoje masėje mg/kg <sub>kuro</sub> | 11700* |

\*Tyrimų rezultatai gauti „UAB Enerstena“ Mokslinių tyrimų ir vystymo centro Kuro laboratorijai bendradarbiaujant su kitomis laboratorijomis.

Pakuroje deginant avižų lukštą, tikėtina šlako bei pelenų aglomeracija. Norint įvertinti galimą kuro šlakavimąsi pakuroje, pelenų lydumą, buvo apskaičiuoti charakteringieji kuro rodikliai. Ribinės jų reikšmės pateiktos 4 lentelėje.

Pagal šiuos rodiklius sudarytos prognozės, kurios vėliau buvo tikrinamos eksperimentiškai:

2S/Cl = 3,39 – dėl aukštos šio koeficiento reikšmės aukštatemperatūroje korozija mažai tikėtina;

$(K+Na)/(3*(2S+Cl)) = 0,17$  – tikėtina, kad didžioji dalis  $SO_2$  ir  $Cl$  bus susijungusi su  $K$  ir  $Na$ . Todėl  $SO_2$  ir  $HCl$  koncentracijos dūmuose sąlyginai nedidelės;

$Si/K = 0,61$  – dėl mažos reikšmės tikėtina žema pelenų lydymosi temperatūra, pelenai smulkiadispersiniai, lengvi;

$(Si + P + K)/(Ca + Mg) = 5,26$  – dėl mažos reikšmės tikėtina žema pelenų lydymosi temperatūra.

4 lentelė. Ribinės kuro charakteristikų reikšmės [2].

| Vertė                        | Prognozė                                                                                                                                       |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $2S/Cl > 2,5$                | Aukštatemperatūroje korozija mažai tikėtina.                                                                                                   |
| $(K + Na)/(3*(2S + Cl)) < 1$ | Tikėtina, kad didžioji dalis $SO_2$ ir $Cl$ bus susijungusi su $K$ ir $Na$ . Todėl $SO_2$ ir $HCl$ koncentracijos dūmuose sąlyginai nedidelės. |
| $Si/K < 1$                   | Tikėtina žema pelenų lydymosi temperatūra. Pelenai smulkiadispersiniai, lengvi.                                                                |
| $(Si + P + K)/(Ca + Mg) > 1$ | Tikėtina žema pelenų lydymosi temperatūra.                                                                                                     |

Deginant avižų lukštus, pelenai pradėjo deformuotis jau 750–800 °C temperatūroje. Pelenų lipnumas ir plastiškumas buvo stebimas prie 900–930 °C temperatūros, tad ši temperatūra yra kritinė ir jos viršyti negalima.

### **Avižų lukšto deginimo tyrimo standai**

Avižų lukšto deginimo tyrimas buvo atliekamas kartu su KTU Šilumos ir atomo katedra. Avižų lukštas buvo degintas dviejuose standuose:

1. UAB „Kalvio“ gamybos katilė KSM-175-13U, kurio šiluminė galia 13 kW;
2. UAB „Enerstena“ pagamintame kieto kuro deginimo stende, kurio šiluminė galia 40 kW.

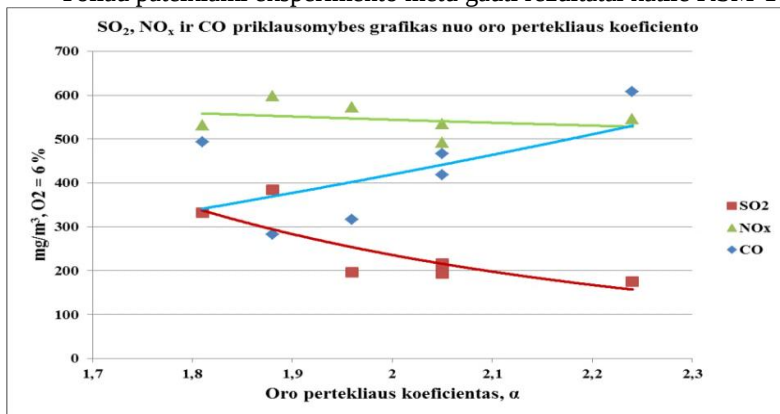
Pirmasis bandymas buvo atliktas UAB „Enerstena“ pagamintame katilė su judančiu ardynu. Buvo siekiama atkurti deginimo procesus, kurie yra identiški procesams, vykstantiems pramoniniuose katiluose. Šį biokuro katilą sudaro pakura, judantis pasvirasis ardynas, pirminio ir antrinio oro tiekimas, dūmų šalinimo ventiliatorius, dūmavamzdis dviejų eigių katilas, pelenų šalinimas ir kiti įrenginiai.

Antrasis bandymas buvo atliktas Kalvis KSM-175-13U. Kuras iš bunkerio tiekiamas kuro padavimo sraigto į pakurą. Joje ventiliatoriumi tiekiamas pirminis oras, palaikantis degimą. Sudegusio kuro pelenai pašalinami automatiškai.

### **Avižų lukšto deginimo tyrimo rezultatai**

Susidarančios emisijos dūmuose ištirtos laboratoriniu dūmų analizatoriumi „IMR200“. Susidarančių chloridų kiekiai ištirti indikaciniais vamzdeliais. Išmatuotas susidarančių chloridų kiekis 4,56 mg/m<sup>3</sup>.

Toliau pateikiami eksperimento metu gauti rezultatai katilė KSM-175-13U.



2 pav. Iširtos susidariusių emisijų koncentracijos dūmuose



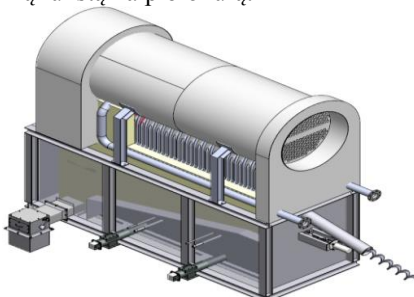
3 pav. Degimo pobūdis, suardžius degančius avižų lukštų aglomeratus

Dviejų tipų katiluose bandymai buvo atlikti, norint įvertinti rezultatų skirtumo dydį, esant skirtingoms degimo sąlygoms. Skirtingi bandymų rezultatai gauti dėl skirtingo pakuros tūrio, kuro tiekimo principo, pirminio ir antrinio oro tiekimo pozicionavimo ir kitų priežasčių.

### Išvados

1. Tyrimais nustatyta, kad avižų lukštas pasižymi aukštu šilumingumu, siekiančiu 15,28 MJ/kg, vidutiniu peleningumu 3,4 % bei maža drėgme – 11,4%. Energetiniu požiūriu avižų lukštas yra patrauklus kuras.
2. Atliktas pelenų lydymosi temperatūros įvertinimas skaičiavimo būdu, pagal cheminę lukšto sudėtį. Ištyrus avižų lukšto cheminę sudėtį paaiškėjo, kad avižų

- lukštų sudėtyje yra didelis kiekis kalio ir fosforo, kurie lemia žemą pelenų lydymosi temperatūrą.
3. Skaiciavimų rezultatai pasitvirtino atlikus laboratorinius avių lukšto pelenų lydymo tyrimus. Ištirta avių lukštų pelenų deformacijos temperatūra buvo 750°C, išsiliejimo temperatūra – 950°C.
  4. Deginant avių lukštą stende, sluoksninėje kūrykloje ant ardyno, pastebėta pelenų aglomeracija, kas taip pat patvirtino pradinis pelenų lydymo įvertinimus.
  5. Žema pelenų lydymosi temperatūra sudaro technologinių sudėtingumų panaudojant avių lukštą kaip biokurą.



4 pav. Katilo prototipas, sukurtas naudojantis tyrimų rezultatais

### Literatūra

1. B.-M. Steenari, O. Lindqvist „High – temperature reactions of straw ash and anti – sintering additives kaolin and dolomite“, Biomass and Bioenergy Vol. 14, No. 1, pp. 67±76, 1998.
2. Dan Bostrom, Nils Skoglund, Alejandro Grim, Christoffer Boman, Marcus Ohman, Markus Brostrom, Rainer Backman „Ash transformation chemistry during combustion of biomass“ 2012.
3. <https://www.ecn.nl/phyllis2/>

### Investigation of oat hull combustion

#### Summary

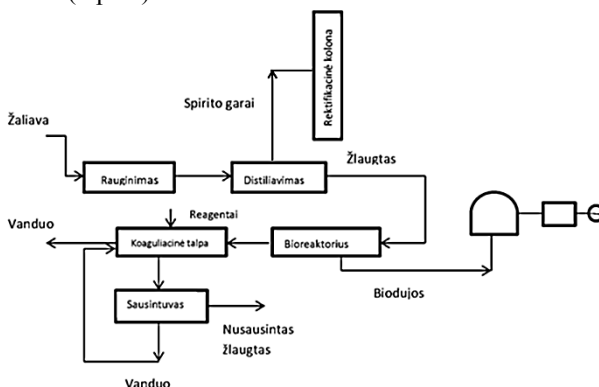
One of the major difficulties related to combustion of oat hull is high alkali content. This means that such fuel tends to slag during combustion processes in furnaces. Moreover, high alkali content (Na and Ka) decreases ash fusion temperatures. In this study, we have analyzed oat hulls as fuel. The proximate and ultimate analysis was performed. According to the received results, a new and improved technology solution was achieved for successful oat hull burning process.

## Žlaugto panaudojimo kurui galimybių tyrimai

Kristina Romančikaitė, Adolfas Jančauskas, Gediminas Kabišius

Kauno technologijos universitetas

**Ivadas.** Šiuolaikiška etilo alkoholio gamyba neatsiejama nuo naujų technologijų diegimo. Šios technologijos leidžia panaudoti etilo alkoholio gamybos metu susidariusius šalutinius organinės kilmės produktus energijai gaminti. Kad tai būtų įgyvendinta, grūdinės kilmės žaliava (žlaugas) turi įveikti daugybę technologinio apdirbimo etapų. Kaip pavyzdys pateikiama etilo alkoholio gamyklos technologinė schema (1 pav.)



1 pav. Technologinė žlaugto susidarymo schema

Etilo alkoholio gamybos metu grūdinės kultūros žaliava yra rauginama. Distiliavimo proceso metu susidarę spirito garai patenka į rektifikavimo koloną, kurioje atliekami keli distiliacijos ciklai ir gaunamas galutinis produktas – etilo alkoholis. Panaudota žaliava – žlaugas, patenka į bioreaktorių, kuriame vykstant anaerobinei fermentacijai, gaminamos biodujos. Šios biodujos vėliau panaudojamos elektros energijai gaminti. Po biodujų gamybos žlaugas patenka į koaguliacinę talpą (nusėdintuvą). Paskutiniame etape nusėdusios organinės medžiagos tiekiamos į sausintuvą. Taip gaunamas šalutinis gamybos produktas – nusausintas žlaugas.

Įmonėje, kurios gamybos pajėgumai yra 24000 l etilo spirito (90%) per parą, nusausinto žlaugto susidaro apytikriai 8250 tonų per metus [1]. Išskyla didelė atliekų utilizavimo problema.

Yra trys žlaugo utilizavimo galimybės: 1) panaudoti nusausintą žlaugą laukams tręšti; 2) gaminti sausą kompostą; 3) panaudoti energijai gaminti.

Panaudojimas laukams tręšti yra tik laikinas problemos sprendimas, nes tręšti laukus metų eigoje galima tik apie 2–3 mėnesius. Sauso komposto gamybai reiktų investuoti į naujos struktūros kūrimą, taip pat reikia įvertinti rinkos poreikius.

Naudojant nusausintą žlaugtą įmonės energetiniams poreikiams tenkinti, būtų galima atsisakyti kitų energijos šaltinių ir sutaupyti lėšas skirtas utilizavimui. Taip galima sumažinti etilo alkoholio gamybos savikainą. Šiame darbe buvo tirta, ar galima panaudoti žlaugtą kurui po anaerobinės fermentacijos.

### Energetinių galimybių įvertinimas

Laboratorijoje buvo nustatyti energetiniai ir kiti žlaugto parametrai: drėgmė, pelenų kiekis, šilumingumas, elementinė sudėtis. Tiriamo kuro drėgmės kiekis siekė 80 %, pelenų kiekis – 13 %. Tyrimo metu nustatytas kuro apatinis šilumingumas 2 000 kJ/kg. Tokio drėgnumo kuras yra energetiškai nevertingas. Norint panaudoti žlaugtą energijai gaminti, reikia sumažinti jo drėgmės kiekį, nes visiškai sauso žlaugto viršutinis šilumingumas – 21 100 kJ/kg. Žemiau pateikiamas žlaugto šilumingumas, esant skirtingam drėgmės kiekiui:

- 50 % -  $Q = 8671$  kJ/kg;
- 55 % -  $Q = 7559$  kJ/kg;
- 60 % -  $Q = 6448$  kJ/kg.

Šilumingumai apskaičiuoti, esant konkrečioms žlaugto drėgnumams. Šio drėgnumo kuras dažniausiai kūrenamas pramoninėse biokuro katilinėse.

Deginant žlaugtą katilinėse, būtina atsižvelgti į Lietuvoje galiojančias taršos normas. Tam buvo atlikta nusausinto žlaugto, po panaudojimo bioreaktoriuje, elementinės sudėties analizė (1 lentelė).

1 lentelė. Žlaugto elementinės sudėties analizė

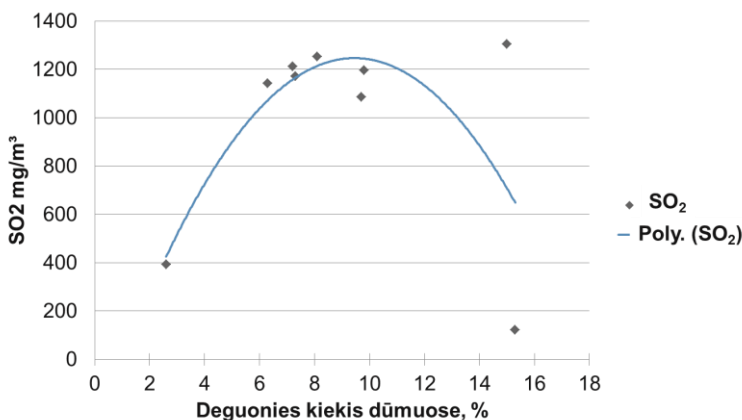
| Elementas     | N     | P     | K    | S    | Cl   | Zn  |
|---------------|-------|-------|------|------|------|-----|
| Kiekis, mg/kg | 32900 | 16950 | 9300 | 3700 | 1130 | 257 |

Kaip matome, didžiausia elementinės sudėties dedamoji yra azotas. Esant didesniai azoto kiekiui žlaugte, degimo produktuose susidarys didesnės NO<sub>x</sub> koncentracijos, kurios gali viršyti LAND 43-2013 nustatytas ribines vertes [2].

**Tyrimo metodika.** Norėdami nustatyti, kokie kiekiai SO<sub>2</sub> ir NO<sub>x</sub> susidaro deginant žlaugtą, bandymai buvo atlikti Kauno technologijos universiteto šilumos ir atomo katedros kuro deginimo laboratorijoje. Eksperimentui naudotas 13 kW automatizuotas centrinio šildymo katilas su mechanine pakūra KSM-175-13U (3 pav.). Šis granulinis katilas skirtas deginti įvairias iškastinio ir biokuro rūšis: durpes, medieną ir jos atliekas, akmenis anglis.

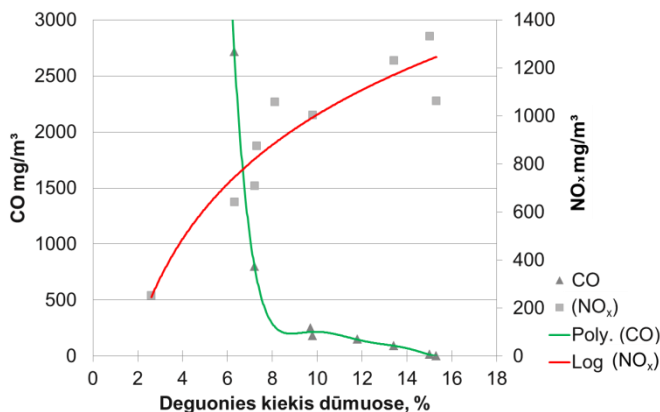
Kurui buvo paruoštas išdžiovintas, 30 % drėgnumo, žlaugas. Žlaugto frakcijos dydis paruoštas pagal iš anksto numatytus katilo gamintojo reikalavimus, t. y. ≤ 38 mm. Eksperimento pradžioje katilas buvo pašildytas su prie sistemos prijungtu dujiniu katilu. Katilo grįžtamo vandens temperatūrai pasiekus 65 °C, dujinis katilas buvo išjungtas. Įjungus kuro maitintuvą, iš kuro bunkerio žlaugas buvo tiekiamas į katilo pakūrą.

**Tyrimo rezultatai ir analizė.** Dujinių teršalų  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  ir CO koncentracijų išmetamuose dūmuose matavimai buvo atlikti dūmų analizatoriumi „IMR 2000“. Degimo metu susidaręs sieros dioksidas, atsižvelgiant į deguonies perteklių dūmuose, pateiktas 2 pav.



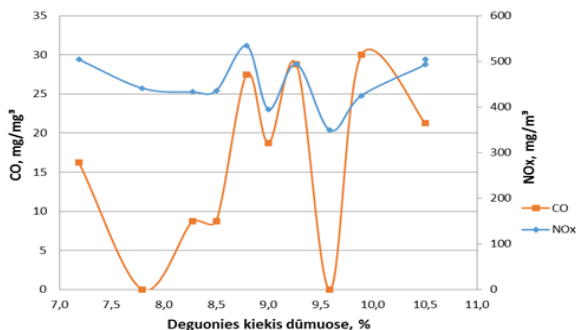
2 pav.  $\text{SO}_2$  kiekio priklausomumas dūmuose nuo deguonies pertekliaus

To paties eksperimento metu buvo išmatuotas  $\text{NO}_x$  ir CO priklausomumas nuo deguonies pertekliaus (3 pav.)



3 pav.  $\text{NO}_x$  ir CO kiekio priklausomumas dūmuose nuo deguonies pertekliaus

**Tyrimai pramoniniame biokuro deginimo katile.** Žlaugto degimo bandymai buvo atlikti 4 MW galios pramoniniame vandens šildymo katile. Tyrimo metu buvo deginamas medienos skiedrų ir nedžiovinto žlaugto (73 % drėgnumo) mišinys. Eksperimento metu gauti rezultatai pateikti 4 pav.



4 pav. NO<sub>x</sub> ir CO emisijų priklausomumas nuo deguonies kiekio dūmuose

Kaip matyti 4 pav., esant skirtingam deguonies pertekliui dūmuose, NO<sub>x</sub> koncentracija dūmuose išlieka beveik pastovi. Tačiau CO kiekis kito neproporcingai deguonies pertekliui.

### Išvados

1. Stendiniuose tyrimuose atlikti išdžiovinto žlaugto degimo tyrimai parodė, kad NO<sub>x</sub> koncentracijos viršija leistinas, jeigu degimas yra pakankamai pilnas (CO koncentracija žema). Rezultatai parodė, kad esant nepakankamam sudegimui, kai CO koncentracijos aukštos, NO<sub>x</sub> koncentracija būna gerokai mažesnė.
2. Deginant nusaustiną iki 73 % žlaugtą pramoniniame 4 MW katile kartu su smulkintos medienos kuru, azoto oksidų koncentracija kito nuo 350 mg/m<sup>3</sup> iki 530 mg/m<sup>3</sup>, esant visiškam ir kokybiškam kuro sudegimui, t. y. CO koncentracijos degimo produktuose buvo žemiau 35 mg/m<sup>3</sup>. Tai rodytų, jog galimas didelės drėgmės žlaugto deginimas kartu su įprastiniu medienos atliekų kuru.
3. Kad žlaugto panaudojimas kurui būtų energetiniu požiūriu efektyvus, reikėtų žlaugto drėgmę sumažinti bent iki 55–60 %.

### Literatūra

1. Asociacijų informacinė ir naujienų sistema - <http://www.vadovauk.lt/messages/view/2220>.

2. Įsakymas dėl išmetamų teršalų iš kurų deginančių įrenginių normų LAND 43-2013, patvirtintos Lietuvos Respublikos aplinkos ministro įsakymu 2013 m. balandžio 10 d. įsakymu NR. D1-244.

## **Research on possible use of distillery refuse as fuel**

### **Summary**

The most common problem for all ethyl alcohol producers is a large amount of residues – distillery refuse. In this article, one possible solution on how to use these residues is presented. The best solution to utilize the distillery refuse is to burn it. Hence, NO<sub>x</sub> and SO emissions were studied during fermented grain burning process. The results show that the amount of NO<sub>x</sub> and SO emissions during the refuse burning process is too high. There is the risk of incompliance with the LAND 43-2013 pollution requirements.

## **Biokuro mineralinės dalies įvertinimas**

Ignas Ambrazevičius, Agnė Aužbikavičiūtė  
UAB „Enerstena“ Mokslinių tyrimų ir vystymo centras

Biokurą sudaro visas kompleksas organinių ir mineralinių medžiagų. Didžiausią įtaką kuro savybėms turi šeši pagrindiniai elementai (C, H, O, N, S, Cl) ir aštuoni kiti elementai (Si, Al, Ca, K, Mg, Na, P, Fe). Biokuro cheminė sudėtis bei fizinės savybės turi didelę įtaką degimo procesui, deginimo įrangos eksploatacinėms savybėms ir ilgaamžiškumui. Pagrindiniai aspektai, kuriuos lemia biokuro mineralinė sudėtis – technologiniai ir ekologiniai.

Vis didėjant poreikiui deginti įvairios kilmės biokurą (dažniausiai agro biomase) ir griežtėjant teršalų išmetimų normoms Europos Sąjungoje, taip pat siekiant tinkamai parinkti biokurą deginančius įrenginius, atsiranda būtinybė įvairiapusiškai įvertinti biokuro mineralinę sudėtį.

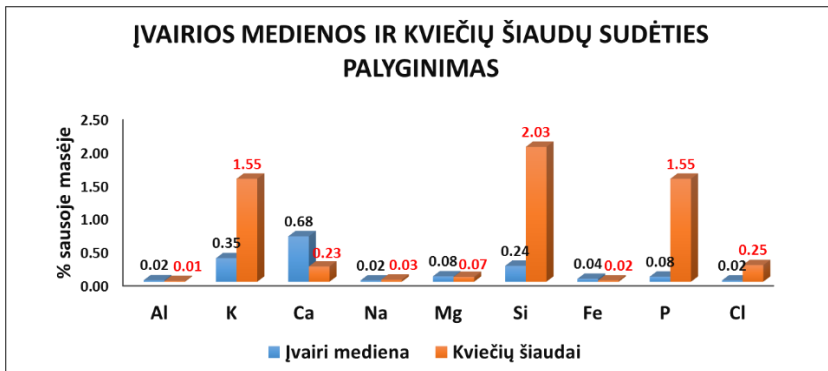
UAB „Enerstena“ Mokslinių tyrimų ir vystymo centro laboratorijoje atliktas medienos skiedros ir kviečių šiaudų elementinės sudėties įvertinimas ir gautų rezultatų palyginimas. Vadovaujantis kitose Lietuvos mokslo įstaigose atliktais tyrimų rezultatais ir moksline literatūra, atlikta pelenų sudėties analizė bei įvertintos Lietuvoje galiojančios biokuro pelenų kokybės normos.

### **Bendros žinios apie biokuro sudėties svarbą**

Pagrindiniai technologiniai aspektai, kuriuos nulemia biokuro sudėtis – pelenų elgesys degimo zonoje, degimo produktų korozinės savybės bei pelenų lakumas. Pelenų elgesys degimo zonoje svarbus parenkant degimo technologiją, įrangą ir liepsnos temperatūros valdymo būdus. Atrenkant degimo technologijoms naudojamas medžiagas, šilumos mainų paviršius ir temperatūrinius režimus – svarbu įvertinti degimo produktų korozines savybes. Pelenų lakumas – labai svarbu, norint prognozuoti paviršių užsiteršimą, valymo būdą bei katilo stabdymo dažnumą.

Ne mažiau svarbūs yra ekologiniai aspektai, kuriuos taip pat lemia biokuro sudėtis. Nuo to, kokie elementai vyrauja biokuro sudėtyje priklauso teršalų (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> ir kietųjų dalelių) emisijos į atmosferą. Šis aspektas svarbus parenkant degimo technologiją, dūmų šalinimo įtaisus ir nulemia teršalų mažinimo priemonių būtinumą. Pelenų sudėtis – tai dar vienas itin svarbus ekologinis aspektas, į kurį reikia atsižvelgti numatant pelenų šalinimo būdą, parenkant aerolinių pelenų gaudymo įrenginio tipą ir prognozuojant pelenų panaudojimo perspektyvas.

Kviečių šiaudų sudėtyje yra didelis natrio ir kalio kiekis. Natriui (Na) ir kaliui (K) dalyvaujant reakcijose kartu su kitais elementais, stipriai mažėja pelenų lydumo temperatūra [1]. Kviečių šiaudų sudėtyje esantis fosforas, chloras bei jo junginiai spartina cheminę metalo koroziją.



1 pav. Medienos ir kviečių šiaudų sudėties palyginimas. Tyrimų rezultatai gauti „UAB Enerstena“ Mokslinių tyrimų ir vystymo centro Kuro laboratorijoje

### Biokuro pelenų pasiskirstymas

Skirtingi kuro deginimo metodai lemia skirtingą pelenų pasiskirstymą tarp „dugno“ ir „lakiųjų“. Verdančio sluoksnio pakūrose net 90 % pelenų yra lakūs ir išnešami kartu su dūmais. Griežtėjant teršalų išmetimų normoms ir diegiant verdančio sluoksnio technologijas, būtinos daug investicijų pažangioms dūmų valymo technologijoms. Oro taršos požiūriu ardyninės kūryklos yra labiau priimtinos. Didžioji dauguma (apie 70–80 %) pelenų lieka šiose kūryklose „dugno“ pelenų pavidalu.

1 lentelė. Pelenų pasiskirstymas tarp „dugno“ ir „lakiųjų“

| Deginimo metodas        | Dugno pelenai, % | Išnešami pelenai, % |
|-------------------------|------------------|---------------------|
| Verdantis sluoksnis     | ~ 10             | ~ 90                |
| Ardyninės kūryklos      | 70–80            | 20–30               |
| Kuro tiekimas užbertuvu | 40–50            | 50–60               |
| Dulkių degikliai        | 5–20             | 80–95               |

Galima teigti, kad ardyninės kūryklos yra plačiausiai paplitusios dėl nesudėtingos konstrukcijos ir nedidelių investicijų. Intensyvi biokuro katilų plėtra ir didėjantis vietinio kuro – biokuro naudojimas energijos gamyboje, lygiagrečiai didina susidarančių pelenų kiekį (apie 30–40 tūkst. t/m). Didelis pelenų kiekis ir jų sudėtyje esančių sunkiųjų metalų koncentracijos yra svarbus uždavinys biokuro katilinių savininkams, kurie atsakingi už susidariusių pelenų sutvarkymą.

2 lentelėje pateiktos sunkiųjų metalų koncentracijos pelenuose, kurios nustatytos pagal biokuro sudėtį, kartu skaičiuojant „dugno“ ir „lakiuosius“ pelenus.

2 lentelėje naudojami pažymėjimai: MŪ – miškų ūkiui tręšti pelenais taikomos normos, ŽŪ – žemės ūkio paskirties žemei tręšti pelenais taikomos normos.

2 lentelė. Pelenuose esančių sunkiųjų metalų kiekis ir Lietuvoje galiojančios pelenų kokybės normos (mg/kg) [2]

| Kuro rūšis       | B                               | V     | Ni      | Cr       | Cd      | Pb       | Cu       | Zn        | As    | Hg    |
|------------------|---------------------------------|-------|---------|----------|---------|----------|----------|-----------|-------|-------|
|                  | Normos, mg/kg (sausioje masėje) |       |         |          |         |          |          |           |       |       |
| MŪ               | 200                             | 150   | 20      | 20       | 3       | 40       | 100      | 1000      | 3     | 0,2   |
| ŽŪ               | 250                             | 150   | 30      | 30       | 5       | 50       | 200      | 1500      | 3     | 0,2   |
| Pušis            | –                               | –     | 1–133   | 0,4–59   | 0–39    | 1–163    | 2–183    | 24–1485   | –     | 0     |
| Eglė             | –                               | 32    | 47      | 123–2381 | 0–2381  | 13–6428  | 97–15417 | 617–9047  | 5–238 | 0–607 |
| Gluosnis         | 460–580                         | 13–15 | 158–889 | 111–2903 | 109–254 | 151–8709 | 6–451    | 4000–8412 | 0–55  | –     |
| Beržas           | –                               | –     | 108     | –        | –       | 216      | 595      | 595       | –     | –     |
| Juodalksnis      | –                               | –     | 1,3     | 0,9      | 0,1     | 0,8      | 7        | 81        | –     | –     |
| Ažuolas          | –                               | –     | –       | –        | 10      | 220      | 120      | –         | –     | –     |
| Tuopa            | –                               | –     | –       | –        | 10      | 50       | 60       | –         | –     | –     |
| Medienos skiedra | 0–7                             | 0–22  | 1–62    | 15–91    | 0,1–11  | 1–72     | 28–130   | 427–2600  | 0–62  | 0,01  |
| Kirtimų atliekos | 0–102                           | 8–16  | 3–59    | 33–102   | 0,1–3   | 6–116    | 34–116   | 430–1340  | 2–72  | 0–0,8 |

3 lentelė. Pelenų, naudojamų tręsimui, kokybės normos (mg/kg)

|    | Vokietija | Austrija  | Danija                                | Švedija Mišk | Suomija ŽŪ/Mišk | Lietuva ŽŪ/Mišk |
|----|-----------|-----------|---------------------------------------|--------------|-----------------|-----------------|
| As | 40        | 20/20     |                                       | 30           | 25/40           | 3/3             |
| B  |           |           |                                       | 800          |                 | 250/200         |
| Cd | 1,5       | 5/8       | 5 <sub>šiaud</sub> /20 <sub>med</sub> | 30           | 2,5/25          | 5/3             |
| Cr | 2(CrVI)   | 150/2580  | 100                                   | 100          | 300/300         | 30/20           |
| Cu |           | 200/250   |                                       | 400          | 600/700         | 200/100         |
| Hg | 1         |           | 0,8                                   | 3            | 1,0/1,0         | 0,2/0,2         |
| Ni | 80        | 150/200   | 60                                    | 70           | 100/150         | 30/20           |
| Pb | 150       | 100/200   | 120/250 <sub>medmišk</sub>            | 300          | 100/150         | 50/40           |
| Ti | 1         |           |                                       |              |                 |                 |
| V  |           |           |                                       | 70           |                 | 150/150         |
| Zn |           | 1200/1500 |                                       | 7000         | 1500/4500       | 1500/1000       |

Pagal Lietuvoje galiojančias medienos kuro pelenų tvarkymo ir naudojimo taisyklėse numatytas sunkiųjų metalų koncentracijų normas, miškų ūkyje ir žemės ūkyje panaudoti būtų galima tik juodalksnio medienos pelenus, kuriuose sunkiųjų metalų kiekis neviršija didžiausios leidžiamos koncentracijos (DLK). Galima teigti, kad deginant medienos skiedrą ar kirtimų atliekas (Lietuvos biokuro katilinėse dažniausiai naudojamą kurą) pelenų panaudojimas miškams ar žemės ūkio paskirties dirvoms tręšti nėra galimas, nes sunkiųjų metalų (septynių iš dešimties normuojamų) koncentracijos kelis kartus viršija DLK. Dėl šios priežasties katilinėse susidarę pelenai lieka nepanaudoti ir yra „laidojami“ sąvartynuose.

Lyginant Lietuvoje ir užsienio šalyse galiojančias pelenų kokybės normas matyti, kad Lietuvoje ir Švedijoje normuojamas didžiausias sunkiųjų metalų skaičius. Danijoje ir Vokietijoje šis skaičius gerokai mažesnis. Daugelio sunkiųjų metalų normos Lietuvoje yra griežtesnės nei kitose šalyse. 3 lentelėje raudonai pažymėti skaičiai rodo, kad atitinkamos šalies norma yra didesnė negu Lietuvos.

### **Išvados**

1. Biokuro sudėtis lemia technologinius ir ekologinius aspektus, kurie svarbūs biokuro deginimo technologijų gamintojams bei šių technologijų eksploatuotojams. Biokuro sudėtyje esant didelėms mineralinių elementų koncentracijoms, didėja reikalavimai katilų konstrukcijoms bei reikalaujama pažangesnių dūmų valymo įrenginių.
2. Tyrimais nustatyta, kad medžio skiedros sudėtis ir šiaudų mineralinė sudėtis yra skirtinga. Šiaudų sudėtyje yra didelis kalio, natrio, silicio, chloro bei fosforo kiekis, kas lemia specialių degimo technologijų poreikį kuriant deginimo įrenginius.
3. Deginant Lietuvoje populiariausią biokurą – medienos skiedrą ar miško kirtimo atliekas, susidarę pelenai patenka į sąvartynus, nes pagal Lietuvoje galiojančias pelenų kokybės normas šie pelenai negali būti naudojami žemės ūkio paskirties žemei bei miškų dirvožemiui tręšti.

### **Literatūra**

1. B. M. Steenari, O. Lindqvist „High – temperature reactions of straw ash and anti – sintering additives kaolin and dolomite“, Biomass and Bioenergy Vol. 14, No. 1, pp. 67±76, 1998.7.
2. Options for increased utilization of ash from biomass combustion an co-firing. KEMA Report, 2012.
3. LR įsakymas „Dėl Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2011 m. sausio 5 d. įsakymo nr. d1-14 „Dėl medienos kuro pelenų tvarkymo ir naudojimo taisyklių patvirtinimo“ pakeitimo“ (2014 m. birželio 25 d. Nr. D1-572).

## **Mineral assessment of biomass**

### Summary

One of the major aspects for choosing the appropriate biomass combustion technology is to know the exact biomass chemical composition. With the increasing amount of incombustible mineral matter of biomass, the right choice of combustion technology and flue gas cleaning is highly important.

At this moment in Lithuania, most of biomass boilers use reciprocating step grate combustion technology; therefore, they produce high amount of bed ashes and less fly ashes.

With the increasing demand of local fuel such as biomass, problems of biomass ashes disposal increase. Wood chips produced from pure wood and logging residues constitute the largest part of this biomass.

Despite that, the usage of ashes produced from this fuel is forbidden. The strict normative acts for biomass ashes do not allow using it for fertilization of farmland and forest soil.

## Termofikacinių elektrinių konkurencingumas šilumos ir elektros rinkose

Egidijus Norvaiša, Arvydas Galinis  
Lietuvos energetikos institutas

Straipsnyje analizuojami ir pateikiami atskirų tipų termofikacinių elektrinių ekonominio efektyvumo šilumos ir elektros rinkose vertinimo rezultatai.

**Termofikacinių elektrinių technologijos, jų techniniai bei ekonominiai rodikliai.** Šiame skyrelyje pateikiami investicijų ir eksploataciniai kaštai, skirti iliustruoti jų kitimo tendencijas bendru atveju ir galimą atskiros technologijos galimų kaštų diapazoną. Šis investicijų diapazonas gali būti naudojamas skirtingų variantų skaičiavimams, siekiant parodyti kaip tai lemia elektrinės ekonominius rodiklius ir jų ekonominį patrauklumą.

Pagrindiniai techniniai ir ekonominiai vidutinės elektrinės galios (10-20 MW) dujų turbininių jėgainių duomenys apibendrinti pagal Danijos energetikos agentūros leidžiamo energijos gamybos technologijų katalogo duomenis [1,2] bei JAV aplinkos apsaugos agentūros išleistame termofikacinių elektrinių technologijų kataloge [3] publikuojamus duomenis. Tolesniems skaičiavimams išskiriame 8 variantus (A-H), kurie apima ribines (minimalias ir maksimalias) techninių ekonominių rodiklių reikšmes.

1 lentelė. Dujų turbininių termofikacinių elektrinių parametrai

| Variantas                                      |                     | A    | B   | C    | D   | E    | F   | G    | H   |
|------------------------------------------------|---------------------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| Elektrinė galia                                | MW                  | 10   |     | 10   |     | 20   |     | 20   |     |
| Investicijos                                   | EUR/kW <sub>e</sub> | 1500 |     | 1000 |     | 1250 |     | 800  |     |
| Eksploatacinės                                 | EUR/MWh             | 7,60 |     | 4,50 |     | 6,50 |     | 4,00 |     |
| Past. ekspl. išlaidos                          | EUR/kW              | 7,44 |     | 4,40 |     | 7,26 |     | 4,47 |     |
| Kint. ekspl. išlaidos                          | EUR/MWh             | 6,62 |     | 3,92 |     | 5,43 |     | 3,34 |     |
| Elektrinės ir šiluminės galios santykis, $C_b$ | Sant. vnt.          | 0,64 | 1,0 | 0,64 | 1,0 | 0,64 | 1,0 | 0,64 | 1,0 |
| Elektrinis naudingo veikimo koeficientas       | Sant. vnt.          | 0,36 |     | 0,36 |     | 0,4  |     | 0,4  |     |

Iš 1 lentelėje pateiktų lyginamųjų investicijų matome, kad dujų turbininių termofikacinių elektrinių galiai esant apie 10 MW, jų lyginamosios investicijos yra 1000–1500 EUR/kW diapazone. Šių jėgainių elektrinei galiai išaugus iki 20 MW, lyginamosios investicijos vertinamos 800–1250 EUR/kW. Pastačius 10 MW galios elektrinę, galima tikėtis apie 4,5–7,6 EUR/MWhe eksploatacinių išlaidų (visos eksploatacinės išlaidos perskaičiuotos pagamintos elektros MWh). Elektrinės elektrinei galiai esant 20 MW, jos eksploatacinės išlaidos būtų 4-6,5 EUR/MWhe. Išlaikant tą patį santykį tarp suminių, pastoviųjų ir kintamųjų išlaidų, nurodytų

1 lentelėje, gautume, kad pastoviosios dujų turbininių termofikacinių elektrinių išlaidos būtų apie 4,40–7,44 EUR/kWe, kai elektrinės galia yra ~10 MW ir apie 4,47–7,26 EUR/kWe – elektrinei galiai esant ~20 MW. Lentelėje taip pat pateikti naudingo veikimo koeficientai ir elektrinės bei šiluminės galios santykiai. Techninio tarnavimo laikas tolesniuose skaičiavimuose prilygintas 25 metams.

Termofikacinėse elektrinėse su dujiniais vidaus degimo varikliais dujinis variklis suka elektros generatorių, o šiluma, gauta vėsinant variklį, ar išmetamųjų dujų šiluma gali būti naudojamos kaip šilumos šaltinis centralizuotam šildymui. Įvairiuose šaltiniuose pateikiamų techninių ir ekonominių rodiklių tokio tipo elektrinėms apibendrinimas pateikiamas 2 lentelėje [1–2, 4]. Čia pateikiama apibendrinta informacija 1 ir 5 MWe agregatams. Šios galios diapazonas buvo pasirinktas siekiant atspindėti investicijų ir eksploatacinių kaštų mažėjimą, didinant agregatų vienetinę galią, tačiau nenagrinėjant labai mažų agregatų, kurie, dėl didelio lyginamųjų investicijų ir eksploatacinių kaštų ir negaunant paramos, Lietuvos sąlygomis būtų visai nepatrauklius.

2 lentelė. Kogeneracinių elektrinių su vidaus degimo varikliais parametrai

| Variantas                                               |                     | A     | B   | C    | D   | E    | F   | G    | H   |
|---------------------------------------------------------|---------------------|-------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| Elektrinė galia                                         | MW                  | 1     |     | 1    |     | 5    |     | 5    |     |
| Investicijos                                            | EUR/kW <sub>e</sub> | 1500  |     | 650  |     | 1100 |     | 400  |     |
| Eksploatacinės                                          | EUR/MWh             | 11,00 |     | 9,50 |     | 7,00 |     | 7,00 |     |
| Past. ekspl. išlaidos                                   | EUR/kW              | 4,23  |     | 3,65 |     | 1,09 |     | 1,09 |     |
| Kint. ekspl. išlaidos                                   | EUR/MWh             | 10,31 |     | 8,9  |     | 6,70 |     | 6,7  |     |
| Elektrinės ir šiluminės galios santykis, C <sub>b</sub> | Sant. vnt.          | 0,8   | 1,0 | 0,8  | 1,0 | 0,9  | 1,1 | 0,9  | 1,1 |
| Elektrinis naudingo veikimo koeficientas                | Sant. vnt.          | 0,4   |     | 0,4  |     | 0,45 |     | 0,45 |     |

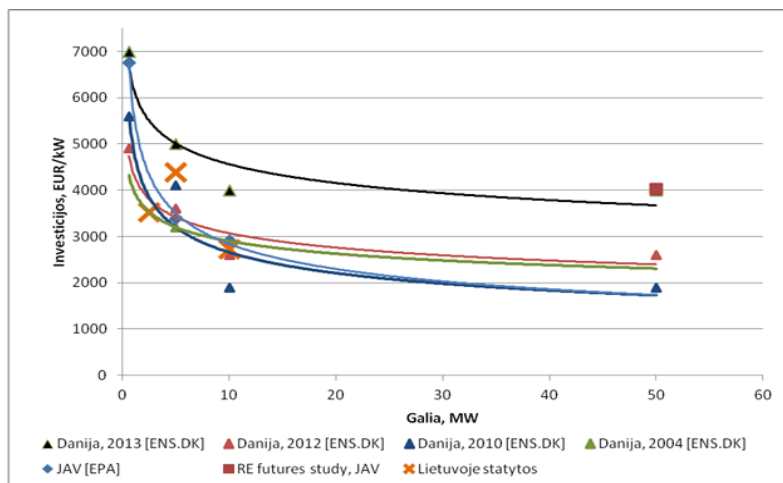
Iš 2 lentelėje pateiktų lyginamųjų investicijų matome, kad termofikacinių elektrinių su vidaus degimo varikliais elektrinei galiai esant apie 1 MW, jų lyginamosios investicijos yra 650–1500 EUR/kW diapazone, o 5 MW 400–1100 EUR/kW diapazone. 1 MW elektrinių eksploataciniai kaštai yra 9,5–11 EUR/MWh, o elektrinėms iki 5 MW – apie 7 EUR/MWh. Techninio tarnavimo laikas tolesniuose skaičiavimuose prilygintas 20 metų.

Biokuro termofikacines elektrines sudaro kuro apdorojimo ir tiekimo sistema, aukštų parametų garą gaminantis katilas, garo turbina, generatorius elektrai gaminti. Apžvelgsime biokuro termofikacines elektrines, kurių elektrinė galia 5–10 MW. Įvairiuose šaltiniuose pateikiamų techninių ir ekonominių rodiklių tokio tipo elektrinėms apibendrinimas pateikiamas 3 lentelėje bei 1 paveikslėlyje. Čia apibendrinami duomenys iš 2004–2013 m. Danijos energetikos agentūros technologijų katalogų [1–2, 5–6], JAV aplinkos apsaugos agentūros termofikacinių

elektrinių technologijų katalogo [3] bei studijoje „Atsinaujinančios elektros energijos ateitis“ (JAV) pateikiami duomenys [7].

3 lentelė. Biokuro termofikacinių elektrinių parametrai

| Variantas                                      |                     | A     | B   | C     | D   | E     | F   | G     | H   |
|------------------------------------------------|---------------------|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
| Elektrinė galia                                | MW                  | 5     |     | 5     |     | 10    |     | 10    |     |
| Investicijos                                   | EUR/kW <sub>e</sub> | 5000  |     | 3300  |     | 4600  |     | 2700  |     |
| Ekspluatacinės                                 | EUR/MWh             | 40,00 |     | 23,00 |     | 19,00 |     | 19,00 |     |
| Past. ekspl. išlaidos                          | EUR/kW              | 40,00 |     | 29    |     | 40,00 |     | 23    |     |
| Kint. ekspl. išlaidos                          | EUR/MWh             | 6,40  |     | 3,9   |     | 6,40  |     | 3,2   |     |
| Elektrinės ir šiluminės galios santykis, $C_b$ | Sant. vnt.          | 0,25  | 0,3 | 0,25  | 0,3 | 0,25  | 0,3 | 0,25  | 0,3 |
| Elektrinis naudingo veikimo koeficientas       | Sant. vnt.          | 0,25  |     | 0,25  |     | 0,29  |     | 0,29  |     |



1 pav. Biokuro termofikacinių elektrinių lyginamosios investicijos

Iš 1 pav. pateiktų duomenų matyti, kad kaip ir kitų technologijų atveju, lyginamosios investicijos gerokai mažėja, didėjant jėgainės instaliuotai galiai. Palyginus JAV ir Danijos šaltiniuose pateikiamus duomenis, matome ženklų skirtumą tarp pateikiamų investicijų į tokio tipo elektrines. Galime teigti, kad šie skirtingi šaltiniai apibrėžia galimas minimalių ir maksimalių investicijų ribas mūsų skaičiavimams.

Iš pateiktų duomenų matyti, kad lyginamosios investicijos 5 MWe biokuro termofikacinėms elektrinėms yra 3300–5000 EUR/kWe diapazone, o 10 MWe elektrinėms – 2700–4600 EUR/kWe ribose. Lyginamieji eksploataciniai kaštai

mažėja, didėjant instaliuotai galiai. Biokuro termofikacinių elektrinių, kurių elektrinė galia apie 5 MW, eksploataciniai kaštai yra 23–40 EUR/MWh, o elektrinėms – apie 10 MW – 19 EUR/MWh. Biokuro termofikacinių elektrinių eksploatacinių išlaidų statistika yra gana skurdi. Todėl šių elektrinių maksimalios eksploatacinės išlaidos prilygintos analogiško dydžio šiaudus kūrenančių elektrinių eksploatacinėms išlaidoms [1]. Tuo buvo stengiamasi atspindėti galimą eksploatacinių išlaidų prieaugį dėl prastesnės biokuro kokybės Lietuvoje, taip pat dėl kitokių biokuro priedų medienos skiedrose (šiaudų, durpių ir t. t.), kas gana dažnai naudojama, siekiant sumažinti išlaidas kurui. Techninio tarnavimo laikas tolesniuose skaičiavimuose prilygintas 25 metams.

Pagrindiniai techniniai ir ekonominiai vidutinės galios (10–20 MW) kombinuoto ciklo dujų turbininių jėgainių duomenys apibendrinti pagal Danijos energetikos agentūros leidžiamo energijos gamybos technologijų katalogo duomenis [1, 2]. Pateikiamų techninių ir ekonominių rodiklių tokio tipo elektrinėms apibendrinimas pateikiamas 4 lentelėje. Matyti, kad lyginamosios investicijos gerokai mažėja, didėjant kombinuoto ciklo elektrinės instaliuotos galios dydžiui. Elektrinės, kurių elektrinė galia iki 10 MW investicijos yra 1000–1600 EUR/kW, elektrinių kurių galia 100 MW – 680–1100 EUR/kW. Kombinuoto ciklo dujų turbininių termofikacinių elektrinių eksploataciniai kaštai yra 2,5–3,7 EUR/MWh.

4 lentelė. Kombinuoto ciklo dujų turbininių termofikacinių elektrinių parametrai.

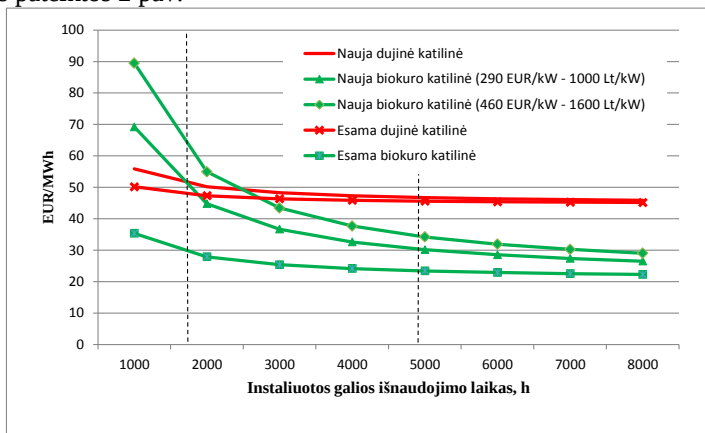
| Variantas                                      |                     | A    | B | C     | D | E    | F | G    | H |
|------------------------------------------------|---------------------|------|---|-------|---|------|---|------|---|
| Elektrinė galia                                | MW                  | 10   |   | 10    |   | 20   |   | 20   |   |
| Investicijos                                   | EUR/kW <sub>e</sub> | 1600 |   | 1000  |   | 1400 |   | 900  |   |
| Eksploatacinės                                 | EUR/MWh             | 3,70 |   | 2,50  |   | 3,70 |   | 2,50 |   |
| Past. ekspl. išlaidos                          | EUR/kW              | 7,40 |   | 5     |   | 5,92 |   | 4    |   |
| Kint. ekspl. išlaidos                          | EUR/MWh             | 2,78 |   | 1,875 |   | 2,96 |   | 2    |   |
| Elektrinės ir šiluminės galios santykis, $C_b$ | Sant. vnt.          | 1,00 |   | 1,00  |   | 1,00 |   | 1,00 |   |
| Elektrinis naudingo veikimo koeficientas       | Sant. vnt.          | 0,41 |   | 0,41  |   | 0,5  |   | 0,5  |   |

**Termofikacinių elektrinių konkurencingumo įvertinimas.** Šis įvertinimas atliekamas naudojant aukščiau pateiktus atskirų termofikacinių elektrinių tipų apibendrintus rodiklius (išskiriant 8 jų galimus variantus), taip pat pagal šias prielaidas:

- Nagrinėjamos šiuo metu rinkoje paplitusios technologijos – dujų turbininės, dujinės su vidaus degimo varikliais, biokuro ir kombinuoto ciklo dujų turbininės termofikacinės elektrinės.
- Neprisirišama prie vietos sąlygų, tačiau laikoma, kad elektrinės dirba termofikaciniu režimu ir galimas elektrinės įrengtos galios išnaudojimo (darbo) laikas per metus yra 8000, 6000, 4000 ir 2000 valandų;

- Laikoma, kad superkama visa termofikacinės elektrinės pagaminta elektros energija, jos supirkimo kaina yra 50 EUR/MWh. Ši kaina priimta atsižvelgiant į dabartinės tendencijas elektros rinkoje bei pagal ilgalaikę NordpoolSpot kainos prognozę [8].
- Laikoma, kad vartojamų dujų kaina yra 456 EUR/tne (1575 Lt/tne). Tai vidutinė 2014 m. gamtinių dujų kaina pagal LŠTA pateikiamą informaciją.
- Biokuro skiedrų kainą priimama lygi vidutinei biokuro kainai 2014 m., kuri skelbiama LŠTA tinklalapyje ir yra 194 EUR/tne (670 Lt/tne).
- Investicijų grąža būtų vykdoma visą elektrinės tarnavimo laiką.
- Taikoma 8 % diskonto norma.

Bendru atveju nauja termofikacinė elektrinė šilumos tiekimo sistemoje turės konkuruoti su šiomis technologijomis: esamais ar naujais biokuro katilais, su esamomis ar naujomis dujinėmis katilinėmis bei visomis galimomis šių technologijų kombinacijomis. Tai reiškia, kad termofikacinė elektrinė pastatyta tokioje sistemoje turėtų šilumą pagaminti ne brangiau negu konkuruojančios technologijos. Vadovaujantis suskaičiuotomis įvairaus tipo katilinių savikainos kreivėmis paskaičiuosime vidutinę šilumos gamybos savikainą trijose teoriškai galimose alternatyviose šilumos tiekimo sistemose: 1) kur šilumos gamybos savikainą (išskyrus pikinių apkrovų laiką) formuoja esami biokuro katilai, 2) kur šilumos gamybos savikainą (išskyrus pikinių apkrovų laiką) formuoja nauji biokuro katilai ir 3) kur šilumos gamybos savikainą nešildymo laikotarpiu formuoja esami biokuro katilai, šildymo sezone (išskyrus pikinių apkrovų laiką) – nauji biokuro katilai. Visais atvejais pikiniai šilumos poreikiai tenkinami apkraunant dujinius šilumos gamybos katilus, kurie atitinkamu laikotarpiu formuoja šilumos gamybos savikainą. Šilumos gamybos savikainos įvairaus tipo katiluose, atsižvelgiant į apkrovos laiką per metus pateiktos 2 pav.



2 pav. Šilumos gamybos savikaina įvairaus tipo katilinėse

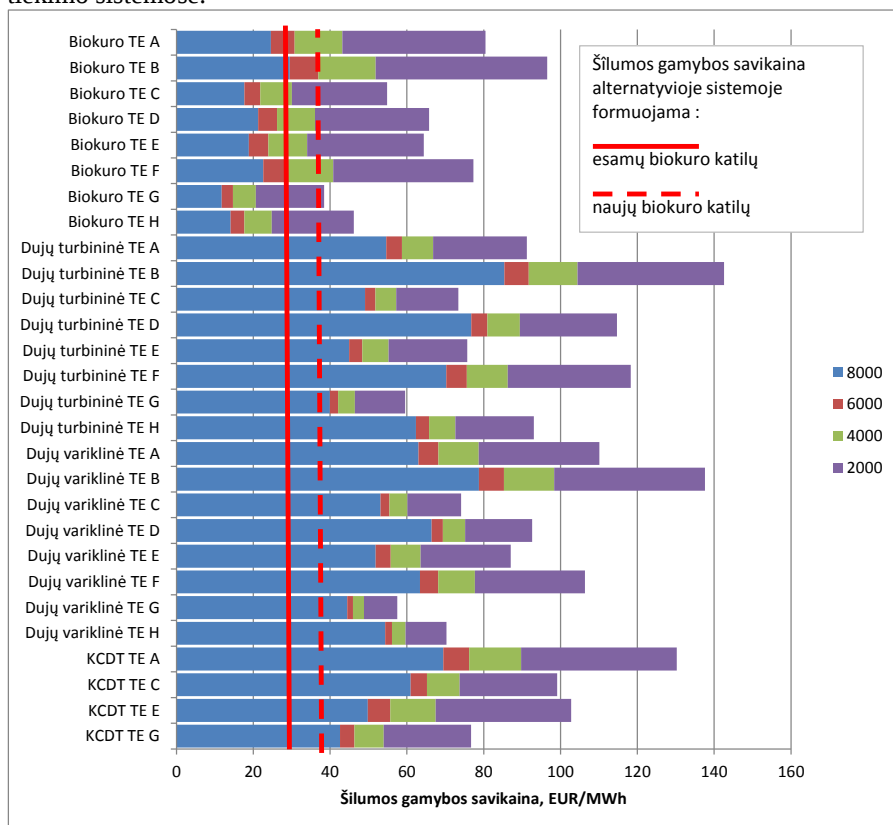
Vadovaujantis pateiktomis savikainomis ir priimant, kad šildymo sezono trukmė 180 parų (4320 val.) per metus, iš jų pikiniam šildymo sezono apkrovimui priskiriamos 1300 val., o likusios 4440 val. vasaros sezonas, kurio metu yra tik karšto vandens poreikiai, galime suskaičiuoti vidutinę šilumos savikainą šilumos tiekimo sistemoje kiekvienu iš minėtų a, b ir c atveju. Gauname, kad jei šilumą tiekia esami biokuro katilai, vidutinė šilumos savikaina per metus yra 27,3 EUR/MWh, jei šilumą tiekia nauji biokuro katilai, vidutinė šilumos savikaina per metus yra 37,1 EUR/MWh, jei veikia įvairaus tipo katilai, vidutinė šilumos savikaina per metus galėtų būti 33,2 EUR/MWh. Taigi, nauja biokuro katilinė, norėdama konkuruoti tokio tipo šilumos tiekimo sistemoje, turėtų pagaminti šilumą ne brangiau negu čia paminėta šilumos savikaina.

Pagal pateiktą apibendrintą informaciją apie termofikacinių elektrinių techninius-ekonominius rodiklius ir kitas prielaidas, apskaičiuojame šilumos gamybos savikainas įvairaus tipo termofikacinėse elektrinėse. Minėta, kad kiekvienam termofikacinės elektrinės tipui skaičiuojame 8 skirtingus variantus, kurie skiriasi techniniais-ekonominiais parametrais. Variantų grupės A, B, C, D ir D, E, F, G skiriasi pagal instaliuotą galią. Tada vienodos galios jėgainėms skaičiavimuose priimame ribinius (maks. A, B ir min. C, D) investicijų ir eksploatacinių kaštų įvertinimus, taip pat jėgainėms su vienodomis investicijomis dar išskiriame variantus su skirtingais elektrinės ir šiluminės galios santykiais, kas irgi lemia elektrinių gaminamos energijos savikainas. Analogiškai gaunami D, E, F, G variantai ir didesnės galios jėgainėms (žr. 1–4 lenteles). Taip gauname visą spektrą galimų savikainų konkrečiam jėgainės tipui, kuris atspindi įvairias galimas sąlygas statant jas konkrečioje šilumos tiekimo sistemoje. Vidutinės šilumos savikainos įvairaus tipo termofikacinėse elektrinėse pateikiamos 3 pav.. Taip pat palyginimui paveikslėlyje raudonomis linijomis pateikiamos ir alternatyvių šilumos tiekimo sistemų šilumos gamybos savikainos (1 ir 2 variantai). Jei termofikacinės elektrinės gaminamos šilumos savikaina ne didesnė už vandens šildymo katilų formuojamą savikainą, laikome, kad šio tipo elektrinės galėtų sėkmingai konkuruoti elektros ir šilumos rinkose bei patenkinti bazinius ir iš dalies šildymo sezono poreikius.

Gauti rezultatai rodo, kad įvertinant pateiktas prielaidas vidutinė šilumos energijos savikaina labai priklauso nuo technologijos tipo, naudojamo kuro bei nuo vidutinės elektrinės apkrovos per metus (3 pav.).

Pagal gautus rezultatus matyti, kad mažiausia šilumos savikaina gauname biokurą deginančiose termofikacinėse elektrinėse. Apskaičiuota šilumos gamybos savikaina, elektros energiją parduodant rinkos kainomis, išlieka žemesnė už biokuro katilų (tikėtinos šilumos rinkos kainos) arba artima jai, jei tokios biokuro kogeneracinės elektrinės  $T_{\max}$  lieka didesnis už 4000 h/metus. Ir tik tuo atveju (A, B variantai), kai jų investicijos priimamos labai aukštos, o jų instaliuota elektrinė galia ne didesnė 5 MW, šių elektrinių darbo laikas turėtų būti nemažesnis nei 6000–7000 h/metus, norint gauti mažesnę savikainą lyginant su alternatyvių šilumos

tiekimo sistemų šilumos gamybos savikainomis. Taigi, biokuro termofikacinė elektrinė galėtų būti gana ekonomiškai patrauklus objektas centralizuoto šilumos tiekimo sistemose.

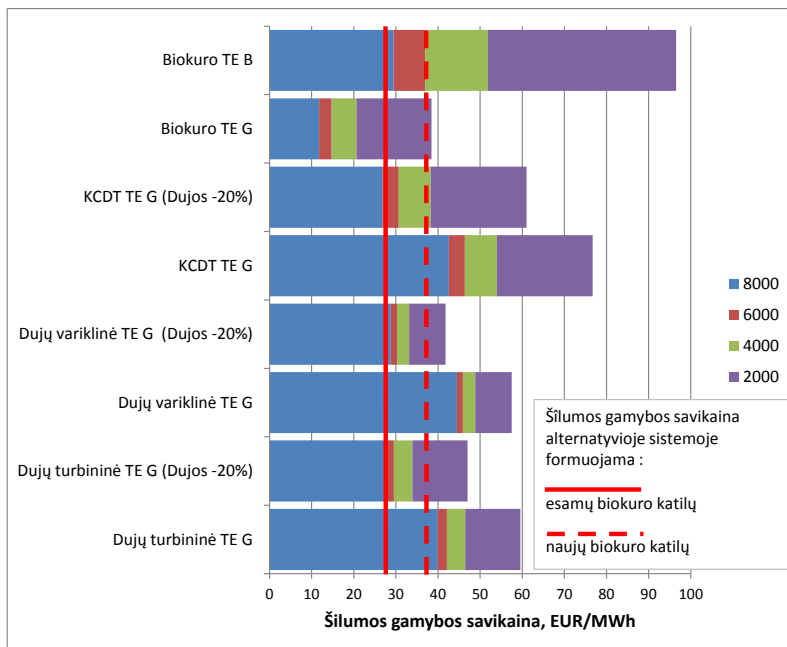


3 pav. Šilumos gamybos savikaina termofikacinėse elektrinėse

Visų nagrinėtų tipų dujinės termofikacinės elektrinės per metus dirbdamos 8000 ar daugiau valandų negali pateikti pigesnės šilumos negu alternatyvios šilumos tiekimo sistemos tiekiančios šilumą iš katilinių, ir bendru atveju, nebūtų konkurencingos tokioje šilumos tiekimo sistemoje. Atsižvelgdami į susiklosčiusią situaciją iškastinio kuro rinkoje, panagrinėjome kaip keistųsi dujinių termofikacinių elektrinių gaminamos šilumos savikainos jei gamtinės dujos dar atpigtų 20 % lyginant su vidutine 2014 m. kaina. Skaičiavimų rezultatai pateikiami 4 pav.

Čia palyginamos dujas deginančių termofikacinių elektrinių savikainos priimant geriausius įmanomus parametrus pagal surinktą techninę ekonominę informaciją, t. y. minimalios investicijos, mažiausi eksploataciniai kaštai bei

geriausias elektros gamybos efektyvumas (G variantas). Tik tokiu atveju, gamtinių dujų atpigimas galėtų sumažinti šių elektrinių gaminamos šilumos savikainą iki konkurencingos, esant didesniai nei 4000 h/metus apkrovimui. Jei tokio tipo termofikacinių elektrinių techniniai ekonominiai parametrai nukryptų nuo pigiausio varianto, šių elektrinių gaminamos šilumos savikaina liktų aukštesnė už alternatyvios šilumos tiekimo sistemos, tiekiančios šilumą iš katilinių, net ir papildomai atpigus gamtinėms dujoms.



4 pav. Šilumos gamybos savikaina pigiausiose dujinėse TE (20% pigesnės dujos)

### Išvados

1. Iš nagrinėtų įvairių tipų termofikacinių elektrinių, mažiausią šilumos gamybos savikainą šiuo metu esančiomis sąlygomis gauname biokurą deginančiose termofikacinėse elektrinėse.
2. Dauguma racionaliu režimu dirbančių biokuro termofikacinių elektrinių galėtų būti konkurencingos rinkoje. Dabartinėmis sąlygomis elektros ir šilumos rinkose jos dažnai gali konkuruoti, jei maksimalios galios išnaudojimo laikas nėra mažesnis už 4000 h/metus.
3. Biokuro termofikaciniai įrenginiai, kur tik techniškai galėtų būti įrengiami, turėtų padengti bazinius ir dalį šildymo sezono poreikių, biokuro vandens

- šildymo katilus vis labiau išstumdami pikinių apkrovų zonos link. Pikinėms apkrovoms dengti ir rezerviniams poreikiams tenkinti reiktų rinktis iškastinį kurą vartojančius vandens šildymo katilus
4. Termofikacinių elektrinių ekonominio patrauklumui įvertinti nemažą įtaką daro vietos sąlygos, perspektyvinės kuro ir energijos kainos, šalies energetikos politika. Šie veiksniai šioje analizėje vertinami nebuvo.

### **Literatūra**

1. Catalogue of technology data for energy technologies "Technology Data for Energy Plants", October 2013, Danish Energy Agency and Energinet.dk, Denmark.
2. Catalogue of technology data for energy technologies "Technology Data for Energy Plants", 2010, Danish Energy Agency and Energinet.dk, Denmark.
3. Catalog of CHP technologies, U.S. Environmental Protection Agency, Combined Heat and Power Partnership, December 2008, <http://www.epa.gov/chp/>
4. Anbieter Übersicht aus den BHKW-Kenndaten 2011. Die ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.
5. Catalogue of technology data for energy technologies "Technology Data for Energy Plants", 2012, Danish Energy Agency and Energinet.dk, Denmark.
6. Catalogue of technology data for energy technologies "Technology data for electricity and heat generating plants", 2004, Danish Energy Authority and Elkraft, Denmark.
7. Renewable Electricity Futures Study: Chapter 6: Biopower Technologies. Preliminary draft report, September 20, 2010.
8. Botnen, Olav Johan. Long Term Expectations for price development in the Nordic Power Market 2013-2035. PF Norsk Energiforening, Oslo, 27 November 2012.

### **The competitiveness of CHP power plants in the heat and electricity markets**

#### **Summary**

The paper analyses and presents the economic effectiveness of CHP power plants. The economic and technical parameters of the most popular types of CHP power plants are summarized in the text. The cost of produced heat in different types of CHPs is calculated taking into account presented parameters and assumptions. The least cost heat is produced in the CHP based on biomass. These power plants are competitive in the electricity and heat supply sectors under the current market conditions.

## The Utilization of Industrial Hemp for Energy Production and Saving

Vidas Lekavičius, Peteris Shipkovs, Galina Kashkarova, Kristina Lebedeva,  
Lana Migla

Institute of Physical Energetics, Latvia

Industrial hemp (*Cannabis sativa L.*) is a multipurpose plant which is used in various industries, including textile, pulp and paper, construction. Hemp growing has long-standing traditions in many European countries, but its cultivation has been restricted due the fact that some hemp varieties contain narcotic agent *d-9-tetrahydrocannabinol* (THC). However, industrial hemp varieties with a low THC content are permitted to be grown in European Union. In Lithuania, the popularity of hemp growing has significantly increased after the new legislation measures have been implemented in 2013. The purpose of this paper is to analyse hemp utilization options for energy production and conservation.

The ways of hemp utilization were changing along with the industrial development, but hemp continued to be used for a wide range of purposes. The most recent hemp straw utilization tendencies are depicted in Fig. 1.

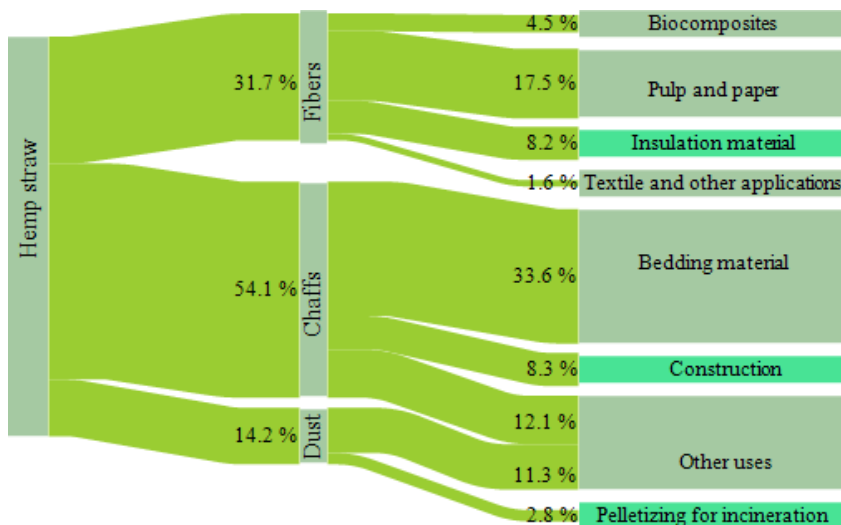


Fig. 1. Hemp straw utilization options (based on Carus, Karst, Kauffmann, Hobson, and Bertucelli (2013))

The data in Fig. 1 are taken from the survey conducted by European Industrial Hemp Association. It depicts current practice, but proportions may change very

rapidly due to demand alterations, development of new products, etc. Currently, the largest share of hemp straw is used in pulp and paper industry or as bedding material. Energy-related utilization of industrial hemp is twofold: it can be used for energy production as a fuel which is directly burned or as a feedstock for biogas or liquid biofuel production. On the other hand, hemp-based materials can be utilized for energy efficiency improvements through thermal insulation. The latter option currently makes 8.2 percent of the total hemp straw utilization (approximately a quarter of hemp fibres is used for production of thermo-insulating materials). Hemp usage in construction sector can also be treated as energy conservation measure: hempcrete has better thermal conductivity characteristics than conventional concrete (Benfratello et al., 2013; Matshwi & Kajimo-Shakantu, 2014) and thus can contribute to more efficient use of energy resources.

Probably the most basic hemp utilization option for energy purposes is direct burning. The comparison of calorific values of some biomass fuels is provided in Table 1.

Table 1. Calorific values of some biomass fuels (Rice, 2008)

| Material      | Calorific value (MJ/kg) |      | Assumed moisture content (%) |
|---------------|-------------------------|------|------------------------------|
|               | Gross                   | Net  |                              |
| Hemp          | 18.5                    | 13.4 | 20                           |
| Wood residues | 19.7                    | 10   | 40                           |
| Straw         | 18                      | 13   | 20                           |
| Peat          | 21.5                    | 8.9  | 50                           |

If hemp straw is intended to be used only as a fuel, it can be field-dried to 20% moisture. This makes hemp harvesting in winter reasonable. The net calorific value (the heat available with no further drying and no recovery of latent heat) of hemp in this case is higher than that of many other forms of biomass and much higher than that of peat (Rice, 2008). However, if hemp is used for other purposes, hemp fuel moisture content as well as recommended harvesting season depends on the main technological process.

Hemp straw burning characteristics seem to be more attractive than that of other agricultural fuels. Hemp chemical composition does not cause a high risk of corrosion and sintering as it is the case with cereal straw. Thus, it is argued that “fuel properties of hemp are similar to those of wood and willow and superior to those of cereal straw, miscanthus, and reed canary grass” (Prade, Finell, Svensson, & Mattsson, 2012). However, physical properties of hemp fuel, especially low bulk

density ( $60\text{--}70\text{ kg/m}^3$  in chopped form), may cause some problems in practical application (Rice, 2008) due to complicated logistics. To decrease transportation costs, pellets and briquettes might be produced. Less costly option is the utilization of hemp bales in big boilers for district heating or combined heat and power generation.

Currently hemp fuel market files to exist in Lithuania. However, indicative price range can be taken from the secondary information sources, such as normative documents. Fig. 2 provides the comparison of hemp price with other fuels.

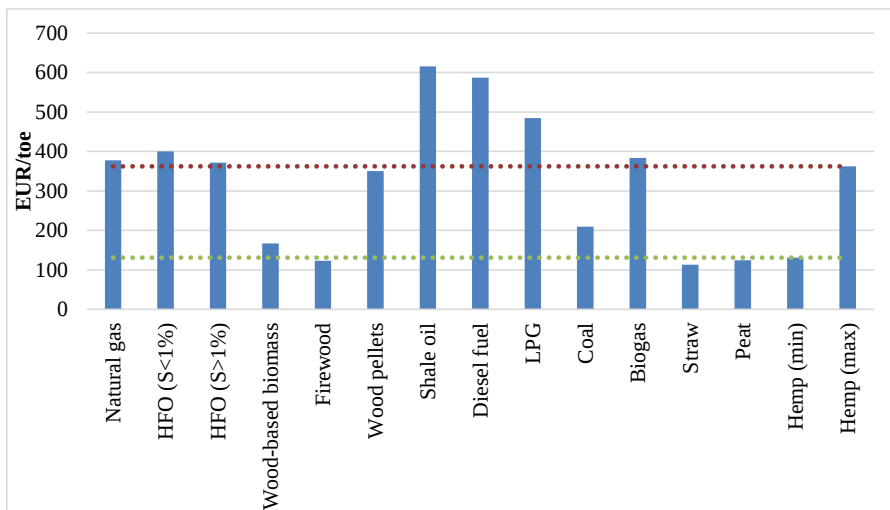


Fig. 2. Fuel prices in Lithuania as of December 2014 and possible hemp price range (EUR/toe)

The comparison provided in Fig. 2 is based on the data from Lithuanian National Commission for Energy Control and Prices (Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija, 2014) and regulation of the Minister of agriculture which sets the normative prices of biological property and agricultural production (LR Žemės ūkio ministro įsakymas, 2014). Based on this data, it can be expected that hemp straw price will fall into the range of 131–362 EUR/toe. Even the lower margin is comparable to the prices of other competing fuels (straw, wood biomass). Wider use of hemp for fuel purposes would add additional pressure to biomass market. Nevertheless, it might be argued that other, more sophisticated hemp utilization ways have to be considered.

Hemp based thermo-insulation is hemp utilization option which is oriented towards more efficient energy use. Hemp-based thermo-insulation products are currently produced in various countries. The majority of hemp insulation products is

produced from hemp fibres and binder, but there are also cases when hemp fibres are mixed with other natural or synthetic materials. Additional substances are also added in order to improve such insulating material properties as fire resistance or mould proliferation. Heat conductivity of typical commercially available hemp thermo-insulation material is in the range of in the range of 0.038–0.043 W/(m·K), density – in the range of 25–42 kg/m<sup>3</sup>. These properties are in line with the properties of other natural insulating materials. Insulation products that include not only hemp fibres, but also hemp chaffs may have inferior thermal conductivity values, but their ratio between the cost and insulating properties has potential to be better. Despite the fact that hemp insulation products are typically more expensive than synthetic competitors, they have occupied a particular market niche due to environmental and health-related reasons.

Production of insulating materials can be considered as preferable hemp utilization option in energy sector also in terms of efficient management of natural resources: much more energy can be saved if particular amount of hemp feedstock is not burned, but used for production of insulating material which is then used for insulation of a low energy efficient building. The hemp waste that remains from production processes of higher added value products can be used as a sustainable fuel in any case.

### **Conclusions**

3. The possibilities to use industrial hemp for energy purposes include both energy production and energy conservation.
4. Hemp fuel characteristics are attractive due to their similarities to wood fuel. However, it might be expected that the price will not be considerably lower than the prices for other kinds of fuel.
5. Heat conductivity of hemp insulation materials is similar to those of other thermal insulation materials (except some synthetic ones). The attractiveness of hemp-based thermal insulation is determined mainly by ecological reasons.
6. It is recommended to give priority to the production of higher value-added products from hemp. However, the remaining hemp waste can be used for fuel purpose.

### **Acknowledgement**

This work is supported by the ESF “Attraction of Human Resources to Science (2<sup>nd</sup> round)” project “Development of the innovative technologies for the accumulation and production of heating and cooling” No 2013/0064/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/050.

## Literature

1. Benfratello, S., Capitano, C., Peri, G., Rizzo, G., Scaccianoce, G., & Sorrentino, G. (2013). Thermal and structural properties of a hemp-lime biocomposite. *Construction and Building Materials*, 48, 745-754. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.096
2. Carus, M., Karst, S., Kauffmann, A., Hobson, J., & Bertucelli, S. (2013). The European Hemp Industry: Cultivation, processing and applications for fibres, shivs and seeds.
3. LR Žemės ūkio ministro įsakymas. (2014). Nr. 3D-890. Dėl biologinio turto ir žemės ūkio produkcijos normatyvinių kainų 2015 metais sąrašo patvirtinimo.
4. Matshwi, T., & Kajimo-Shakantu, K. (2014). Potential of Hemp as an alternative sustainable component in building materials Paper presented at the World Sustainable Building 2014, Barcelona.
5. Prade, T., Finell, M., Svensson, S.-E., & Mattsson, J. E. (2012). Effect of harvest date on combustion related fuel properties of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.). *Fuel*, 102, 592-604. doi: 10.1016/j.fuel.2012.05.045
6. Rice, B. (2008). Hemp as a Feedstock for Biomass-to-Energy Conversion. *Journal of Industrial Hemp*, 13(2), 145-156. doi: 10.1080/15377880802391274
7. Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija. (2014). Vidutinė šalies kuro (žaliavos) kaina. from <http://www.regula.lt/siluma/Puslapiai/kuro-ir-perkamos-silumos-kainos/vidutine-salies-kuro-zaliavos-kaina.aspx>

## Kanapių panaudojimas energijos gamybai ir tausojimui

### Anotacija

Straipsnyje apžvelgiamos pramoninių kanapių panaudojimo energijos gamybai ir tausojimui galimybės. Nustatyta, kad nors kanapių kaip kuro charakteristikos yra patrauklios, tikėtina, kad jų kaina nebus ženkliai žemesnė nei kitų panašaus kuro rūšių. Kanapių apšiltinimo medžiagų šilumos laidumas yra panašus į kitų šiltinimo medžiagų, jų patrauklumą didina ekologiniai motyvai. Rekomenduotina kurui naudoti tik atliekas, likusias iš aukštesnės pridėtinės vertės kanapių produktų gamybos.

## Eksperimentiniai užterštos biomasės deginimo tyrimai: CO, CO<sub>2</sub> ir SO<sub>2</sub> teršalų koncentracijų įtaka NO<sub>x</sub> kiekiui

Titas Sereika, doc. dr. Kęstutis Buinevičius  
Kauno technologijos universitetas

Atliekant eksperimentinius deginimo tyrimus, deginant užterštus kurus, pastebėta jog azoto oksidų koncentracija dūmuose priklauso ne tik nuo didesnio ar mažesnio azoto kiekio kure, bet ir nuo kitų degimo proceso metu susidarantių degimo produktų (CO, CO<sub>2</sub> ir SO<sub>2</sub>) kiekio dūmuose.

Siekiant ištirti šias priklausomybes, buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai deginant sausintą nuotekų dumblą ir ligniną. Degimo procesas vykdytas 25 kW galios automatizuotame katile, visi tyrimai buvo atliekami KTU kuro deginimo laboratorijoje su pasirinktais kuro mėginiais, kurie degimo proceso metu generuoja didesnes teršalų koncentracijas, negu yra nustatyta normatyviniame dokumente LAND 43-2013. Išmetamų dujų koncentracijos buvo fiksuojamos elektrocheminiu dūmų analizatoriumi, gauti rezultatai apdorojami programine įranga.

Eksperimentuose kuro deginimas buvo vykdomas tyrimų stende, kieto granulioto biokuro kuro deginimo katile [1]. Užterštos biomasės tyrimuose naudotos medžiagos: ligninas ekstrahuotas iš medienos sieros rūgštimi ir buitinių nuotekų dumblas (džiovintas ir granuluotas).



1 pav. Užterštos biomasės rūšys: kairėje pusėje ligninas, dešinėje – džiovintas ir granuluotas nuotekų dumblas

Lignino sandara yra labai sudėtinga, jo negalima laikyti vienu apibrėžtu cheminiu junginiu, jo struktūroje yra apie 6 proc. vandenilio, anglies 44 – 63 proc. ir deguonies 31–49 proc. [2]. Ligninas yra mažiau atsparus už celiuliozę ir lengviau tirpsta veikiamas sieros rūgštimi arba šarmais. Todėl jo išgavimui iš medienos naudojama sieros rūgštis, kuri vėliau palieka sieros junginių pėdsakus pačiame lignine.

Nuotekų dumblas (toliau – dumblas) – buitinių ir komunalinių nuotekų bei panašios sudėties nuotekų valymo metu susidarantis dumblas. Tyrimuose

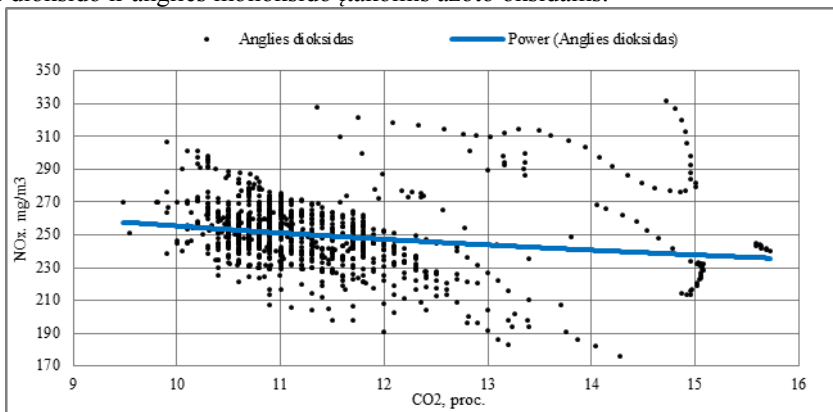
naudojamas apdorotas dumblas – dumblas, kuris yra biologiškai, chemiškai ar termiškai paveiktas, ilgai laikytas arba kitokių procesu paveiktas taip, kad jo savybė fermentuotis ir keliamas sveikatai pavojus jį naudojant yra sumažintas.

Vykdamas eksperimentinius tyrimus buvo atlikta daugiau nei 5000 matavimų. Visi rezultatai buvo apdoroti atsižvelgiant į LAND 43-2013 normų vertes bei perskaičiavus matavimų rezultatus į standartinę O<sub>2</sub> koncentraciją 6 %.

1 lentelė. Išmetamų teršalų iš kurų deginančių įrenginių normos

| Kuro rūšis                                              |                 |                  | Biokuras              |
|---------------------------------------------------------|-----------------|------------------|-----------------------|
| Kurą deginančio įrenginio nominali šiluminė galia, MW   |                 |                  | 1 <sup>3</sup> MW< 20 |
| Išmetamų<br>teršalų ribinė<br>vertė, mg/Nm <sup>3</sup> | SO <sub>2</sub> | esamas įrenginys | 2000                  |
|                                                         |                 | naujas įrenginys | 2000                  |
|                                                         | NO <sub>x</sub> | esamas įrenginys | 750                   |
|                                                         |                 | naujas įrenginys | 750                   |
|                                                         | CO              | esamas įrenginys | 4000                  |
|                                                         |                 | naujas įrenginys | 4000                  |
|                                                         | KD              | esamas įrenginys | 700                   |
|                                                         |                 | naujas įrenginys | 400                   |
| Standartinė O <sub>2</sub> koncentracija, tūrio proc.   |                 |                  | 6%                    |

Apdorojus rezultatus pateikiami apibendrinti grafikai su anglies dioksido, sieros dioksido ir anglies monoksido įtakomis azoto oksidams.



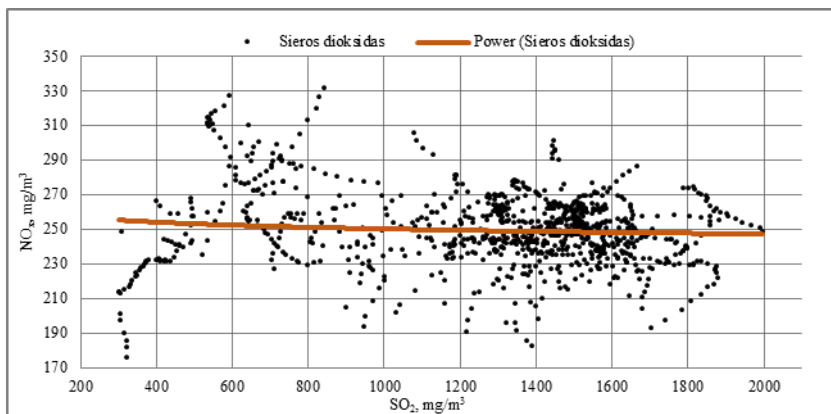
2 pav. Azoto oksidų koncentracijos priklausomybė nuo anglies dioksido kiekio dūmuose, proc.

Gauta lygtis aprašanti grafike pateiktą kreivę. Ji pagal apskaičiuotą CO<sub>2</sub> kiekį dūmuose (kuris priklauso nuo oro pertekliaus) apskaičiuoja azoto oksidų koncentraciją dūmuose:

$$K_{NOx/CO_2} = 383,51 \cdot CO_2^{-0,177} \quad (1)$$

K- apskaičiuota  $NO_x$  koncentracijų reikšmė,  $mg/m^3$ ;

$CO_2$  – anglies dioksido koncentracija dūmuose, %.

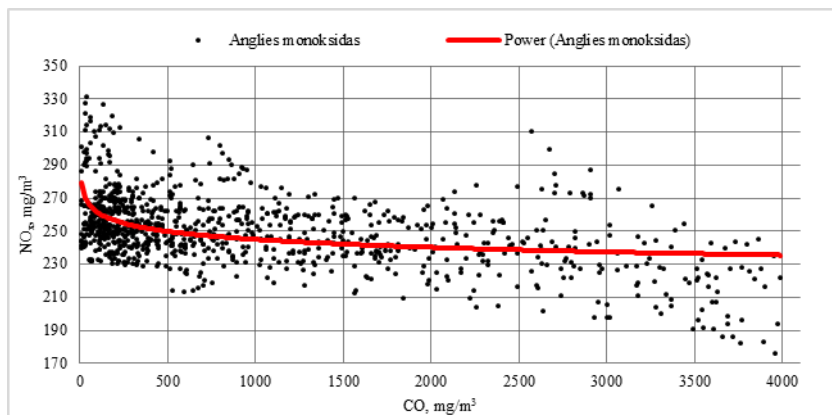


- 3 pav. Azoto oksidų koncentracijos priklausomybė nuo sieros dioksido koncentracijos dūmuose,  $mg/m^3$

Sieros dioksido įtaka azoto oksidų koncentracijai išreikšta laipsnine funkcija:

$$K_{NOx/SO_2} = 281,56 \cdot SO_2^{-0,017} \quad (2)$$

$SO_2$  – sieros dioksido koncentracija dūmuose,  $mg/m^3$ .



- 4 pav. Azoto oksidų koncentracijos priklausomybė nuo anglies monoksido koncentracijos dūmuose,  $mg/m^3$

Anglies monoksido įtaka azoto oksidų koncentracijai išreikšta laipsnine funkcija:

$$K_{NOx/CO} = 289,35 \cdot CO^{-0,029} \quad (3)$$

CO – anglies monoksido koncentracija dūmuose, mg/m<sup>3</sup>.

Apibendrinant gautus rezultatus nustatyta, jog didžiausią įtaką NO<sub>x</sub> koncentracijai turi anglies monoksidas. Apskaičiavus azoto oksidų koncentracijas prie maksimalių leistinų CO ir SO<sub>2</sub> koncentracijų reikšmių (4000 mg/m<sup>3</sup> ir 2000 mg/m<sup>3</sup>) gauta, jog NO<sub>x</sub> koncentracija dūmuose sumažėja apie 21,38 % ir apie 3,5 %. Apskaičiuota anglies dioksido reikšmė parodo oro pertekliaus koeficiento įtaką azoto oksidų įtaka koncentracijoms.

### Išvados

7. Degimo proceso reguliavimas, sudarant palankias CO formavimosi sąlygas pirminėje degimo zonoje (generuojant apie 4000 mg/m<sup>3</sup> koncentraciją) gali sumažinti apie 21,4 % azoto oksidų koncentraciją dūmuose. SO<sub>2</sub> įtaka NO<sub>x</sub> koncentracijų sumažinimui nėra reikšminga.
8. Atlikus šiuos eksperimentinius tyrimus pastebėta jog oro pertekliaus koeficientas turi įtakos azoto oksidų formavimuisi.
9. Tyrimo rezultatus galima pritaikyti biokuro kūrenamuose šilumos generavimo įrenginiuose siekiant sumažinti azoto oksidų koncentraciją dūmuose.

### Literatūra

5. Plečkaitienė R., Buinevičius K., Sereika T. NO<sub>x</sub> mažinimas biomasėje, panaudojant glicerolį. „Mechanikos inžinerija – 2011“. Kaunas: Technologija 2011, p. 78-82. ISBN 978-9955-25-991-6.
6. Habil. dr. V. Miškinis „Kietojo biokuro apskaitos energijos gamybos šaltiniuose taisyklės“ galutinė ataskaita. Kaunas LEI 2011, p. 12. S/31-1274.11.11-G:V2

### **An experimental study of emission (CO CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub>) impact factors which influence NO<sub>x</sub> generation in biomass combustion**

#### Summary

The main idea of researches is to figure out the formation nitrogen oxides impact factor of biomass combustion emissions like (CO, CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub>). This study presents emission and combustion results obtained burning sewage sludge and lignin, which generates higher rate of emissions. The result of research shows, that CO emission has the biggest impact factor to reducing NO<sub>x</sub> and it can reduce emission by up to 20%. The calculation of that can be useable to modify combustion properties just monitoring exhaust emissions.

### 3 BRANDUOLINĖ ENERGETIKA

#### Naujos branduolinės elektrinės aikštelių vertinimas pagal tarptautinius ir nacionalinius reikalavimus

Gintautas Klevinskas, Linas Kilda, Linas Koraliovas  
UAB „VAE SPB“

**Išvadas.** Branduolinės elektrinės (BE) statybos vietos (aikštelės) vertinimas apibrėžiamas kaip BE aikštelės bei jos aplinkos savybių, kurios gali turėti įtakos BE saugai, saugos analizė ir pagrindimas. BE statybos vietos (aikštelės) saugos analizės ir pagrindimo (vertinimo) metu nustatomi visi su statybos vieta (aikšte) ar jos aplinka susiję veiksniai, galintys turėti įtakos branduolinės energetikos objekto branduolinei saugai, įskaitant fizinę saugą ir avarinės parengties planavimą. Jeigu aikštelės vertinimo metu būtų nustatyta trūkumų, papildomai turi būti pasiūlytos branduolinės elektrinės statybos vietos (aikštelės) trūkumus kompensuojančios techninės ar administracinės priemonės. BE aikštelės vertinimą atlieka BE aikštelės vertintojas ir parengia ataskaitą, kurią peržiūri ir galutinę išvadą pateikia branduolinės energetikos saugos reglamentavimą ir priežiūrą atliekanti institucija, atsižvelgusi į kitų aikštelės vertinimo procese dalyvaujančių institucijų išvadas.



1 pav. Supaprastinta BE licencijavimo proceso Lietuvoje schema. Statybos vietos (aikštelės) vertinimas – neatsiejama BE licencijavimo dalis

Kadangi BE aikštelės vertinimo metu gautų rezultatų pagrindu BE aikštelės vertintojas nustato kriterijus ir sąlygas, kuriais vadovaujantis turi būti rengiamas BE projektas, todėl BE aikštelė turi būti įvertinta prieš pradedant rengti BE projektą. Atsižvelgus į tai, BE aikštelių vertinimą galima laikyti vienu iš sudėtinių branduolinės energetikos objektų licencijavimo proceso dalių (1 pav.). BE aikštelė suprantama kaip teritorija, kurioje tirama ir (ar) vertinama galimybė statyti BE (statybos vieta) ir BE priklausančius statinius, bei kurioje planuojamas vykdyti arba vykdomas BE eksploatavimas ir su juo susijusi veikla.

Naujos Visagino branduolinės elektrinės statybos vietos (aikštelių) vertinimas atliktas 2009–2014 m. Jį atliko aikštelių vertintojas – UAB „Visagino atominė elektrinė“ (dabar – UAB „VAE SPB“).

Pats vertinimas yra sudėtingas ir kompleksiškas procesas, kuriam įgyvendinti reikia pasitelkti platų specifinių kompetencijų ratą. Šių darbų metu buvo nustatytos Visagino branduolinės elektrinės aikštelių ir supančios teritorijos geologinės, geotechninės, seismologinės, hidrologinės, meteorologinės sąlygos, gyventojų pasiskirstymas, įvertinti galimi žmogaus sukelti įvykiai, fizinių saugos ir avarinės parengties priemonių įgyvendinimo aspektai ir kiti veiksniai, galintys turėti įtakos branduolinės energetikos objekto branduolinei saugai.

Aikštelių vertinimo darbus daugiausiai atliko Lietuvos ekspertai. Klausimams spręsti buvo suburta patyrusių ekspertų grupė, sudaryta iš įvairių Lietuvos organizacijų specialistų, atstovaujančių geologijos, inžinerinės geologijos, hidrogeologijos, tektonikos ir seismologijos sritims. Specifinių darbų ar unikalių kompetencijų poreikiui patenkinti buvo pasitelkti ne tik vietiniai specialistai, bet ir ekspertai iš tokių šalių, kaip Danija, Suomija, Vengrija, Vokietija, JAV.

Visi aikštelių vertinimo metu gauti rezultatai apjungti į aikštelių vertinimo ataskaitą, kurios apimtis – apie 1000 puslapių. Iš viso ataskaita su priedais sudaro apie 3300 puslapių.

**Tarptautinis ir nacionalinis BE aikštelių vertinimo reglamentavimas.** Branduolinės energetikos objektų aikštelių vertinimą tarptautiniu mastu reglamentuoja Tarptautinės atominės energijos agentūros (TATENA) saugos standartai. Pagrindinis iš jų – saugos reikalavimai NS-R-3 „Branduolinės energetikos objektų aikštelių vertinimas“ (angl. *Site Evaluation for Nuclear Installations*), kuriame sukaupta tarptautinė branduolinių elektrinių aikštelių vertinimo praktika. Papildomai prie šių reikalavimų TATENA yra patvirtinusi šešias saugos rekomendacijas, įgyvendinančias aikštelių vertinimo saugos reikalavimų nuostatas atskiriems aikštelių vertinimo aspektams.

Lietuvos Respublikos branduolinės (atominės) elektrinės įstatymas numato, kad branduolinės (atominės) elektrinės sklypas būtų parenkamas vadovaujantis atitinkamais Lietuvos Respublikos įstatymais ir kitų teisės aktų nustatyta tvarka bei atsižvelgiant į TATENA rekomendacijas. Šis reikalavimas detalizuojamas Branduolinės saugos įstatyme, kuriame numatyta, kad prieš pradedant rengti

branduolinės energetikos objekto projektą, pritaikytą konkrečiai statybos vietai (aikštei), turi būti atlikta branduolinės energetikos objekto statybos vietos (aikštelės) saugos analizė ir pagrindimas. Šios analizės ir pagrindimo rezultatai pateikiami branduolinės energetikos objekto statybos vietos (aikštelės) vertinimo ataskaitoje, kuri turi būti suderinta su Valstybine atominės energetikos saugos inspekcija (VATESI). Todėl, nustatant BE aikštelės vertinimo apimtį, vadovautasi ne tik patvirtintais aikštelės vertinimo metu galiojusiais norminiais dokumentais, bet ir atsižvelgiant į TATENA dokumentus. Be VATESI, BE aikštelių vertinimo ataskaitą pagal kompetenciją taip pat privalo nagrinėti ir teikti išvadas Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba, Sveikatos apsaugos ministerija, Civilinės aviacijos administracija, Lietuvos geologijos tarnyba ir Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamentas.

VATESI branduolinės saugos reikalavimai BSR-2.1.3-2010 „Atominių elektrinių aikštelių vertinimo bendrieji reikalavimai“ nustato bendruosius reikalavimus BE aikštelės vertintojui, atliekančiam BE aikštelės vertinimą, bei bendruosius BE aikštelės vertinimo reikalavimus ir principus. Parengtos BE aikštelės ataskaitos derinimo tvarką su BE aikštelių derinimo procese dalyvaujančiomis institucijomis nustato atskiras Lietuvos Respublikos Vyriausybės nutarimas.

**Naujos Visagino branduolinės elektrinės aikštelės.** Potencialios naujos BE statybos aikštelės yra Lietuvoje, netoli sienos su Baltarusija ir Latvija (2 pav.). Aikštelės yra greta Ignalinos AE, ant pietinio Drūkšių ežero kranto, 39 km nuo Ignalinos miesto.



2 pav. Naujos BE aikštelės ir jų aplinka

**BE aikštelių atitikties saugos reikalavimams kriterijai.** Kadangi BE aikštelės vertinimo metu turi būti išanalizuotos BE aikštelės savybės, kurios gali turėti įtakos BE saugai, atsižvelgiant į galimą jų kitimą numatomais BE statybos, eksploatavimo ir eksploatavimo nutraukimo laikotarpiais, todėl nagrinėti ir vertinti šie naujos BE aikštelių aspektai:

- geologinės, geotechninės ir seisminės sąlygos;
- išoriniai gamtiniai ir žmogaus veiklos sukelti įvykiai BE aikštelėje ir jos aplinkoje;
- BE aikštelės bei aplinkos savybės, turinčios įtakos BE saugai, radionuklidų išmetimų, susidariusių normalaus BE eksploatavimo ir galimų avarių metu, sklaidai bei šių išmetimų poveikis gyventojams ir aplinkai;
- BE aikštelės ir jos aplinkos savybės, galinčios turėti įtakos reagavimui į ekstremalias situacijas;
- BE aikštelės ir jos aplinkos savybės, galinčios turėti įtakos užtikrinant BE fizinę saugą BE statybos ir eksploatavimo laikotarpiu;
- galutinio šilumos sugėriklio (BE aušinimo telkinio) savybės.

BE aikštelė pripažįstama atitinkančia saugos reikalavimus, jei jos tinkamumas pagrindžiamas visais nurodytais aspektais. Atkreiptinas dėmesys, kad BE aikštelė pripažįstama netinkama, jei jos trūkumai negali būti kompensuojami atitinkamai pagrįstais BE projekto techniniais sprendimais bei organizacinėmis priemonėmis.

**Vertinti naujos BE aikštelių aspektai ir jų vertinimo rezultatai.** Naujos BE aikštelių vertinimo procesas buvo vykdomas jį padalijus į dvi pagrindines darbų grupes. Pirmosios darbų grupės apimtyje atlikta anksčiau surinktų geologinių duomenų analizė, o vėliau atlikti nauji geologinių, geotechninių ir seisminių sąlygų įvertinimai. Antrosios darbų grupės apimtyje atlikti netyčinių žmogaus sukeltų įvykių, meteorologinių pavojų, radioaktyvių medžiagų ir gyventojų pasiskirstymo, aplinkos sąlygų, turinčių įtakos avarinės parengties bei fizinės saugos priemonių įgyvendinimui, galutinio šilumos sugėriklio bei užtvindymo pavojų įvertinimai.

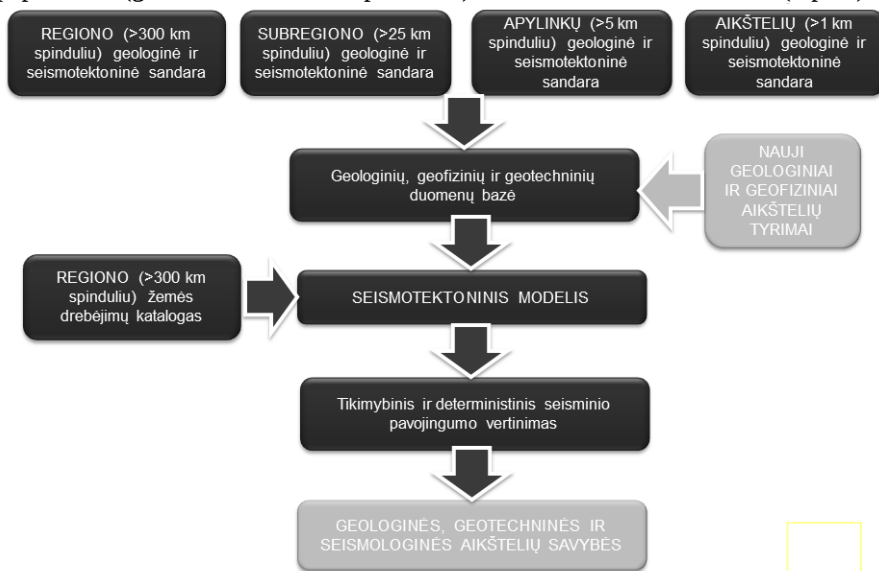
Pirmosios darbų grupės (geologinių, geotechninių ir seismologinių sąlygų vertinimas) tikslai buvo šie:

- vadovaujantis TATENA saugos standartų nustatytais branduolinės energetikos objekto (BEO) statybos aikštelių tinkamumo kriterijais, įvertinti naujos BE aikštelių tinkamumą geologiniu ir seismologiniu atžvilgiais;
- vadovaujantis TATENA saugos standartų nustatytais BEO statybos aikštelių tinkamumo kriterijais, įvertinti naujos BE aikštelių tinkamumą inžinerinių geologinių (geotechninių) sąlygų atžvilgiu.

Pirmosios darbų grupės klausimams spręsti suburta patyrusių Lietuvos geologijos, tektonikos, inžinerinės geologijos, hidrogeologijos bei seismologijos ekspertų grupė, kuri surinko ir išnagrinėjo visą ankstesnę geologinę, geofizinę ir seismologinę informaciją iš daugiau nei 300 km spinduliu aplink BE aikšteles

esančios teritorijos. Šios analizės metu, atsižvelgiant į TATENA ir nacionalinius reikalavimus, buvo numatytas naujų tyrimų poreikis ir apimtys. Toliau abiejose vertinamose BE aikštelėse atlikti nauji ekogeologiniai, elektrinės tomografijos, inžineriniai geologiniai ir hidrogeologiniai tyrimai, detalūs dvimačiai (2D) ir trimačiai (3D) seisminės žvalgybos tyrimai, apimantys ne tik BE aikšteles, bet ir supančią teritoriją bei Drūkšių ežerą, taip pat palydovinės interferometrijos tyrimai.

Apibendrinus visą turėtą informaciją apie BE aikšteles ir naujų tyrimų rezultatus, buvo sudarytas naujos BE aikštelių regiono seismotektoninis modelis, kurio pagrindu atliktas ne tik tikimybinis seisminio pavojingumo vertinimas, bet ir papildomai (gautiems rezultatams patikrinti) – deterministinis vertinimas (3 pav.).



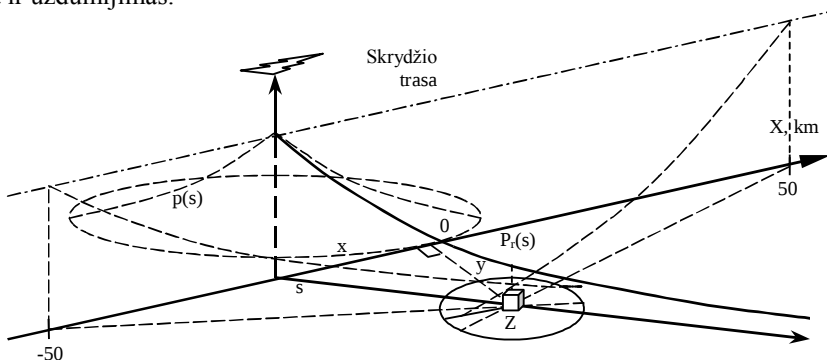
3 pav. BE aikštelių geologinių, geotechninių ir seismologinių savybių vertinimo schema

Šių darbų metu buvo įvertintos naujos BE aikštelių geologinės, tektoninės, geotechninės ir seismologinės sąlygos bei prieita prie išvadų, kad šių aikštelių geologinės inžinerinės ir hidrogeologinės sąlygos yra palankios naujai BE statyti ir abiejose aikštelėse bei jas supančioje teritorijoje nėra veiksnių, kurie galėtų lemti aikštelių netinkamumą branduolinei saugai (veiksnius lūžiai, masyvus gruntų paskydimas ir pan.). Pirmojo etapo metu taip pat buvo nustatyti ir naujos BE aikštelių vertinimo ataskaitoje pateikti parametrai, reikalingi saugiai branduolinei elektrinei projektuoti.

Igyvendinant antrosios darbų grupės veiklas, atlikta daug įvairių vertinimų. Su žmogaus veiksmais ir gamtos veiksniais susiję potencialiai BE pavojingi įvykiai buvo analizuojami, preliminarieji atlikus jų atranką pagal šią schemą:

1. Išorinių įvykių ir susijusių reiškinių identifikavimas, kai sudaromas visų galimų įvykių ir/ar susijusių reiškinių bei galimų padarinių aprašas;
2. Kraštinių sąlygų analizė, kurios metu pagal nustatytus kriterijus apibrėžiami įvykiams būdingi parametrai ir jų reikšmių ribos;
3. Duomenų analizė, kuri apima su įvykio atsiradimu susijusios informacijos analizę bei statistinių ir kt. duomenų surinkimą bei tyrimą;
4. Įvykio vertinimas, kurio metu vykdomas deterministinis ir/ar tikimybinis modeliavimas bei atskirų įvykio atsiradimo atvejų vertinimas;
5. Pasekmių analizė, kurios metu vertinama ir aprašoma, kokie padariniai ir kokio masto pasekmės gali susidaryti įvykus įvykiui.

Iš žmogaus inicijuotų galimų įvykių naujos BE aikštelių saugos atžvilgiu aktualiausi yra dujotiekio bei šilumos ir garo katilinės sprogimas ir gaisras, orlaivio sudužimas (tikimybinis modelis pateiktas 4 pav.) ir miško gaisras. Atkreiptinas dėmesys, kad miško gaisro atveju buvo vertinamas ne tik ugnies ar karščio poveikis, bet ir uždūnijimas.



4 pav. Orlaivio sudužimo r spindulio teritorijoje tikimybinis modelis

Iš gamtos veiksnių inicijuotų įvykių, turinčių įtakos naujos BE aikštelių saugai, aktualiausi yra ekstremalūs vėjai, krituliai, ekstremali sniego danga, ekstremalios temperatūros, viesulas (tornado) ir pūgos.

Vertinant galutinio šilumos sugėriklio patikimumą bei užtvindymo pavojus, buvo analizuojamos Drūkšių ežero savybės bei jo galimybės užtikrinti tinkamą šilumos nuvedimą iš branduolinės elektrinės, esant nepalankiausioms sąlygoms. Taip pat buvo nustatyti galimi minimalūs bei maksimalūs Drūkšių ežero lygiai nepalankiausiomis aplinkos sąlygomis.

Vertinant aplinkos sąlygas, turinčias įtakos avarinės parengties bei fizinės saugos priemonių įgyvendinimui, buvo analizuojami galimi aplinkos veiksniai,

galintys apsunkinti ar užkirsti atitinkančius jam keliamus reikalavimus avarinės parengties planui parengti, ar riboti galimybes branduolinės energetikos objektuose taikomoms fizinės saugos priemonėms įgyvendinti.

Radioaktyvių medžiagų ir gyventojų pasiskirstymo įvertinimas atliktas Visagino branduolinės elektrinės poveikio aplinkai vertinimo apimtyje, todėl naujos BE aikštelių vertinimo ataskaitoje pateikiama Visagino BE poveikio aplinkai informacijos, susijusios su gyventojų pasiskirstymo bei radioaktyviųjų medžiagų potencialios sklaidos įvairiose terpėse analize, santrauka.

Būtina pabrėžti ir tai, kad pagal TATENA saugos standartus, aikštelių vertinimo procesui turi būti užtikrinta kokybė, kuri taip pat buvo vienas svarbiausių aspektų įgyvendinant BE aikštelių vertinimo darbus. Todėl vertinimo procesui įdiegta Kokybės užtikrinimo programa, parengta pagal TATENA dokumentuose pateiktas rekomendacijas, o jos buvo laikomasi visais BE aikštelių vertinimo darbų etapais. Kokybės užtikrinimo programa vadovavosi tiek vertinimą atliekantys ekspertai, tiek ir darbų rangovai.

### **Išvados**

1. 2010–2014 m. pagal tarptautinius ir nacionalinius reikalavimus atliktas naujos Visagino branduolinės elektrinės aikštelių vertinimas ir parengta aikštelių vertinimo ataskaita. Joje konstatuota, kad vertintoms aikštelėms nėra taikytinų aikštelių atmetimo kriterijų ir jose nėra trūkumų, kurių negalima būtų kompensuoti naujos branduolinės elektrinės projekto sprendiniais, aikštelės apsaugos bei administracinėmis priemonėmis. Aikštelių vertintojas priėjo prie išvados, kad abi vertintos aikštelės yra tinkamos naujos branduolinės elektrinės statybai.
2. Aikštelių tinkamumą patvirtino 2010 m. lapkritį įvykusi nepriklausoma Tarptautinės atominės energijos agentūros (TATENA) aikštelių vertinimo komisija. 2014 m. spalį Valstybinė atominės energetikos saugos inspekcija (VATESI) priėmė sprendimą suderinti pateiktą ataskaitą, nes atliktas branduolinės elektrinės aikštelės vertinimas atitinka jam keliamus reikalavimus, aikštei vertinti naudojamos prielaidos, metodikos yra pagrįstos, taip pat BE aikštelės ar jos aplinkos parametrai naudojami vertinti atitinka esamą BE aikštelės būseną. Suformuluotos išvados yra pagrįstos, ataskaita ir kiti susiję dokumentai įforminti tinkamai.
3. Aikštelių vertinimo ataskaitoje numatyti nauji (papildomi) tyrimai ir kitos priemonės bei rekomendacijos, įskaitant TATENA misijos rekomendacijas. Jos bus įgyvendinamos kituose parengiamuosiuose branduolinės elektrinės projekto vykdymo etapuose, žinant konkrečius BE projekto parametrus. Pagrindiniai papildomi tyrimai susiję su branduolinės elektrinės statinių projektavimu (pvz., projektiniai inžineriniai geologiniai tyrimai) ir galimu

radiologiniu poveikiu (turi būti žinomi konkretūs BE avariniai režimai, radionuklidų išmetimo sudėtis, aukštis ir kt. susiję parametrai).

### **Literatūra**

1. Visagino branduolinės elektrinės aikštelių vertinimo ataskaita (2012).
2. Lietuvos Respublikos branduolinės (atominės) elektrinės įstatymas (2007).
3. Lietuvos Respublikos branduolinės saugos įstatymas (2011).
4. Branduolinės saugos reikalavimai BSR-2.1.3-2010 „Atominių elektrinių aikštelių vertinimo bendrieji reikalavimai“ (2010).
5. Branduolinės (atominės) elektrinės statybos vietos (aikštelės) vertinimo ataskaitos peržiūros tvarkos aprašas (2012).
6. Site Evaluation for Nuclear Installations. Safety Requirements No. NS-R-3, IAEA (2003).

### **New nuclear power plant site evaluation according to international and national requirements**

#### **Summary**

New nuclear power plant (NPP) site evaluation shall be conducted before the NPP design preparation, and hence, it is considered as one of the main steps of licensing process in the nuclear facility lifetime. The new Visaginas nuclear power plant site evaluation was conducted according to international and national requirements during 2010–2014, and a comprehensive site evaluation report was prepared. It was concluded that both NPP sites under consideration are suitable for NPP construction. The site evaluation report was approved by the State Nuclear Power Safety Inspectorate (VATESI) and other involved national state authorities. Moreover, the International Atomic Energy Agency (IAEA) expert mission conducted in 2010 also concluded that the sites are suitable for new NPP construction.

## Sistemų komponentų paviršinio radioaktyviojo užterštumo neapibrėžtumo vertinimo aspektai

Gintautas Poškas

Kauno technologijos universitetas, Lietuvos energetikos institutas

**Įvadas.** Šiame straipsnyje, vadovaujantis Ignalinos AE 1-ojo bloko vandens valymo ir aušinimo sistemos (VVAS) įrangos radiologinio užterštumo modeliavimo rezultatais apie VVAS posistemių ir komponentų nuosėdų bendrą aktyvumą ir nuosėdų radionuklidinę sudėtį reaktoriaus galutinio sustabdymo metu [1], atlikta šių rezultatų tikimybinė neapibrėžtumo ir jautrumo analizė. Radiologinio užterštumo rezultatų neapibrėžtumas ir jautrumas įvertintas taikant LLWAA-Decom [2], LLWA-Decom programos išplėtimo modelį ir MATLAB kompiuterines programas.

Atominės elektrinės eksploatavimo metu radioaktyviomis dalelėmis užteršiamas ne tik pats reaktorius, bet ir priverstinės cirkuliacijos kontūras (PCK), PCK posistemės, iš jų ir VVAS. Užteršimą radioaktyviomis dalelėmis lemia aušinimo skysčio (Ignalinos AE atveju – vandens) cirkuliacija šiose sistemose. Pats vanduo yra užteršiamas dėl korozijos ir aktyvacijos procesų, taip pat kuro apvalkų defektų. Esant priverstinei vandens cirkuliacijai, įvairiose sistemose vyksta radioaktyviųjų dalelių nusėdimas ant sistemų komponentų vidinių paviršių.

VVAS palaiko priverstinės cirkuliacijos kontūro vandens kokybę, valydamą PCK vandenį nuo korozijos produktų ir tirpių druskų bei kontroliuodama PCK vandens radioaktyvumo lygį. Taip pat VVAS tiekia vandenį reaktoriui stabdymo arba avariniu atveju, plaunant PCK reaktoriaus techninio aptarnavimo metu bei kaupia 50 °C vandenį į rezervuarą reaktoriui paleisti. Pagal vandens aktyvumą VVAS galima suskirstyti į tris posistemas: nevalyto vandens, išvalyto vandens ir papildomo aušinimo.

**Metodika.** Radioaktyvaus užterštumo rezultatų neapibrėžtumo, atsirandančio dėl įvesties parametų neapibrėžtumo ir įvesties parametų, reikšmingumo analizei, LEI Branduolinės inžinerijos problemų laboratorijoje .NET platformoje sukurtas LLWA-Decom programos išplėtimo modelis ir sąsaja su MATLAB programa. Šiai analizei pasirinktas vamzdis iš slėginių kolektorių į VVAS siurblius (VVAS-5), kuris yra charakteringas ir vienas labiausiai užterštų VVAS nevalyto vandens posistemės komponentas.

LLWA-Decom programos radioaktyvaus užterštumo modelyje naudojama 40 įvesties parametų. Taikant LLWA-Decom išplėtimo modelį, kiekvieno įvesties parametro skaitinės vertės buvo sugeneruotos Monte Karlo metodu. Pagrindinių parametų deterministinės analizės metu įgyjamos nominalios (geriausio įverčio) reikšmės ir jų tikimybinės charakteristikos pateiktos 1 lentelėje. Nesant duomenų apie tikimybinio skirstinio dėsnį, priimta prielaida, jog įvesties parametų įgyjamos

reikšmės pasiskirsto pagal tolygaus tikimybinio skirstinio funkciją. Kad nustatyti reprezentatyvią Monte Karlo metodu generuojamos statistinės imties dydį, buvo atlikti radioaktyvaus užterštumo modeliavimai su 1000 ir 10000 realizacijų. Didinant realizacijų skaičių nuo 1000 iki 10000, atsižvelgiant į radionuklidą, aktyvumo neapibrėžtumas didėja nuo 7,30 % iki 27,75 %. Todėl analizei buvo naudota 10000 realizacijų.

1 lentelė. Pagrindiniai įvesties parametrai ir jų tikimybinės charakteristikos vertinant radioaktyvųjų užterštumą VVAS-5 komponentui

| Parametro pavadinimas                       | Skirstinio funkcija | Nominali (geriausio įvertio) reikšmė | Minimali reikšmė | Maksimali reikšmė |
|---------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|------------------|-------------------|
| Ciklų skaičius                              | tolygus             | 20                                   | 16               | 24                |
| Ciklo trukmė (mėn.)                         | tolygus             | 10,5                                 | 8,40             | 12,60             |
| Dalelių tankis (kg/m <sup>3</sup> )         | tolygus             | 2000                                 | -20 %            | +20 %             |
| Diametras (m)                               | tolygus             | 0,293                                | -20 %            | +20 %             |
| Pav. šiurkšt. (mm)                          | tolygus             | 0,0015                               | -20 %            | +20 %             |
| Fluido temp. (°K)                           | tolygus             | 538,15                               | -20 %            | +20 %             |
| Vid. fluido g. (m/s)                        | tolygus             | 1,65                                 | -20 %            | +20 %             |
| Radionuklidų aktyvumas (Bq/m <sup>3</sup> ) | tolygus             | Nominalios reikšmės                  | -20 %            | +20 %             |
| Dalelių tankis (kg/m <sup>3</sup> )         | tolygus             | 2000                                 | -20 %            | +20 %             |

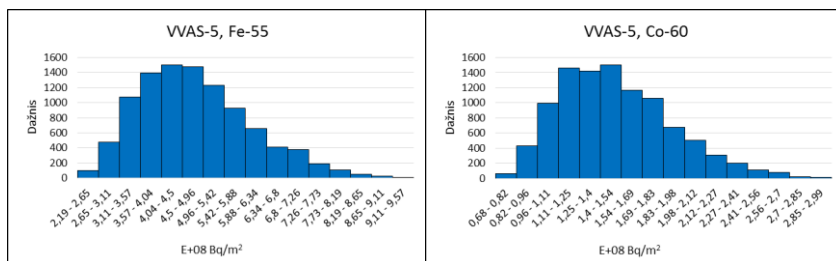
**Deterministinės analizės rezultatai [1].** VVAS komponentų užterštumo analizė parodė, kad labiausiai užteršta yra nevalyto vandens posistemė (NV-1). Tačiau jos komponentai yra užteršti labai netolygiai. VVAS nevalyto vandens posistemės labiausiai užteršti komponentai yra vamzdžiai iš slėginių kolektorių į VVAS siurblius (VVAS-5) ir įėjimo vamzdžiai iš siurblių į regenerorius. VVAS posistemių užterštumas yra labai skirtingas. Mažiausiai užteršto komponento užterštumas yra tikrai 1,42 % palyginus su labiausiai užterštu komponentu. Išvalyto vandens posistemės (NV-2) labiausiai užterštas ir mažiausiai užterštas komponentai sudaro atitinkamai 28,33 % ir 0,86 % palyginti su labiausiai užterštu NV-1 komponentu. Papildomo vandens aušinimo posistemės (NV-3) komponentai tesudaro 0,0005 procento, palyginti su labiausiai užterštu NV-1 komponentu. NV-1 posistemės komponentų didesnę aktyvumą lemia tai, kad komponentai yra prieš valymo įrenginius. NV-1 posistemės komponentų VVAS-5 ir VVAS-6 užterštumas labai skiriasi nuo kitų NV-1 komponentų. Pagrindinė priežastis yra ta, kad šie komponentai yra prieš šilumokaitį, ir jais teka aukštos temperatūros vanduo. NV-2 posistemės mažesnę aktyvumą lemia tai, kad jos komponentai yra už valymo įrenginių. NV-3 posistemės mažą aktyvumą lemia tai, kad šios posistemės vanduo tiesiogiai nesimaišo su NV-1 ir NV-2 vandeniu. Kai kurių komponentų, esančių šilumokaityje, vidinių ir išorinių paviršių aktyvumas labai skiriasi, nes vienas paviršius apiplaunamas užterštu vandeniu, o kitas išvalytu arba neužterštu vandeniu.

VVAS posistemėse cirkuliuoja nevienodo užterštumo ir radionuklidinės sudėties vanduo. Vandens užteršimą daugiausia lemia Cs-134 (NV-1 ir NV-3 ~31 %; NV-2 ~50 % bendro užterštumo) ir Cs-137 (NV-1 ir NV-3 ~22 %; NV-2 ~35 % bendro užterštumo) radionuklidai.

Nuosėdose vyraujantis radionuklidas yra Fe-55: NV-1 posistemėje ~56 % – ~59 % bendro užterštumo; NV-2 posistemėje ~55 % – ~56 % bendro užterštumo;

**Tikimybinių analizės rezultatai.** Kaip minėta, tikimybiniu būdu buvo įvertintas ant VVAS-5 komponento sienučių susidarantių nuosėdų aktyvumo neapibrėžtumas, kuriam įtakos gali turėti įvesties parametrijų neapibrėžtumas. Nuosėdų aktyvumo neapibrėžtumas, atsižvelgiant į radionuklidą, kinta nuo -46 % iki 195 % lyginant su nuklido nominalia reikšme. Neapibrėžtumo įtaka reikšmingiausia, didžiausią nominalią nuosėdų aktyvumo reikšmę turintiems radionuklidams, todėl Fe-55 radionuklido, atsižvelgiant į įvesties duomenų neapibrėžtumą, nuosėdų aktyvumo reikšmės gali kisti nuo  $2,19\text{E}+08$  iki  $9,57\text{E}+08$  Bq/m<sup>2</sup>. Tačiau pusę reikšmių kinta gerokai mažesniu intervalu – nuo  $3,87\text{E}+08$  iki  $5,52\text{E}+08$  Bq/m<sup>2</sup>. Taip pat nemaža rezultatų neapibrėžtumo įtaka yra ir kitiems korozijos produktų radionuklidams: Co-60, Mn-54, Ni-63, Fe-59 ir Co-58. Kitų radionuklidų nuosėdų aktyvumo reikšmių kitimo intervalas vidutiniškai daugiau nei 1000 kartų mažesnis palyginus su Fe-55.

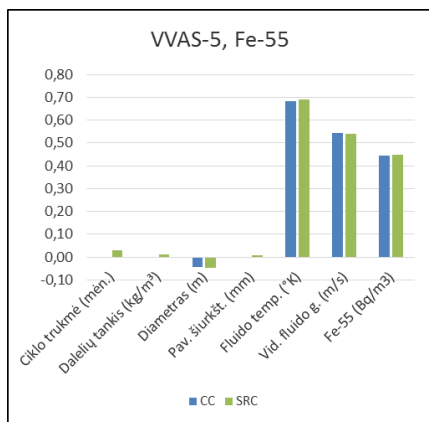
Atvaizdavus didžiausią rezultatų neapibrėžtumą turinčių radionuklidų Fe-55 (1 pav.) ir Co-60 (2 pav.) histogramas, galima vaizdžiai matyti reikšmių pasiskirstymą daliniuose intervaluose. Didžiausia tikimybė, kad Fe-55 reikšmė bus intervale tarp  $3,57\text{E}+08$  ir  $4,96\text{E}+08$  Bq/m<sup>2</sup>, o Co-60 tarp  $1,11\text{E}+08$  ir  $1,54\text{E}+08$ .



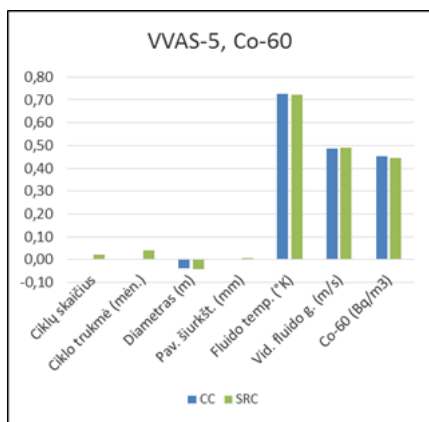
1 pav. Fe-55 aktyvumo reikšmių nuosėdose histograma

2 pav. Co-60 aktyvumo reikšmių nuosėdose histograma

Siekiant nustatyti, kurie parametrai turi didžiausios įtakos VVAS-5 komponento rezultatų jautrumui, didžiausią neapibrėžtumą turintiems radionuklidams atlikta tikimybinė parametų reikšmingumo analizė. Reikšmingų parametų analizei pasirinkti: (Pirsono) koreliacijos koeficientai (CC) ir palyginimui standartizuoti regresijos koeficientai (SRC). Suskaičiuotas regresijos lygties determinacijos koeficientas  $R^2$  yra didelis ( $> 0,9$ ). Tai rodo, kad priklausomybė tarp rezultato ir įvesties parametų reikšmių yra stipriai tiesinė, todėl pasirinkti koeficientai tinka rezultatų jautrumo analizei.



3 pav. Fe-55 aktyvumo nuosėdose parametų reikšmingumo analizė



4 pav. Co-60 aktyvumo nuosėdose parametų reikšmingumo analizė

Jautrumo analizė parodė (3 pav. ir 4 pav.), kad Fe-55 radionuklido aktyvumas stipriai koreliuoja su fluido temperatūros (CC = 0,685; SRC = 0,691) ir vidutinio fluido greičio neapibrėžtumu (CC = 0,543; SRC = 0,541), bei vidutiniškai su Fe-55 aktyvumo fluide neapibrėžtumu (CC = 0,445; SRC = 0,448). Co-60 radionuklido aktyvumas stipriai koreliuoja su fluido temperatūros neapibrėžtumu (CC = 0,728; SRC = 0,724), bei vidutiniškai su vidutinio fluido greičio (CC = 0,486; SRC = 0,491) ir Co-60 aktyvumo fluide neapibrėžtumu (CC = 0,451; SRC = 0,446). Kitų įvesties parametų neapibrėžtumas turi labai mažai įtakos Fe-55 ir Co-60 aktyvumo nuosėdose neapibrėžtumui.

### Išvados

Atlikus sistemų komponentų paviršinio radioaktyviojo užterštumo neapibrėžtumo vertinimo analizę galima padaryti tokias išvadas:

1. Tikimybinio būdu įvertinus ant VVAS-5 komponento sienučių susidarančių nuosėdų aktyvumo neapibrėžtumą, nustatyta, kad didžiausias

nuosėdų aktyvumo neapibrėžtumas yra korozijos produktų radionuklidams: Fe-55, Co-60, Mn-54, Ni-63, Fe-59.

2. Įvesties parametrų tikimybinė reikšmingumo analizė parodė, kad radionuklidų aktyvumui didžiausios įtakos turi fluido temperatūros, fluido vidutinio greičio ir radionuklidų aktyvumo fluide neapibrėžtumas.

### Literatūra

1. Poškas G., Zujus R., Miliauskas G. Ignalinos AE 1-ojo bloko vandens valymo ir aušinimo sistemos radiologinio užterštumo tyrimas. *Energetika*. ISSN 0235-7208. 2013. T. 59, Nr. 4, p. 194–202.
2. LEMENS, B. B.; CENTNER, P.; BEGUIN, K. MANNAERTS. Determination and declaration of critical nuclide inventories in Belgian NPP radwaste streams. *Proceedings of WM'99 Conference*, February 28 – March 4, 1999. Manule de conception du programme de calcul de l'active dans depots des equipments des centrals de Doel et Tihange. CNT-KCD/4NT/8317/000/01 Ed.990121.

### Aspects of uncertainty evaluation of surface radioactive contamination of the system elements

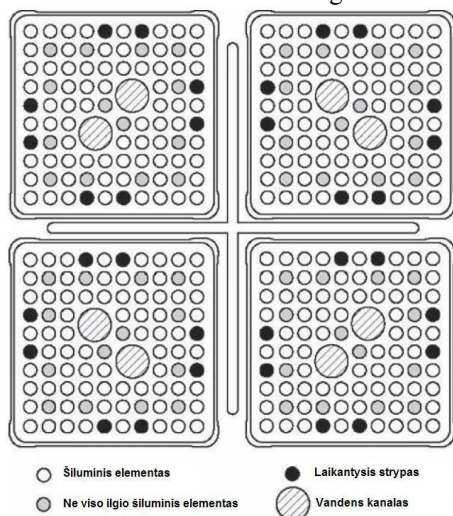
#### Summary

In this paper, based on modelling results of component activity and radionuclide composition of water purification and cooling system at Ignalina NPP Unit 1 [1], the probabilistic uncertainty and sensitivity analysis was performed. Computer programs: LLWAA-Decom [2], LLWAA-Decom extension module and MATLAB were used for this analysis. It was found that the highest activity uncertainty of deposits is for corrosion radionuclides: Fe-55, Co-60, Mn-54, Ni-63, and Fe-59. It was also found that uncertainty of input parameters like fluid temperature, fluid velocity, and radionuclide activity in the fluid have the highest impact on uncertainty of deposit activity.

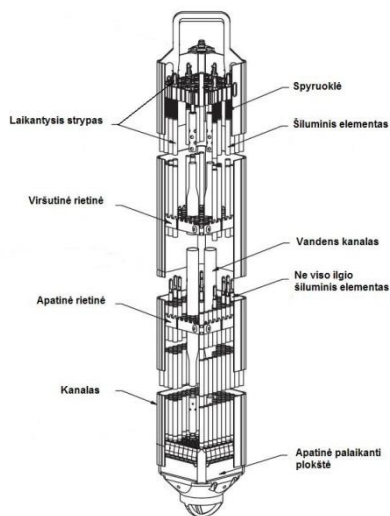
## Garų reaktyvumo koeficiento tyrimas trimačiame kuro rinklės modelyje

Andrius Slavickas  
Lietuvos energetikos institutas

BWR aktyviosios zonos yra sudarytos iš kuro rinklių ir valdymo strypų. BWR aktyviosios zonos pagrindinis sudėtinis elementas yra modulis, kuris susideda iš kryžiaus formos valdymo strypo ir 4-ių aplink jį išdėstytų kuro rinklių (1, 2 pav.). BWR kuro rinklės sudaro ne tik šilumą išskiriantys, bet ir šilumos neišskiriantys elementai. Tai yra taip vadinamieji vandens kanalai. Šie kuro rinklės centre esantys vamzdeliai nėra pakraunami branduoliniu kuru. Rinklės eksploatacijos metu šie vamzdeliai užpildomi vandeniu. Vandens kanaluose užtikrinimas vandens, kuris tiesiogiai nekontaktuoja su šiluminiais elementais, srauto tekėjimas iš apačios į viršų. Taip, per vandens kanalą kuro rinklės viršutinę dalį pasiekia didžiąją dalimi vienfazis vandens srautas, kas turi įtakos pagerėjusiam neutronų lėtinimo efektyvumui viršutinėje kuro rinklės dalyje bei sumažėjusiam netolygiam reaktyvumui ir galios pasiskirstymui išilgai kuro rinklės, atsirandančio esant ne vienodam šilumnešio tankiui išilgai kuro rinklės.



1 pav. BWR kuro modulio skerspjūvis



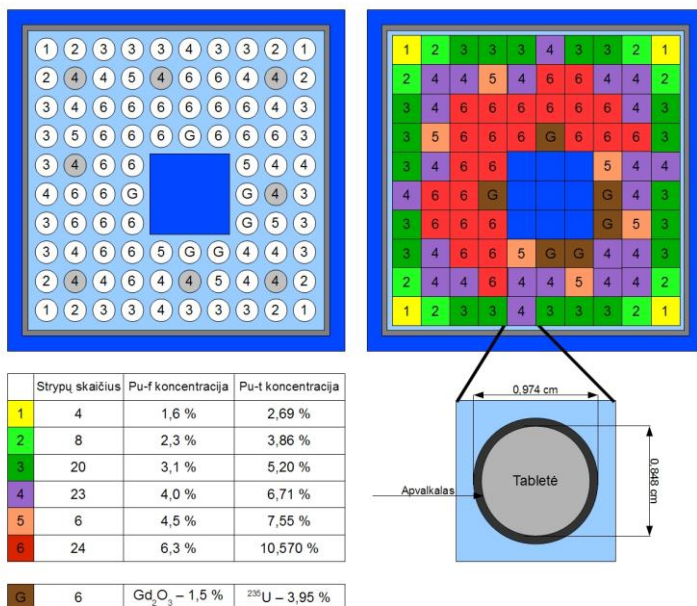
2 pav. BWR kuro rinklė

BWR kuro rinklėse reikia suvienodinti energijos išskirimą ne tikai išilgai, bet ir skersai rinklės. Ištraukus valdymo strypą iš aktyviosios zonos, vanduo erdvėje tarp rinklių sukelia neutronų srauto padidėjimą gretutiniuose rinklės šiluminiuose elementuose. Todėl BWR rinklėse naudojami šiluminiai elementai su skirtingu įsodrinimu skiliosiomis medžiagomis. Mažiau įsodrinti šiluminiai elementai

naudojami kuro rinklės periferijoje, o daugiau įsodrinti elementai – centrinėje rinklės dalyje.

Garų kiekio kitimas aktyviojoje zonoje lemia besikeičiantį lėtiklio-kuro santykį, kas atitinkamai turi įtakos reaktyvumo pokyčiams. Reaktyvumo pokytį, tenkantį vienetiniam garų kiekio pokyčiui, nusako garų reaktyvumo koeficientas (GRK). Šis parametras yra vienas svarbiausių BWR aktyviųjų zonų saugos parametrų. Šio koeficiento ženklas, siekiant, kad reaktorius veiktų stabiliai, turi būti neigiamas, tai yra didėjant galiai ir garų kiekiui aktyviojoje zonoje, reaktyvumas turi mažėti.

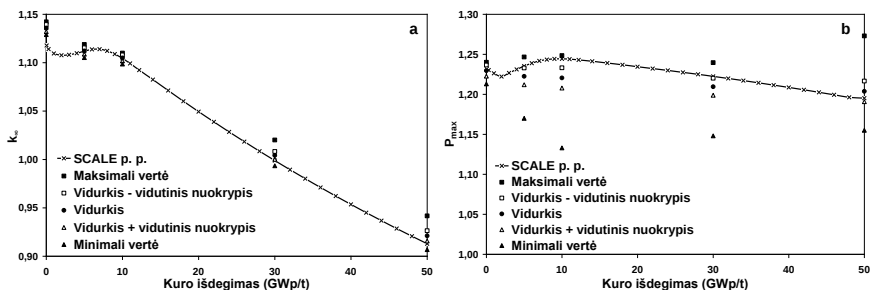
Netolygus garų dalies pasiskirstymas BWR kuro rinklėse lemia netolygų reaktyvumo pokyčių pasiskirstymą rinklėse. Taigi, tiksliam heterogeniškų BWR rinklių fizikinių – neutroninių reiškinių įvertinimui naudojant skaitinius tyrimus yra tikslingas trimačio rinklės modelio sudarymas, kadangi dvimatis rinklės modelis visiškai neperteikia BWR kuro rinklių heterogeniškumo. Šio darbo tikslas yra skaitiniais metodais įvertinti netolygų GRK pasiskirstymą BWR kuro rinklėje, sudarant trimatį BWR kuro rinklės modelį.



3 pav. ATRIUM-10 rinklė ir jos skerspjūvis

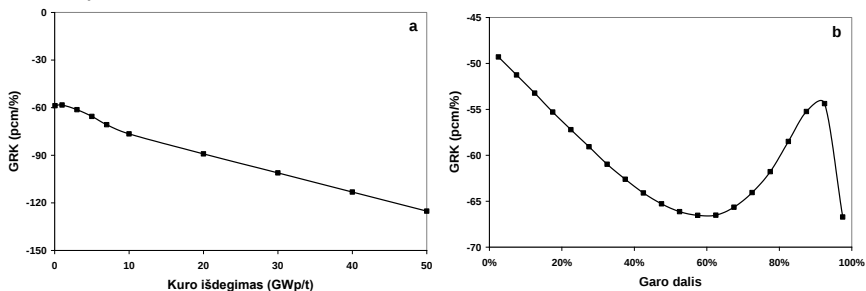
GRK tyrimai buvo atlikti kompanijos „Areva“ gaminamai ATRIUM-10 rinklei, pakrautai mišrių oksidų kuru. Šios BWR kuro rinklės skerspjūvis pateiktas 3 pav. Kuro rinklė susideda iš 10×10 matricoje išdėstytų elementų: 91 šiluminio elemento ir vieno vandens kanalo, kuris yra vietoje 9 šiluminių elementų. Kuro įsodrinimas

skiliaisiais Pu izotopais ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ) kinta nuo 1,6 % šiluminiuose elementuose, kurie yra rinklės kampuose, iki 6,3 % šiluminiuose elementuose, kurie yra rinklės centre. Vidutinis įsodrinimas daliaisiais Pu izotopais yra ~4,2 %.



4 pav. Neutronų daugėjimo koeficiento  $k_{\infty}$  (a) ir galios netolygumo koeficientas  $P_{\max}$  (b) verčių palyginimas su palyginamųjų skaičiavimų rezultatais

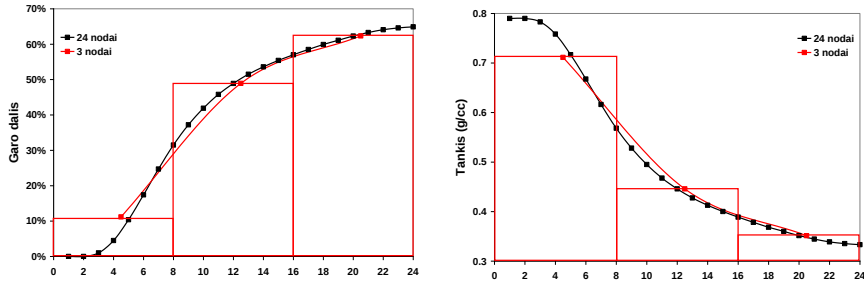
SCALE programų paketo tinkamumas patikrintas palyginus šiuo programų paketu paskaičiuotas neutronines – fizikines charakteristikas su kitų autorių atliktais palyginamųjų skaičiavimų rezultatais. Neutronų daugėjimo koeficiento  $k_{\infty}$  ir galios netolygumo koeficientas  $P_{\max}$  verčių palyginimas pateiktas 4 pav. Rezultatai, gauti naudojant SCALE programų paketą, patenka tarp palyginamųjų skaičiavimų dalių rezultatų.



5 pav. GRK priklausomumas nuo kuro išdegimo (a) ir garo dalies (b)

Ankstesni GRK tyrimai atlikti taikant dvimatį kuro rinklės skaitinį modelį. Šių tyrimų metu priimta, kad garo dalis šilumnešyje yra 40 %, t. y. atitinka vidutines sąlygas aktyviosiose zonose. Buvo įvertintas ne tik GRK priklausomumas nuo kuro išdegimo, bet ir koeficiento priklausomumas nuo garo dalies visiškame 0-100 % garo dalies intervale. Šių tyrimų rezultatai pateikti 5 pav. GRK vertės yra neigiamos tiek visame kuro išdegimo intervale, tiek visame 0–100 % garo dalies intervale. Didžiausios GRK vertės paskaičiuotos šviežiai kuro rinklei. Todėl GRK priklausomumas nuo garo dalies buvo tirtas šviežiai kuro rinklei. GRK verčių kitimas kintant garo daliai nėra tolygus, t. y. vertės 0–60 % garo dalies intervale

mažėja, o 60–90 % intervale – didėja. Taigi, esant netolygiam garo dalies kuro rinklėje pasiskirstymui bei keičiantis aktyviosios zonos sąlygoms, kurios lemia garo dalies pokyčius šilumnešyje, reaktyvumo pokyčiai išilgai kuro rinklės dėl pakitusių sąlygų bus nevienodi. Tai gali padidinti netolygų galios ir reaktyvumo pasiskirstymą išilgai kuro rinklės.



6 pav. Garo dalies ir šilumnešio tankio pasiskirstymas per aktyviosios zonos aukštį

Garų dalies pasiskirstymas per aktyviosios zonos aukštį vidutinėmis eksploatacijos sąlygomis pateiktas 6 pav. Šio tyrimo metu trimatis modelis buvo supaprastintas iki 3 nodų per kuro rinklės aukštį.

Garų reaktyvumo koeficiento vertės paskaičiuotos palyginus reaktyvumo pokytį tarp vidutinių eksploataavimo sąlygų ir sąlygų atitinkančių šilumnešio praradimo avariją, kurios metu garo dalis šilumnešyje pasiekia 100 %. GRK vertės paskaičiuotos pagal formulę:

$$\alpha_{DRK} = \frac{\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2}}{v_2 - v_1} \cdot 10^{-5}. \quad (1)$$

Reaktyvumo pokyčiai bus nevienodi ir atskiruose šiluminiuose elementuose, kadangi tų šiluminių elementų izotopinė kuro sudėtis skiriasi. Siekiant įvertinti reaktyvumo pokytį, tenkantį atskiriems nodams ir šiluminiams elementams, reikia paskaičiuoti neutronų daugėjimo koeficientą atskiriems nodams ir šiluminiams elementams. Šis koeficientas paskaičiuotas įvertinant neutronų gamybos ir absorbcijos reakcijų dažnių santykį visoms medžiagoms tame node arba šiluminiame elemente:

$$k_{inf} = \frac{\sum P_i}{\sum A_i}. \quad (2)$$

GRK vertė apskaičiuota visai rinklei yra -51 pcm/%. GRK vertės apskaičiuotos atskiriems nodams ir šiluminiams elementams pateiktos 7 pav. dešinėje. Kaip matyti

iš pateiktų rezultatų, didžiausia GRK vertė apskaičiuojama 3 nodui nuo apačios. Tankesnis kuro rinklės išskaidymas pagal aukštį leistų tiksliau įvertinti reaktyvumo pokyčius keičiantis garo daliai viršutinėje rinklės dalyje. Skirtumas tarp GRK verčių apskaičiuotų atskiriems šiluminiais elementams yra didesnis. Didžiausios teigiamos vertės (oranžinė spalva,  $> 800$  pcm/%) apskaičiuotos elementams su  $\text{UO}_2 - \text{Gd}_2\text{O}_3$  kuru. Reaktyvumo prieaugis šiose elementuose nėra reikšmingas, kadangi dėl sudegančio sugėriklio šių elementų neutronų daugėjimo koeficientas yra gerokai mažesnis nei 1 (koeficientas, atsižvelgiant į šiluminį elementą, padidėja 0,32–0,40 iki 0,43–0,46).

|      |      |      |      |     |      |      |      |      |      |                  |
|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------------------|
| -111 | -87  | -82  | -78  | -76 | -82  | -79  | -80  | -86  | -106 | z=3<br>-24 pcm/% |
| -93  | -39  | -26  | -9   | -32 | -41  | -45  | -41  | -45  | -86  |                  |
| -76  | -17  | 1    | -5   | -43 | 840  | 826  | -42  | -41  | -80  |                  |
| -81  | -11  | 16   | -36  |     |      |      | 826  | -45  | -79  |                  |
| -76  | -5   | 7    | 833  |     |      |      | 840  | -41  | -82  |                  |
| -79  | -19  | 10   | -24  |     |      |      | -43  | -32  | -76  |                  |
| -82  | -25  | 20   | 7    | -24 | 833  | -36  | -5   | -9   | -78  |                  |
| -77  | -28  | 22   | 20   | 10  | 7    | 16   | 1    | -26  | -82  |                  |
| -87  | -47  | -28  | -25  | -19 | -5   | -11  | -17  | -39  | -87  |                  |
| -125 | -87  | -77  | -82  | -79 | -76  | -81  | -76  | -93  | -111 |                  |
| -163 | -101 | -89  | -95  | -94 | -113 | -110 | -103 | -105 | -172 | z=2<br>-43 pcm/% |
| -115 | -30  | -16  | 11   | -7  | -63  | -40  | -18  | -72  | -105 |                  |
| -101 | -42  | 52   | 0    | -16 | 802  | 803  | -6   | -18  | -103 |                  |
| -99  | -10  | 27   | -5   |     |      |      | 803  | -40  | -110 |                  |
| -61  | 19   | 44   | 1029 |     |      |      | 802  | -63  | -113 |                  |
| -96  | 17   | 36   | -25  |     |      |      | -16  | -7   | -94  |                  |
| -82  | 21   | 52   | 41   | -25 | 1029 | -5   | 0    | 11   | -95  |                  |
| -101 | -13  | 35   | 52   | 36  | 44   | 27   | 52   | -16  | -89  |                  |
| -106 | -67  | -13  | 21   | 17  | 19   | -10  | -42  | -30  | -101 |                  |
| -155 | -106 | -101 | -82  | -96 | -61  | -99  | -101 | -115 | -163 |                  |
| -165 | -85  | -121 | -106 | -72 | -133 | -109 | -85  | -85  | -199 | z=1<br>-43 pcm/% |
| -107 | 43   | 30   | 25   | 35  | -12  | 7    | -25  | -5   | -85  |                  |
| -64  | 34   | 75   | 61   | 8   | 911  | 818  | 2    | -25  | -85  |                  |
| -41  | -27  | 31   | -20  |     |      |      | 818  | 7    | -109 |                  |
| -61  | 3    | 65   | 1131 |     |      |      | 911  | -12  | -133 |                  |
| -45  | -53  | 90   | 3    |     |      |      | 8    | 35   | -72  |                  |
| -94  | -4   | 26   | 84   | 3   | 1131 | -20  | 61   | 25   | -106 |                  |
| -79  | 13   | 79   | 26   | 90  | 65   | 31   | 75   | 30   | -121 |                  |
| -132 | -15  | 13   | -4   | -53 | 3    | -27  | 34   | 43   | -85  |                  |
| -136 | -132 | -79  | -94  | -45 | -61  | -41  | -64  | -107 | -165 |                  |

7 pav. GRK vertės apskaičiuotos atskiriems nodams ir šiluminiais elementams

Kai kuriems šiluminiais elementams su didesniu skiliųjų izotopų įsodrinimu apskaičiuotos GRK vertės taip pat yra teigiamos (geltona spalva). Reaktyvumo prieaugis šiuose elementuose yra reikšmingas, kadangi dar ir prieš prarandant šilumnešį šiuose elementuose reaktyvumas buvo didžiausias. Kuro rinklės apačioje, kur didžiausias garo dalies pokytis (nuo 11,2 % iki 100 %), šiluminių elementų, kuriuose fiksuojamas teigiamas reaktyvumo pokytis garo daliai didėjant iki 100 %, skaičius yra didžiausias.

### Apibendrinimas

Šiame darbe atliktas garo reaktyvumo koeficiento tyrimas trimačiame kuro rinklės modelyje. Koeficiento vertės buvo apskaičiuotos ne tik rinklei, bet ir atskiriems nodams išilgai kuro rinklės aukščio bei šiluminiais elementams. Kuro rinklės viršuje apskaičiuotos koeficiento vertės yra artimiausios teigiamoms. Rinklę

sudalijus į didesnę skaičių nodų, pagal aukštą rinklės viršuje galbūt būtų galima aptikti nodą su teigiamu reaktyvumo prieaugiu. Taigi, tankesnis kuro rinklės išskaidymas pagal aukštą leistų tiksliau įvertinti reaktyvumo pokyčius keičiantis garo daliai viršutinėje rinklės dalyje. Reikšmingas reaktyvumo prieaugis yra fiksuojamas šiluminiuose elementuose su didesniu kuro įsodrinimu. Taigi, kuro rinklės centre, kur reaktyvumas ir taip yra didesnis nei rinklės periferijoje, reaktyvumas didėja, didėjant garo daliai.

### Literatūra

1. A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design, ORNL/TM-2005/39, Version 6.1, June 2011.
2. DeHart, M. D. Lattice physics capabilities of the SCALE code system using TRITON. *International Conference on the Physics of Reactors*, Vancouver, British Columbia, Canada, 10-14 September 2006.
3. Pecchia, M., Kotev, G., Parisi, C., D'Auria, FMOX benchmark calculations by deterministic and Monte Carlo codes. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 246, 2012. p. 63– 68.
4. Francois, J. L., Martin del Campo, C. Lattice physics codes comparisons for the NEA BWR-MOX benchmark. *International Topical Meeting on Advances in Reactor Physics and Mathematics and Computation into the Next Millennium*, May 7-12, 2000, Pittsburgh, PA, USA.

### The study of Void reactivity coefficient in 3D model

#### Summary

This study is conducted for the research of void reactivity coefficient in a three-dimensional model of the fuel assembly. Coefficient values were calculated not only for the fuel assembly, but also for individual nodes along the height of the fuel assembly and individual fuel pins. The coefficient values calculated on the top of the fuel assembly are the closest to positive. A significant increase in reactivity is calculated for fuel pins with higher fuel enrichment in the centre of the fuel assembly.

## W7-X įrenginio, apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemos modeliavimas

Tadas Kaliatka  
Lietuvos energetikos institutas

### Įvadas

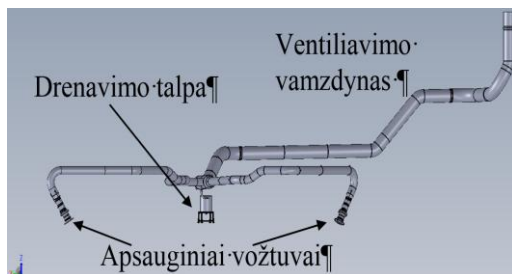
Viena iš potencialių ateities branduolinės energijos rūšių yra lengvųjų branduolių susijungimo metu išsiskirianti energija – branduolių sintezės energija. Daugelyje branduolinės sintezės įrenginių energija (plazmos pavidalu) sukuriamą vakuuminiame inde. Vakuuminis indas bus naudojamas ir baigiamame statyti Wendelstein 7-X (W7-X) branduolių sintezės eksperimentiniame įrenginyje. Plazma supermagnetais išlaikoma vakuuminio indo centrinėje dalyje. Termobranduolinės sintezės įrenginiuose gauta energija (šiluma) nuo vakuuminio indo sienelių nuvedama aušinimo sistema. Jos pažeidimo atveju, į žemo slėgio vakuuminį indą patektų karštas aukšto slėgio vanduo. Tai laikoma pavojingiausia termobranduolinės sintezės įrenginio avarija [2], jos metu vakuuminiame inde galimas staigus slėgio šuolis, kuris privestų prie indo vientisumo pažeidimo. Kad taip neįvyktų, prie vakuuminio indo prijungta apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistema. Suveikus šiai sistemai užtikrinama, kad slėgis vakuuminiame inde daugiau nekiltų. Šiame darbe išsamiai analizuojama apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistema ir jos veikimas šilumnešio praradimo atveju.

**Darbo tikslas.** RELAP5 programų paketu išnagrinėti ir įvertinti W7-X įrenginio apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemos veikimą šilumnešio praradimo atveju.

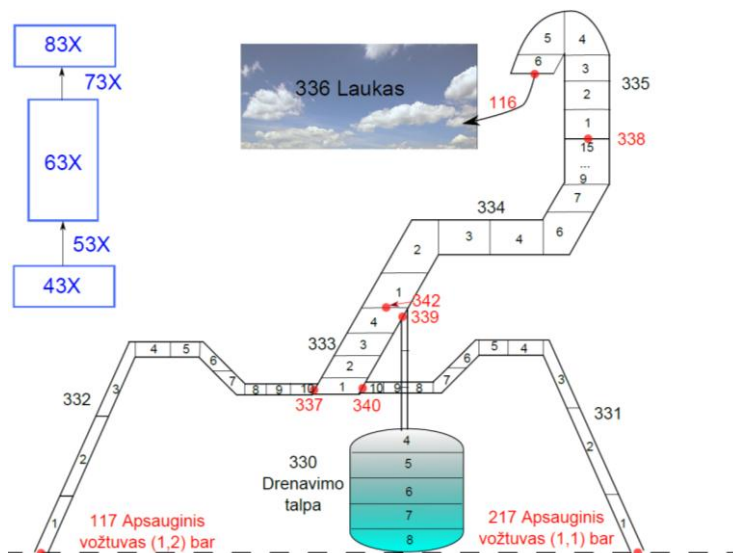
**W7-X įrenginio apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistema ir jos modelis.** Paskutinės modifikacijos W7-X įrenginio apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemą sudaro 3 dalys: du membraniniai vožtuvai, ventiliavimo vamzdynas ir kondensacijos metu susidariusiam vandeniui nuvesti skirta talpa.

Šiame darbe nagrinėjamas šilumnešio praradimo atvejis, kai W7-X įrenginys dirba „įkaitinimo“ režimu (plazma vakuuminiame inde nesukuriama). Įvykus vidinių elementų aušinimo sistemos vamzdžio ( $D = 40$  mm) trūkiui,  $1 \cdot 10^6$  Pa slėgio ir 433 K temperatūros vanduo patenka į vakuuminį indą ir staigiai garuoja. Iš aušinimo sistemos ištekęs vanduo krenta ant įkaitusių vakuuminio indo paviršių ir garuoja. Slėgis vakuuminiame inde kyla ir viršijus  $1,1 \cdot 10^5$  Pa ribą, staigiai turi atsiverti pirmasis apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemos vožtuvas. Tuomet vakuuminiame inde susidaręs garas turi patekti į ventiliavimo vamzdyną, kur jis kontaktuoja su šaltesnėmis vamzdyno sienelėmis – vyksta garo kondensacija. Garo kondensatas nuteka ventiliavimo vamzdynu ir patenka į jam numatytą (~100 ltr) drenavimo talpą. Jei sistema veikia kaip numatyta, slėgis vakuuminiame inde daugiau turi nebedidėti, o sumažėti iki atmosferinio slėgio. Jei atsiverus pirmajam apsauginiam vožtuvui

slėgis vakuuminiame inde ir toliau kyla – pasiekus  $1,2 \cdot 10^5$  Pa ribą atsiveria antrasis apsauginis vožtuvas; tolesnis sistemos veikimas jau aptartas. Tačiau dėl įvairių priežasčių (pvz., ventiliavimo vamzdyno užsikimšimas dėl didelio susikondensavusio vandens kiekio) galimas apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemos sutrikimas, o slėgiui pakilus dar daugiau – galimas vakuuminio indo pažeidimas.



a)



b)

1 pav. Apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemos 3D brėžinys (a) ir šios sistemos RELAP 5 programų paketo modelio nodalizacinė schema (b)

Šiame darbe atlikta kompleksinė analizė (aušinimo sistema, vakuuminis indas ir apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistema modeliuojama vienu metu) RELAP5

programų paketu [3], kuris skirtas analizuoti termohidraulinius procesus. Procesai aušinimo sistemoje ir vakuuminiame inde (VI) šilumnešio praradimo atveju plačiai išnagrinėti ankstesniuose darbuose [4]. Šiame darbe išsamiai tiriama apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistema.

Atsižvelgiant į W7-X įrenginio projektuotojų pateiktus apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemos 3D brėžinius (1 pav. a), sudarytas sistemos modelis (1 pav. b). Šis modelis prijungtas prie bendro (aušinimo sistemos ir VI modelis) RELAP5 p.p. skirto modelio.

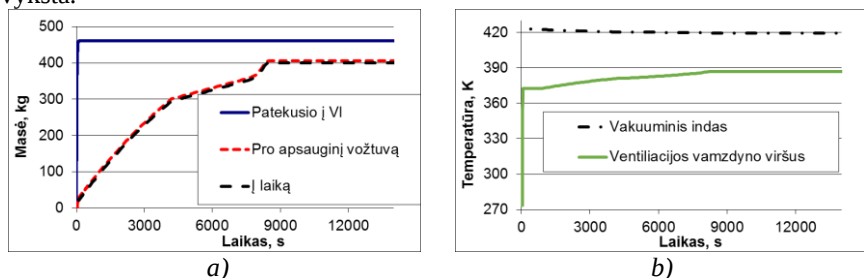
**Skaiciavimams naudotos pradinės sąlygos.** Aušinimo sistema: vandens temperatūra 160 °C, vandens tankis 907 kg/m<sup>3</sup>, srautas 177 m<sup>3</sup>/h, slėgis 1 MPa. Sudėtinga stelaratoriaus VI geometrija RELAP5 p. p. modelyje buvo supaprastinta. VI sumodeliuotas kaip 6,8 m. ilgio ir 2,016 m. diametro vamzdis, kurio galai sujungti. Paviršiaus plotas ir masė atitinka projektinius duomenis [2]. RELAP5 p. p. turi apribojimus, todėl modelyje slėgis vakuuminiame inde priimamas lygus 700 Pa (realiame įrenginyje gilus vakuumas). Vakuuminio indo vidinių sienelių plotas 215 m<sup>2</sup>, storis 0,017 m. Sienelės įkaitintos iki 433 K. Apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemos apsauginių vožtuvų skersmuo 0,25 m. Ventiliavimo vamzdyno nuo apsauginių vožtuvų iki įsijungimo į bendrą 0,5 m vamzdį skersmuo 0,25 m. Vamzdyno sienelių storis 0,001 m. Slėgis atmosferinis. Drenavimo talpos tūris 0.1 m<sup>3</sup>. Ventiliavimo vamzdynas jo pabaigoje sujungtas su lauku, kurio temperatūra 273 K. Tai vėlgi RELAP5 p. p. apribojimas, negalime užduoti neigiamų temperatūrų.

Analizuojant apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemą atlikti trys skaičiavimai:

- 1) Adiabatinės sąlygos. Sistema nesąveikauja su ją supančia aplinka.
- 2) Ventiliacijos vamzdynas susietas su aplinka. W7-X įrenginio salėje esanti temperatūra 288 K, lauko temperatūra 273 K. Šiame skaičiavime, modeliuojant šilumos nuvedimą į aplinką, daryta prielaida, jog nėra oro judėjimo aplinkoje.
- 3) Panašus į antrąjį skaičiavimo variantą, tačiau šiame skaičiavime, modeliuojant ventiliavimo vamzdyną supančią aplinką, įvertintas oro judėjimas. Šis skaičiavimo variantas atspindi realias sąlygas.

**Skaiciavimo rezultatai.** Skaiciavimo, kuriame apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistema nesąveikauja su ją supančia aplinka, rezultatai pateikti 2 pav. Vandens, patekusio į VI pro apsauginį vožtuvą į ventiliavimo vamzdyną ir į lauką, masės pavaizduotos 2 pav. a). Šiame skaičiavimo variante beveik visa vandens masė, patekusi pro apsauginį vožtuvą, išteka į lauką. Dalis vandens garų pavidalu pasilieka VI ir apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemos vamzdyne. 2 pav. b) pavaizduota VI ir ventiliavimo vamzdyno viršuje esančių vamzdžių sienelių paviršiaus temperatūra. Kai nėra sąveikos su aplinka VI sienelių temperatūra išlieka beveik pastovi. Ventiliavimo vamzdyno sienelių temperatūra, kai tik atsidaro apsauginis vožtuvas, staigiai pakyla iki 273 K ir vėliau po truputį kyla, nes garas iš

VI išteka aukštesnės temperatūros. Šiame skaičiavimo variante kondensacija nevyksta.

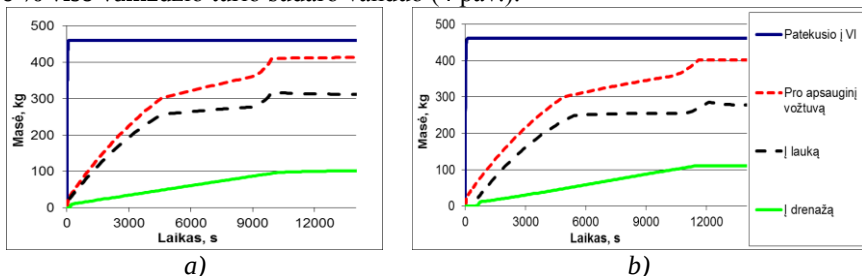


2 pav. Skaičiavimo rezultatai, adiabatinės sąlygos: a) vandens masės kiekio ir b) temperatūros priklausomumas nuo laiko

Kituose dvejuose skaičiavimų variantuose apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistema sąveikauja su ją supančia aplinka. Vienu atveju aplinkoje nėra oro judėjimo, kitu – oro judėjimas vamzdyną supančioje aplinkoje modeliuojamas. Abiejų skaičiuotų variantų šilumos perdavimo koeficientai (nuo ventiliavimo vamzdžio sienelių į aplinką) buvo palyginti. Skaičiavimo variante, kuriame mainai su aplinka modeliuojami nevertinant oro judėjimo, ventiliavimo vamzdyne šilumos perdavimo koeficientas yra 0,6–1,5 W/m<sup>2</sup>K ribose. Įvertinus oro judėjimą šilumos perdavimo koeficientas gaunamas 2,5–5 W/m<sup>2</sup>K ribose. Modeliuojant oro judėjimą aplinkoje buvo stengiamasi, kad visame ventiliacijos vamzdyne oro greitis būtų apie 1 m/s. Išimtis yra vamzdyno dalis, kuri turi būti lauke. Ten pasirinktas ~3,2 m/s oro greitis, atitinkamai šilumos perdavimo koeficientas 8,5 W/m<sup>2</sup>K. Aplink VI pasirinktas ~0,65 m/s oro judėjimo greitis (~1 W/m<sup>2</sup>K), nes realiame įrenginyje VI indas turi išorinį kiautą. Išorinis kiautas laidus orui, tačiau didelis oro judėjimas apie VI mažai tikėtinas.

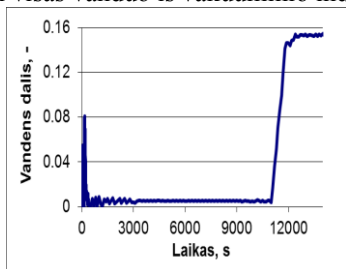
3 pav. pavaizduoti vandens masės skaičiavimo rezultatai dviem skaičiavimo atvejams, kai apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistema sąveikauja su ją supančia aplinka. 3 pav. a) pavaizduota vandens masė, kai aplinka modeliuojama nevertinant oro judėjimo. 3 pav. b) pavaizduota vandens masė, kai aplinka modeliuojama įvertinus joje esantį oro judėjimą. Palyginus šiuos skaičiavimo rezultatus matome, kad mažiau garo patenka į lauką, kai įvertinamas oro judėjimas vamzdyną supančioje aplinkoje – daugiau garo sukondensuojama. Laiko intervale nuo 6000 s iki 11000 s garo tekėjimas į lauką sustoja, tačiau garo tekėjimas pro apsauginį vožtuvą nenutrūksta. Tai parodo, kad kiek garo pro apsauginį vožtuvą patenka į ventiliavimo sistemą, tiek jo sukondensuojama ir nuteka į drenavimo indą. Abiejų skaičiavimo variantų rezultatai parodė, kad skaičiavimų pabaigoje drenavimo talpa visiškai užsipildo. Tačiau modeliuojant variantą, kuriame įvertintas oro judėjimas aplinkoje, sukondensuotas garas pradeda kauptis ir horizontaliame ventiliavimo

vamzdyno dalyje, prie kurio prijungta drenavimo talpa. Skaičiavimo pabaigoje ~16 % viso vamzdžio tūrio sudaro vanduo (4 pav.).

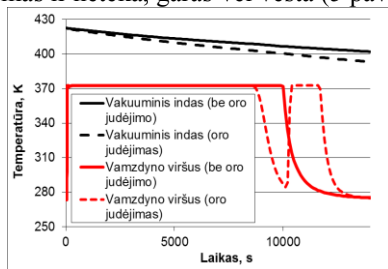


3 pav. Vandens masės skaičiavimo rezultatai, ventiliacijos vamzdyno sąveika su aplinka. Aplinka modeliuojama kaip: a) didelio skersmens vamzdis b) vamzdis, kuriame yra oro judėjimas.

5 pav. pavaizduotas sienelių paviršiaus temperatūros priklausomumas nuo laiko. VI sienelių paviršiaus temperatūros panašios skaičiuojant abu variantus. Temperatūros tolygiai krinta nuo pradinės 427 K reikšmės. Įvertinus oro judėjimą VI supančioje aplinkoje, sienelių temperatūra krenta greičiau. Ventiliavimo vamzdynas, kaip ir adiabatinių sąlygų skaičiavime, staigiai įkaista iki 373 K, kai atveriamas apsauginis vožtuvas. Vėliau temperatūra nekinta, kol garas teka vamzdynu. Garui ištekėjus, vamzdyno sienelės atvėsta iki išorėje esančios temperatūros. Skaičiavimo atveju, kai aplinka buvo modeliuojama įvertinus oro judėjimą, laiko intervale nuo 6000 s iki 11000 s, garas į lauką neteka, todėl vamzdyno sienelės atvėsta. Vėl ištekėjus garui, sienelės staigiai įkaista ir galiausiai, kai visas vanduo iš vakuuminio indo išgarinamas ir neteka, garas vėl vėsta (5 pav.).



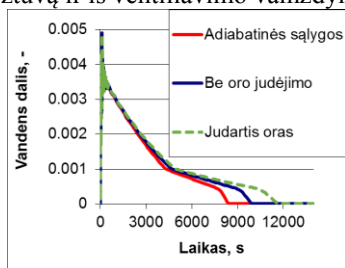
4 pav. Tūrinė vandens dalis horizontalioje ventiliavimo vamzdyno dalyje prie drenažinės talpos pajungimo



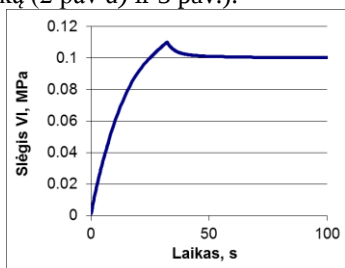
5 pav. Temperatūros priklausomumas nuo laiko

6 pav. pavaizduota vandens tūrinė dalis vakuuminiame inde. Tai parodo kada vanduo išgaruoja iš VI. Adiabatinių sąlygų metu gaunamos didesnės temperatūros ir vanduo iš VI išgaruoja greičiausiai (~8300 s po šilumnešio praradimo įvykio pradžios). Vėliausiai (~11500 s po šilumnešio praradimo įvykio pradžios) vanduo iš

VI išgaruoja, kada vertinamas oro judėjimas VI ir ventiliavimo vamzdyno aplinkoje. Būtina paminėti, kad skaičiavimų pabaigoje, kada VI inde yra nedidelis kiekis vandens, padidėja šilumos perdavimo koeficientas, garavimo greitis ir vanduo staigiau išgaruoja. Dėl to 6 pav. skaičiavimų pabaigoje matomas staigesnis vandens dalies maišinyje sumažėjimas. Gaunamas didesnis garo srautas pro apsauginį vožtuvą ir iš ventiliavimo vamzdyno į lauką (2 pav a) ir 3 pav.).



6 pav. Vandens dalis vakuuminiam inde



7 pav. Slėgio vakuuminiam inde kitimo priklausomumas nuo laiko

7 pav. pavaizduotas slėgio VI kitimo priklausomumas nuo laiko. Ši slėgio priklausomumas vienodas visiems skaičiavimo variantams. Slėgis dėl į VI įtekėjusio vandens staigiai kyla ir ~32 s pasiekiamas  $1,1 \cdot 10^5$  Pa slėgis. Tuomet atveriamas pirmasis apsauginis vožtuvas ir slėgis nukrenta iki atmosferinio. Atmosferinis slėgis VI išlieka viso skaičiavimo metu, visais skaičiavimo variantais.

### Išvados

1. Vadovaujantis straipsnyje pateiktoms skaičiavimo prielaidomis ir skaičiavimo rezultatais, apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistema užtikrina slėgio mažėjimą vakuuminiam inde.
2. Modeliuojant apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemą buvo vertinama ventiliacinio vamzdyno sąveika su aplinka. Gaunama garų kondensacija ant vamzdyno sienelių, kondensatas nuteka į suprojektuotą drenažinį indą.
3. Įvertinus galimą oro judėjimą W7-X įrenginį supančioje aplinkoje, bei žemiausią (galima modeliuoti  $0^\circ\text{C}$ ) lauko temperatūrą nustatyta, kad šilumnešio praradimo atveju suprojektuotos drenažinės talpos nepakanka. Įvykio metu sukondensuotas vanduo patenka į ventiliacinį vamzdyną. Vamzdyno atkarpoje, kurioje prijungta drenažinė talpa, vandens dalis siekia 16 % viso tūrio.

### Literatūra

1. Hans-Stephan Bosch and the Wendelstein 7-X Team, Wendelstein 7-X, Overview and Status of Construction, a Max-Planck Institut für Plasmaphysik,

- Branch Institute, Greifswald, Euratom-IPP Association, D-17491 Greifswald, Germany, 2006.
2. Naujoks D., Initial and Boundary Conditions, Max-Planck Institut für Plasmaphysik, 1-NBF-T0008.0, Greifswald, Germany, 2008.
  3. Fletcher C.D. *et al.*, “RELAP5/MOD3 code manual user’s guidelines”, Report NUREG/CR-5535, Idaho National Engineering Lab, 1992.
  4. Kaliatka T., Povilaitis M. Termohidraulinė analizė W7-X vamzdžio trūkio atveju. *Šilumos energetika ir technologijos-2011: konferencijos pranešimų medžiaga*, Kauno technologijos universitetas, 2011 vasario 3, 4. Kaunas: Technologija, 2011. ISBN 978-609-02-0179-4, p. 89-94.

### **Modeling of pressure increase protection system of W7-X fusion device**

#### **Summary**

A detail model of W7-X fusion device pressure protection system was developed using RELAP5 code. The operation of pressure protection system was analyzed during LOCA event. During this event, water ingress in a vacuum vessel increases pressure in it. When 1.1 bar pressure is achieved, the pressure protection system takes part in action in order to prevent further pressure increase in a vacuum vessel. Calculation results showed that during LOCA event, the pressure protection system prevents pressure increase in a vacuum vessel. However, the designed volume for the condensed water is filled up, and some water accumulates in horizontal pipes at the end of the calculations.

## **BWR reaktoriaus panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseino termohidraulinių procesų studija**

Audrius Graževičius, Arvydas Adomavičius, Linas Paukštaitis  
Kauno technologijos universitetas

Per branduolinės energetikos dešimtmečius pasaulyje susikaupė tūkstančiai tonų panaudoto branduolinio kuro, kurio nemaža dalis pagal priimtas technologijas gan ilgai saugoma panaudoto kuro saugojimo baseinuose. Suprantama, kad dideli kiekiai radioaktyvių medžiagų turi būti saugomi taip, kad užtikrinti tarptautinės bendruomenės keliamus radiacinės saugos reikalavimus. Užtikrinant branduolinės energetikos objektų saugą, analizės ir tyrimai, vykdomi skaitinio modeliavimo pagrindu, užima esminę vietą.

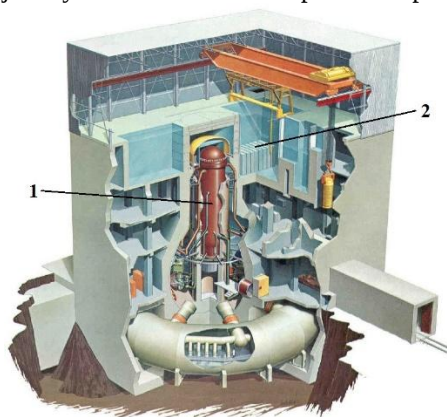
Verdančiojo vandens reaktorius – potencialiai galimas Lietuvos pasirinkimas būsimai Visagino AE, todėl BWR 4 (verdančiojo vandens) reaktorius ir jo sistemos – aktualus objektas tyrimams.

Darbo metu siekta tikslo – išsirinkti programinį paketą, tinkamą BWR 4 reaktoriaus baseinui ir panaudoto kuro rinklėms jame modeliuoti bei termohidraulinių procesų išlaikymui baseinuose tirti. Pirmajame tyrimų etape siekta ištirti termohidraulinius procesus panaudoto kuro išlaikymo baseine normaliomis eksploatacijos stacionaraus režimo sąlygomis.

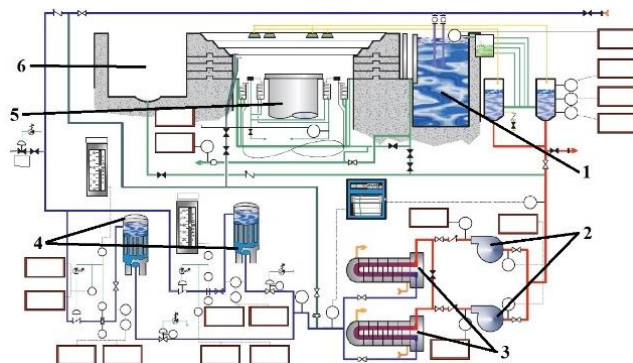
**Panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseino specifi­ka.** BWR 4 reaktoriaus išlaikymo baseinas, esantis Mark I gelžbetoniniame korpusė, yra išorinėje korpuso pusėje. Bendra išlaikymo baseino talpa – 3819 vietų rinklėms, iš jų 764 vietos rezervuojamos reaktoriaus aktyviosios zonos visų 764 rinklių avarinio iškrovimo atvejui. Išlaikymo baseinas pavaizduotas 1 paveiksle [1]. Panaudoto kuro rinklės iš reaktoriaus į išlaikymo baseiną perkeliamos vandens kanalais, siekiant užtikrinti rinklės aušinimą, ir kad radiacija nepaveiktų aptarnaujančiojo personalo. Aktyviosios zonos centre neutronų koncentracija didžiausia, todėl rinklių išdegimo laipsnis – didesnis negu periferijoje esančių rinklių. Po 12–18 mėnesių centrinės aktyviosios zonos dalies branduolinio kuro rinklės (trečdalis aktyviosios zonos, t. y. 254 vnt.), iškraunamos į išlaikymo baseiną [2]. Išlaikymo baseine jos saugomos 5 metus, tačiau dėl įvairių priežasčių (valstybės pasirinktos panaudoto branduolinio kuro saugojimo strategijos, politinių, ekonominių ir kitų aplinkybių) saugojimo laikotarpis gali prasitęsti iki 30 metų. Išlaikymo baseine rinklės talpinamos specialiuose konteineriuose, esančiuose ant išlaikymo baseino grindų [3].

Pagrindiniai baseino konstrukciniai parametrai: plotis – 12,2 m, ilgis – 10,8 m, gylis 11,8 m, aušinimo vandens kiekis apie 1,51 mln. litrų, aušinimo vandens lygis – 11,0 m nuo išlaikymo baseino grindų [2]. Sienos pagamintos iš gelžbetonio, kurio storis 1,2–2,4 m, plieninių strypų skersmuo 6–13 mm [4]. Išlaikymo baseinas –

priverstinės cirkuliacijos, tačiau savaiminė cirkuliacija, kylanti baseine, iš dalies pagerina rinklių aušinimą ir gali kurį laiką užtikrinti saugos funkciją. Aušinimo vandens cirkuliacijos ir jo valymo sistemos schema pateikta 2 paveiksle [5].



1 pav. Pagrindinio pastato pjūvis: 1 – reaktorius, 2 – išlaikymo baseinas

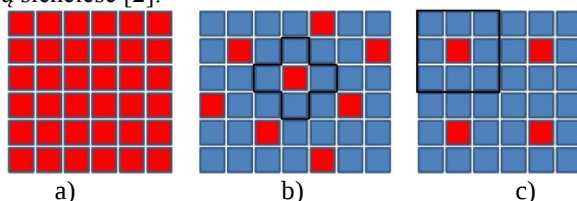


2 pav. Principinė aušinimo vandens cirkuliacijos ir jo valymo sistemos schema: 1 – išlaikymo baseinas, 2 – cirkuliaciniai siurbiai, 3 – šilumokaičiai, 4 – valymo įrenginiai, 5 – reaktorius, 6 – garo separatoriaus ir džiovintuvo baseinas

**Pagrindinės saugos funkcijos išlaikymo baseinui.** Pagrindinės panaudoto kuro išlaikymo baseino saugos funkcijos – užtikrinti žemą kritiškumo koeficiento reikšmę, stabilų aušinimo vandens lygį ir temperatūrą, nepertraukiamai šalinant išsiskiriančią liekamąją šilumą.

Kritiškumo koeficiento reikšmė neturi siekti 1, todėl panaudoto branduolinio kuro rinklės išdėstomos  $1 \times 1$ ,  $1 \times 4$  arba  $1 \times 8$  principu. Išdėstymo principų skirtumai

pavaizduoti 3 paveiksle (dažniausiai naudojamas  $1 \times 4$  principas). Kitas faktorius, ribojantis kritiškumo koeficientą – didelės galios neutronų absorberis „Boraflex“, esantis konteinerių sienelėse [2].



3 pav. Panaudoto branduolinio kuro rinklių išdėstymo principai: a)  $1 \times 1$ ; b)  $1 \times 4$ ; c)  $1 \times 8$ . Perkrovimo metu į baseiną patalpintos kuro rinklės pažymėtos raudonai, „senos“ – mėlynai.

Nepertraukiamą šilumos šalinimą užtikrina du cirkuliaciniai siurbiai ir du šilumokaičiai. Cirkuliaciniai siurbiai ir šilumokaičiai dirba naudodami tik pusę savo pajėgumo, kad įvykus šilumokaičio arba/ir cirkuliacinio siurblio avarijai, būtų užtikrintas tinkamas aušinimo vandens srautas ir liekamosios šilumos šalinimas.

Kitas veiksnys, galintis sutrikdyti išlaikymo baseino darbą – svoris. Gelžbetoninėms sienoms senėjant ir visiškai pakrovus išlaikymo baseiną, didžiausia tikimybė, kad grindys praras vientisumą. Grindyse atsiradus 4,4 cm skersmens skylėi, per ją ištėkėtų 16 kg/s aušinimo vandens ir vandens lygis nuo 11,0 m iki 10,0 m nukristų per 7 valandas. Tačiau įsijungus aušinimo vandens papildymo sistemai, kurios našumas apie 32 kg/s, aušinimo vandens lygis būtų greitai atstatytas [2]. Išlaikymo baseinams nustatyti priimtino kriterijai pateikti 1 lentelėje.

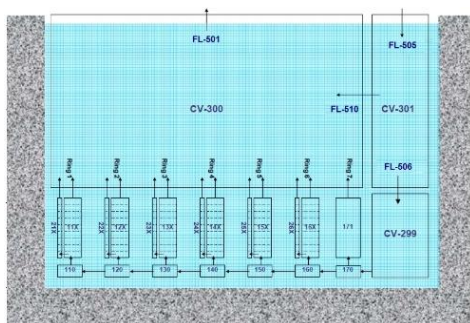
1 lentelė. Priimtino kriterijai

|                                              |                               |
|----------------------------------------------|-------------------------------|
| Reaktyvumo koeficientas                      | Ne didesnis 95 %              |
| Aušinimo vandens temperatūra                 | Ne didesnė 50 °C              |
| Aušinimo vandens lygis virš rinklių          | Ne mažiau 3 m                 |
| Šiluminio apvaskalo temperatūra              | Ne didesnė 700 °C             |
| Vandenilio koncentracija                     | Ne didesnė 4 % patalpos tūrio |
| Radiacijos poveikis projektinių avarijų metu | Ne didesnis 10 mSv            |

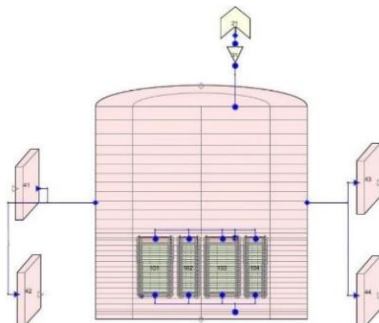
Avarijos skirstomos į projektines ir neprojektines. Projektinė avarija – avarija, kurios eiga ir pasekmės yra numatytos projektuojant branduolinę elektrinę. Tokioms avarijoms parengti veiklos planai, kuriais vadovaujantis, branduolinės elektrinės aptarnaujantis personalas turi visiškai sustabdyti avariją arba sumažinti jos sukeltas pasekmes. Neprojektinė avarija – tai avarija, įvykusi dėl nenumatytų projektinės avarijos pradinių įvykių arba lydimą dar kitų, nenumatytų projektinėse avarijose saugos sistemų gedimų, esant ne tik vienetiniam gedimui ar klaidingiems personalo veiksams [6]. Projektinės avarijos gali būti: cirkuliacinių siurblių ir/arba

šilumokaičių gedimas, aušinimo vandens užvirimas, gaisras, aušinimo vandens nuotėkis, mechaninis šiluminio apvalkalo pažeidimas, šiluminio apvalkalo suirimas dėl aukštos temperatūros, elektros energijos praradimas ir kt.

**Programinių paketų apžvalga.** Termohidrauliniai procesai, vykstantys branduoliniuose įrenginiuose, dažniausiai modeliuojami vienmačiais arba dvimačiais programiniais paketais tokiais, kaip MELCOR, MAAP5, TRACE, RELAP, COBRA ir kt. Vienmačių programinių paketų MELCOR ir TRACE išlaikymo baseinų modeliai pateikti 3–4 paveiksluose. Vienmačių programinių paketų aplinkoje įrenginiai atvaizduojami kaip eilė kontrolinių tūrių, kuriuose nustatomos apibendrintos (integralios) charakteristikos. Dvimačiai programiniai paketai leidžia nustatyti charakteristikų pasiskirstymą įrenginio ar jo elemento pjūvyje. Trimačiuose programiniuose paketuose gaunamas pilnas parametrų pasiskirstymo visame modelio tūryje vaizdas.



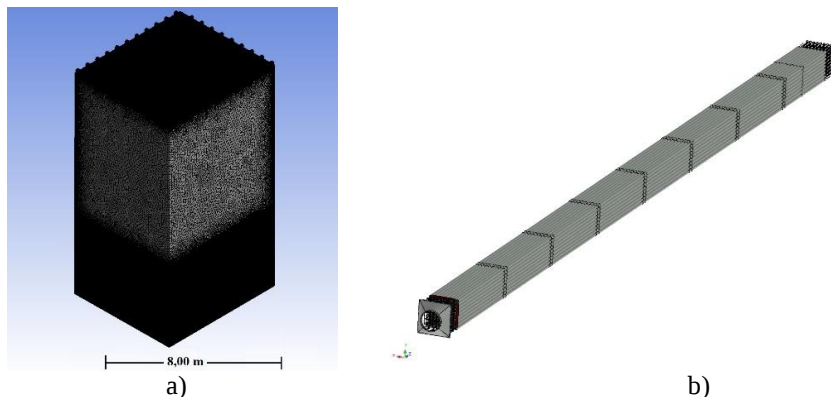
3 pav. MELCOR modelis [2]



4 pav. TRACE modelis [7]

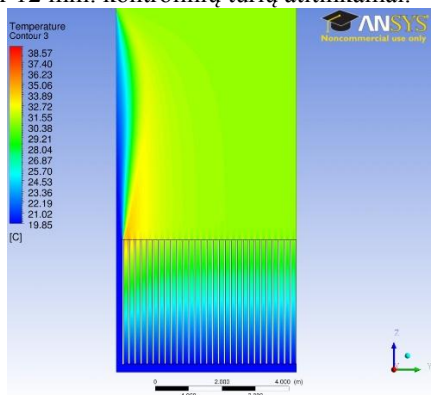
Labiausiai paplitę trimačiai termohidraulinių procesų modeliavimo paketai – Ansys Fluent ir Neptune CFD. Neptune CFD naudojamas branduoliniuose reaktoriuose ir kituose įrenginiuose vykstantiems termohidrauliniams procesams analizuoti, tačiau šis programinis paketas naudojamas rečiau negu Ansys Fluent programinis paketas. Ansys Fluent skirtas analizuoti ne tik branduolinius, bet ir kitus pramonės, aviacijos ir kitų sričių įrenginius [8]. Šis programinis paketas pripažintas tarptautinių mokslo ir pramonės įstaigų. Per ilgą programinės įrangos tobulinimo laikotarpį išplėtotą termohidraulinių procesų metodologiją, gauti rezultatai pasižymi dideliu tikslumu. Dėl šios priežasties jis naudojamas dažniausiai. Šio darbo metu termohidrauliniams procesams, vykstantiems išlaikymo baseine, modeliuoti pasirinktas Ansys Fluent 14.0v programinis paketas.

**Pradiniai rezultatai.** Ansys Fluent aplinkoje sukurti išlaikymo baseino ir branduolinio kuro rinklės GE13 modeliai pavaizduoti 5 paveiksle. Išlaikymo baseine esančias panaudoto branduolinio kuro rinkles imituoja stačiakampiai gretasieniai, kuriems pritaikyta „Porous media“ funkcija [3, 9].



5 pav. Modeliai: a) išlaikymo baseino modelis (1/4 pagal simetrijos ašis); b) detalus rinklės modelis

Ši funkcija taikoma tada, kai geometrinėje figūroje yra daug gerokai sudėtingesnių geometrinių figūrų, dėl kurių neįmanoma viso modelio suskaidyti į kontrolinius tūrius ir atlikti termohidraulinę analizę. Funkcija „Porous media“ leidžia sudėtingos geometrinės formos figūroms priskirti apibendrintas hidraulinių nuostolių susidarymo charakteristikas. Išlaikymo baseino ir rinklės modeliai suskaidyti į 16 mln., ir 12 mln. kontrolinių tūrių atitinkamai.



7 pav. Aušinimo vandens temperatūros pasiskirstymas baseine

Plėtojamą kuro rinklės modelį numatoma panaudoti apibendrintoms „Porous media“ hidraulinėms charakteristikoms analizuoti. Kraštinės sąlygos baseinui: įtekančio aušinimo vandens temperatūra  $\sim 20^\circ\text{C}$ , ištekančio aušinimo vandens temperatūra  $\sim 30^\circ\text{C}$ , tūrinis šilumos išsiskyrimas –  $10754,59 \text{ W/m}^3$ , įtekančio aušinimo vandens kiekis –  $70,43 \text{ kg/s}$ , modeliuojamas stacionarus tekėjimas (darbinis režimas), priimtas supaprastinimas – aušinimo vanduo įteka per baseino

grindis, išteklėjimo vamzdžių skaičius (baseino viršuje) – 20 vnt., taikomas  $k - \varepsilon$  tekėjimo modelis, skirtas uždaviniams, turintiems mažus slėgio gradientus. Skaičiavimams atlikti naudojamas didelio našumo paskirstytų skaičiavimų kompiuteris „SGI Altix ICE4800“.

Skaitiniu eksperimentu nustatyti aušinimo vandens temperatūros ir greičio profiliai išlaikymo baseine pateikti 7 paveiksle. Gauta, kad aušinimo vandens temperatūra išteklėjimo vamzdžiuose yra 31 °C, žemiausia aušinimo vandens temperatūra stebima baseino kraštuose, o aukščiausia – centre.

### Išvados

1. Išlaikymo baseino termohidraulinių parametrų studijai pasirinktas trimačio modeliavimo programinis paketas Ansys Fluent, kuris suteikia galimybę gauti pilną parametrų pasiskirstymo visame modelio tūryje vaizdą.
2. Sukurtame modelyje pasirinktas kuro rinklių atvaizdavimo detalumo laipsnis leidžia atvaizduoti realistinį naujai iškrautų ir kurį laiką išbuvusių baseine kuro rinklių išdėstymą (tirta 1×4 schema).
3. Ansys Fluent aplinkoje sukurtas išlaikymo baseino modelis taikant „Porous media“ priartėjimą stacionaraus darbo sąlygomis pasiekė rezultatus, artimus kitų autorių darbams.
4. Tolesni tyrimai bus nukreipti į detalaus kuro rinklės modelio bei jo dėka gautų duomenų pritaikymą termohidraulinių procesų eigai vertinti panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseine, tiek stacionarios, tiek ir avarinės būklės.

### Literatūra

1. Boiling Water Reactor Systems. Prieiga internete:  
<<http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/teachers/03.pdf>>.
2. US Nuclear Regulatory Commission. Prieiga internete:  
<<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1425/ML14255A365.pdf>>.
3. Predictions of Spent Fuel Heatup After a Complete Loss of Spent Fuel Pool Coolant. Prieiga internete:  
<<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0037/ML003727905.pdf>>.
4. Spent Fuel Pool Storage. Prieiga internete:  
<<https://www.nirs.org/reactorwatch/security/nasrptsfp5.pdf>>.
5. Spent Fuel Pool Risk Assessment Integration Framework (Mark I and II BWRs) and Pilot Plant Application. Prieiga internete:  
<<http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000003002000498&Mode=download>>.
6. VATESI. Prieiga internete:  
<[http://www.vatesi.lt/fileadmin/documents/Teisine\\_informacija/projektai/Bendr\\_ieji\\_AE\\_saugos\\_uztikrinimo\\_reikalavimai.pdf](http://www.vatesi.lt/fileadmin/documents/Teisine_informacija/projektai/Bendr_ieji_AE_saugos_uztikrinimo_reikalavimai.pdf)>.
7. Scientific.net. Prieiga internete: <<http://www.scientific.net/AMM.145.78>>

8. ANSYS. Prieiga internete: <<http://www.ansys.com/trustedcfid>>.
9. The design and simulation of a new spent fuel pool passive cooling system. Prieiga internete: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454913001308>>.

### **The Thermal Hydraulic Processes Study of BWR Spent Fuel Pool**

#### **Summary**

Due to the safety issues arising from the Fukushima accident, it is necessary to investigate the BWR 4 spent fuel pool in the Mark I type containment. Water circulation and spent fuel cooling phenomena are predicted using computational fluid dynamics (CFD). This study has reviewed the specifics of the spent fuel pool and software codes for the modelling of thermal hydraulic processes in the spent fuel pool. Moreover, a typical BWR 4 spent fuel pool and GE13 bundle models were created in ANSYS Fluent software. Those models are more accurate than the models in other studies of spent fuel pools. The pool is filled by 3,819 bundles of various ages in high-density racking. Thermal power of the spent fuel pool is 2,951 MW. The study showed that cooling water at the stationary mode in the spent fuel pool is 31 °C. These results correlate with other thermal hydraulic process studies of spent fuel pools.

#### 4 ŠILUMOS IR MASĖS MAINAI

##### Trimatis mišrios konvekcijos modeliavimas vertikaliame plokščiame kanale

Renoldas Zujus

Lietuvos energetikos institutas

**Ivadas.** Mišrios (esant abipusiam priverstinės ir natūralios konvekcijų poveikiui) konvekcijos šilumos mainų tyrimai kanaluose esant įvairiems kanalo skerspjūviams ir jo orientacijai yra svarbūs branduoliniėje energetikoje, šilumokaičiuose, elektronikos aušinimo sistemose, saulės energetikos sistemose. Dauguma tyrėjų koncentravosi į mišrios turbulentinės konvekcijos šilumos mainų tyrimus vertikaliuose vamzdžiuose dėl svarbos inžineriniuose taikymuose [1–3]. Platūs šios problemos tyrimai (turbulentinis tekėjimas vertikaliuose kanaluose) buvo atlikti Lietuvos energetikos institute [4]. Skirtingi tyrimai parodė, kad šilumos mainai esant priešingų krypčių (natūralios ir priverstinės konvekcijų kryptys priešingos) mišriai konvekcijai yra intensyvesni nei vien tik priverstinės konvekcijos atveju. Taip pat buvo atskleista, kad esant sutampančių krypčių (natūralios ir priverstinės konvekcijų kryptys sutampa) mišriai konvekcijai šilumos mainai susilpnėja palyginus su vien tik priverstine konvekcija ir tai įvyksta dėl tėkmės laminarizacijos, kai didėja termogravitacijos jėgų įtaka. Tačiau esant stipriai natūralios konvekcijos įtakai šilumos mainai atsistato ir net viršija priverstinei konvekcijai būdingą šilumos mainų intensyvumą.

Šilumos mainų tyrimų sąrašas laminarinio-turbulentinio perėjimo srityje mišrios konvekcijos atveju (esant termogravitacijos jėgų įtakai) yra pakankamai siauras. Tekėjimo pobūdis vamzdžiuose tirtas darbuose [5, 6]. Tėkmei vizualizuoti, į centrinę vamzdžio dalį buvo įpurkšta dažų. Nustatyta, kad esant vienakrypčių tėkmių mišriai konvekcijai, tekėjimas praranda stabilumą ir dažų srovelės forma tampa panaši į sinusoidę, o stebima vamzdžio sienelės temperatūra tampa pulsuojančio pobūdžio – atsiranda temperatūros pulsacijos. Didėjant termogravitacijos parametrai, išauga ir dažų srovelės sinusoidės amplitudė. Pradinis tėkmės nestabilumas priklauso ne tik nuo termogravitacijos parametro, bet ir vietos išilgai kanalo ( $L/d$ ). Priešingų tėkmių mišrios konvekcijos atveju, tėkmės nestabilumas pastebėtas atsirandant dažų srovelės asimetrijai šiek tiek prieš kaitinamą vamzdžio dalį. Esant didesnėms termogravitacijos parametro reikšmėms tėkmė pradeda pulsuoti, taip pat yra stebimas asimetrinis tekėjimas kanale. Taipogi pastebėta [1], kad išlinkimo taškų greičio profilyje egzistavimas ir ypač atgalinio tekėjimo atsiradimas, stimuliuoja laminarinio tekėjimo stabilumo praradimą, taip pat perėjimą į turbulentinį tekėjimą. Šiuo atveju tėkmės stabilumo netekimas ir perėjimas į turbulentinį tekėjimą įvyksta esant  $Re$  skaičiui mažiau už kritinį  $Re = Re_{cr} < 2.3 \cdot 10^3$ . Didėjant santykiui  $Gr_q/Re$ , kritinis Reinoldso skaičius mažėja. Mišrios konvekcijos vienakrypčių tėkmių atveju atstumo, nuo kurio tėkmė praranda

stabilumą, priklausomumas buvo nustatytas [1]. Priešingų tėkmių mišrios konvekcijos atveju didėjant  $Gr_q/Re$  santykiui, greitis arti kanalo sienelės mažėja, o kanalo centre didėja. Kai  $Gr_q/Re$  santykis pasiekia  $Gr_q/Re \approx 100$ , greičio gradientas tampa artimas nuliui, o toliau didėjant  $Gr_q/Re$ , pasireiškia atgalinis tekėjimas. Kai  $Gr_q/Re \approx 170$ , sukuriai kyla srityje netoli sienelės, o kai santykis  $Gr_q/Re$  įgyja dar didesnes reikšmes, tekėjimas tampa turbulentinis.

Tekėjimo struktūra priešingų tėkmių mišrios konvekcijos atveju vertikaliame vamzdyje buvo tirta judančių termoporų pagalba [7] ir nustatyta, kad kaitinamos dalies pradžioje sukuriai kyla netoli sienelės, kur sukuria temperatūros fluktuacijas, o didėjant termogravitacijos jėgų įtakai tekėjimas tampa turbulentinis.

Eksperimentiškai išmatuotų temperatūros ir greičio fluktuacijų rezultatai vertikaliame vamzdyje pateikti [8] darbe, kai oro tėkmės  $Re$  skaičiai atitinkamai  $Re = 1000, 1300$  ir  $1600$ . Išanalizavus tėkmės stabilumą esant sutampančių tėkmių konvekcijai, nustatyta, kad tėkmė praranda stabilumą, kai santykis  $Gr/Re > 1500$ . Tyrime [9] pateikti priešingų tėkmių mišrios konvekcijos laminarinio-turbulentinio perėjimo srityje vertikaliame plokščiame kanale esant simetriniam kaitinimui skaitinio modeliavimo ir eksperimentų rezultatai. Skaitinis dvimatis modeliavimas atliktas tomis pačiomis, kaip ir eksperimentai, sąlygomis naudojant kompiuterinę programą Ansys-Fluent. Atlikti eksperimentiniai tyrimai parodė, kad esant aukštesniam nei aplinkos oro slėgiui, kai kuriems  $Re$  skaičiams šilumos mainai intensyvesni nei esant turbulentiniam tekėjimui. Skaitiniai tyrimai parodė, kad kai termogravitacijos jėgų įtaka tampa žymi, atsiranda sukurinis tekėjimas prie kanalo sienelių ir tai suintensyvina šilumos mainus.

Šiame darbe pateikti vienakrypčių tėkmių mišrios konvekcijos laminarinio-turbulentinio perėjimo srityje vertikaliame plokščiame kanale skaitinių tyrimų rezultatai. Skaitinis trimatis (3D) modeliavimas atliktas esant tomis pačioms, kaip ir eksperimentai, sąlygomis naudojant kompiuterinę programą Ansys-Fluent. Skaitiniai tyrimai atlikti esant simetriniam kaitinimui, kai oro slėgis  $p = 0.2$  MPa, o  $Re$  ir  $Gr$  skaičiai  $Re_{in} = 2400, 2900$ ;  $Gr_{qin} = 4.1 \cdot 10^8, 5 \cdot 10^8$  atitinkamai.

**Metodologija.** Šiame darbe pateikti trimačio stacionaraus mišrios konvekcijos vienakrypčių oro tėkmių atveju vertikaliame plokščiame kanale (aukštis – 0,0408 m, plotis – 0,4 m, ilgis – 6 m, hidrodinaminės nekaitinamos dalies ilgis – 2,5 m, kaitinamos (kalorimetrinės) dalies ilgis 3,5 m su dvipusiu simetriniu kaitinimu ( $q_{w1} = q_{w2} \approx \text{const}$ ) skaitinio modeliavimo rezultatai. Modeliavimas atliktas naudojant laminarinį, turbulentinis pereinamuosius modelius:  $kkl-\omega$  [10], SST [11, 12] ir Reinoldso įtempimų  $\omega$  modelį [13, 14].

Modeliavimui naudotas kompiuterinių programų paketas Ansys - Fluent [15], skirtas takųjų medžiagų dinamikai modeliuoti. Turbulentinis pereinamasis modelis SST pagrįstas, apjungiant SST  $k-\omega$  modelį [12] turbulentinės kaitos funkcijos ( $\gamma$ ) ir Reinoldso skaičiaus (pagal impulso netekimo storį) ( $Re_0$ ) pernešimo lygtimis. Turbulentinis pereinamasis modelis  $kkl-\omega$  paremtas turbulentinės kinetinės ( $k$ ),

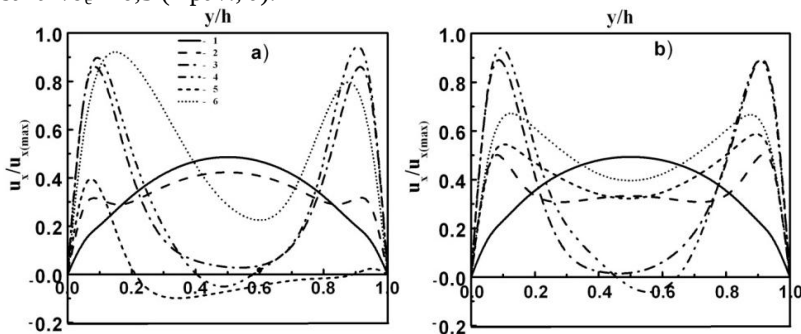
laminarinės kinetinės (kl) energijų bei atvirkštinės turbulentinės laiko skalės ( $\omega$ ) pernešimo lygtimis. Reinoldso įtempimų  $\omega$  modelis pagrįstas  $k-\omega$  [13] ir LRR Reinoldso įtempimų modelio [14] lygtimis.

Kraštinės sąlygos:

- Įtekėjime ( $x = 0$ ) išilgai kanalo greitis  $u_x$  lygus įtekėjimo greičiui  $u_{in}$ , o kitos greičio komponentės  $u_y = u_z = 0$ . Oro entalpija  $i$  į kalorimetrinę dalį lygi įtekėjimo entalpijai  $i_{in}$ .
- Ant sienelių greičio komponentės  $u_x, u_y, u_z = 0$ , šilumos srauto tankis ant kaitinamų sienelių pastovus  $q_{w1} = q_{w2} = \text{const}$ .

Skaitinių tyrimų rezultatų patikimumui atlikta rezultatų analizė nuo skaičiavimo tinkelio esant  $Re_{in} = 2900$ . Palyginus, skaičiavimo tinkelių ( $1000 \times 20 \times 75$ ) ir ( $800 \times 20 \times 60$ ) modeliavimo rezultatai praktiškai nepriklausė nuo tinkelio dydžio. Todėl pasirinktas  $1000 \times 20 \times 75$  tinkelis visiems skaitiniams tyrimams šiame darbe.

**Rezultatai.** Skaitiniai tyrimai atlikti esant dviem  $Re$  skaičiams ( $Re_{in} = 2400, 2900$ ). Greičio profilis laminarinio modelio atveju esant  $Re_{in} = 2400$  pavaizduotas 1 pav. Analizuojant greičių profilius, stebima tėkmės raidos dinamika. Esant  $Re_{in} = 2400$  hidrodinaminėje (nekaitinamoje) kanalo dalyje formuojasi laminarinis greičio profilis. Kaitinamoje kanalo dalyje parabolinis greičio profilis šiek tiek deformuojamas (netoli sienelės greitis nežymiai padidėja) dėl natūralios konvekcijos jau esant  $x/d_e = 0,3$  (1 pav., a).



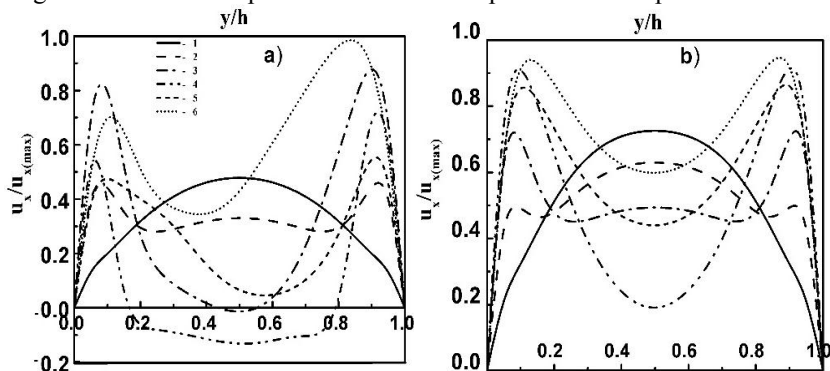
1 pav. Greičių profilių kitimas kanale, kai  $Re_{in} = 2400$ ,  $Gr_{q\ in} = 4.1 \cdot 10^8$ . a) laminarinis modelis; b)  $Re$  įtempimų  $\omega$  modelis. 1 kreivė –  $x/d_e = 0,3$ ; 2 – 1,9(a), 3,9(b); 3 – 10,2; 4 – 11,6(b), 12,3(a); 5 – 18,3(a), 22,3(b); 6 – 42

Didėjant  $x/d_e$ , didėja natūralios konvekcijos įtaka ir greičio profilis tampa tipiškos M-formos (greitis arti sienelės tampa didesnis nei kanalo centre). Dar daugiau, centrinėje dalyje prie kai kurių  $x/d_e$ , greitis tampa neigiamas ir tai reiškia, kad atsiranda atgalinis tekėjimas. Sūkurinis tekėjimas stebimas zonoje  $11 < x/d_e < 26$ , toliau sūkuriai nutrūksta. Turbulentiniai pereinamieji modeliai rodo panašią greičio profilių raidą išilgai kaitinamos kanalo dalies, tačiau Reinoldso

įtempimų  $\omega$  modelio atveju (1 pav. b) sukūrinis tekėjimas stebimas  $10 < x/d_e < 14$  zonoje, kkl- $\omega$  modelio atveju (2 pav. a)  $11 < x/d_e < 17$  ir tik pereinamojo SST modelio atveju (2 pav. b) sukūrinis tekėjimas nėra stebimas kanale.

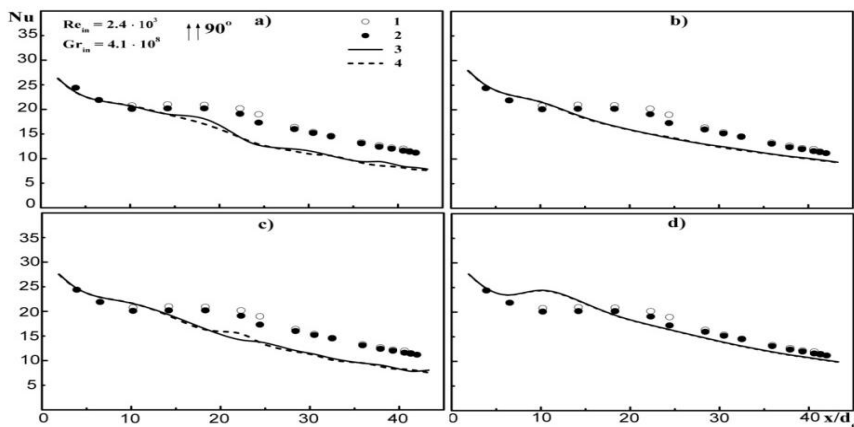
Atlikti skaitiniai tyrimai esant didesniai  $Re$  skaičiui ( $Re_{in} = 2900$ ) parodė panašų greičio profilių dėsningumą kaip ir esant mažesniai  $Re$  skaičiui ( $Re_{in} = 2400$  1–2 pav.), tačiau sukūrinis tekėjimas buvo stebimas tik siauroje kaitinamo kanalo dalyje  $12 < x/d_e < 14$  laminarinio ir kkl- $\omega$  modelių atvejais.

Šilumos atidavimo kitimas išilgai kanalo esant  $Re$  skaičiui ( $Re_{in} = 2400$ ) skirtingiems turbulentinio pernešimo modeliams pavaizduotas 3 pav.

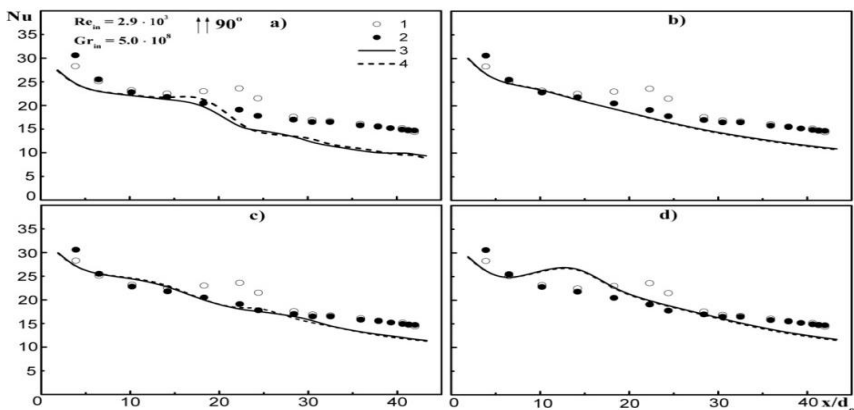


2 pav. Greičių profilių kitimas kanale, kai  $Re_{in} = 2400$ ,  $Gr_{q\ in} = 4.1 \cdot 10^8$ . a) kkl- $\omega$  modelis; b) SST modelis. 1 kreivė –  $x/d_e = 0,3$ ; 2 – 1,9(b), 3,9(a); 3 – 3,9(b), 14,2(a); 4 – 10,2(b), 15,5(a); 5 – 18,3(a), 22,3(b); 6 – 42

Kaip matyti (3 pav. a), iki  $x/d_e \leq 10$  laminarinio modelio atveju šilumos mainų rezultatai gerai sutampa su eksperimentiniais duomenimis, tačiau kai  $x/d_e > 10$  eksperimentiniai duomenys viršija skaitinių tyrimų rezultatus ir nuokrypis siekia iki 35 %. Re įtempimų  $\omega$  modelio atveju (3 pav., b) rodo gerą sutapimą su eksperimentais iki  $x/d_e \leq 10$ , tačiau kai  $x/d_e > 10$  skaitiniai rezultatai yra žemiau eksperimentinių (maksimalus nuokrypis yra 25 %). Esant mažiems  $x/d_e$  ( $x/d_e \leq 10$ ) naudojant kkl- $\omega$  modelį (3 pav., c) gauti šilumos mainų rezultatai gerai atitinka eksperimentus, tačiau esant didesnėms  $x/d_e$  reikšmėms ( $x/d_e > 10$ ) eksperimentiniai duomenys rodo iki 33 % didesnes reikšmes nei modeliavimo. SST turbulentinio pereinamuoju modeliu (3 pav., d) gautos  $Nu$  reikšmės yra didesnės nei eksperimentų kanalo zonoje  $x/d_e \leq 15$ , tačiau kai  $x/d_e > 15$  SST modeliu gautos  $Nu$  reikšmės nežymiai mažesnės (nuokrypis nuo eksperimentų iki 21 %). Šiluminės kvazistabilizacijos zonoj ( $x/d_e = 42$ ) nuokrypis apie 9 %. Reziumuojant galima teigti, kad esant mažesniai  $Re$  skaičiui ( $Re_{in} = 2400$ ) geriausias sutapimas su eksperimentais gautas SST modelio atveju, o blogiausias laminarinio modelio.



3 pav. Šilumos atidavimo priklausomumas nuo  $x/d_e$ . 1 – eksperimentiniai duomenys (1 sienelė); 2 – eksperimentiniai duomenys (2 sienelė); 3 – skaitinių tyrimų rezultatai (1 sienelė); 4 – skaitinių tyrimų rezultatai (2 sienelė); a) – laminarinis; b) – Re įtempimų  $\omega$ ; c) kkl- $\omega$  d) – SST modeliai



4 pav. Šilumos atidavimo priklausomumas nuo  $x/d_e$ . 1 – eksperimentiniai duomenys (1 sienelė); 2 – eksperimentiniai duomenys (2 sienelė); 3 – skaitinių tyrimų rezultatai (1 sienelė); 4 – skaitinių tyrimų rezultatai (2 sienelė); a) – laminarinis; b) – Re įtempimų  $\omega$ ; c) kkl- $\omega$  d) – SST modeliai

Šilumos mainų kitimas išilgai kanalo esant Re skaičiui ( $Re_{in} = 2900$ ) parodytas 4 pav. Kaip matyti iš (4 pav., a) laminarinio modelio atveju šilumos mainų rezultatai artimi eksperimentinėms reikšmėms, tik kai  $10 \leq x/d_e \leq 18$ , likusioje kanalo dalyje Nu reikšmės mažesnės nei eksperimentinių duomenų (maksimalus nuokrypis yra 36 %). Re įtempimų  $\omega$  modeliu (4 pav., b) gautas geras sutapimas su eksperimentiniais

duomenimis iki  $x/d_e \leq 15$ , o kai  $x/d_e > 15$  skaitinių tyrimų rezultatai yra prastesni nei eksperimentų (didžiausias nuokrypis 26 %). kkl- $\omega$  modelio (4 pav., c) rezultatai gerai koreliuoja su eksperimentų duomenimis (nuokrypis neviršija 10 %), tačiau siauroje kanalo dalyje nuokrypis yra 24 %. SST (4 pav., d) modelio rezultatai gerai koreliuoja  $24 \leq x/d_e \leq 30$  kanalo srityje, o maksimalus nuokrypis ne daugiau 26 %. Taigi, galima teigti, kad esant  $Re_{in} = 2900$ , geriausia koreliacija tarp skaitinio modeliavimo ir eksperimentų duomenų nustatyta kkl- $\omega$  modelio atveju. Laminarinio modelio rezultatai rodo blogiausią sutapimą su eksperimentais.

### Išvados

1. Skaitinio modeliavimo rezultatai daugeliu atvejų (laminarinio ir turbulentinių pereinamųjų modelių atvejais) ribotoje terminio raidos kanalo dalyje rodo egzistuojant sūkurinį tekėjimą, kuris vėliau nutrūksta išilgai kanalo.
2. Geriausia skaitinio modeliavimo koreliacija su eksperimentiniais šilumos mainų duomenimis gauta SST turbulentinio pereinamojo modelio atveju, kai  $Re_{in} = 2400$ , o esant didesniai  $Re$  skaičiui ( $Re_{in} = 2900$ ) – kkl- $\omega$  turbulentinio pereinamojo modelio atveju.

### Pažymėjimai

$b$  – kanalo plotis, m;  $c_p$  – savitoji šiluma, J/(kg·K);  $d_e$  – kanalo ekvivalentinis diametras  $d_e = 2hb/(h+b)$ , m;  $Gr_q$  – Grashofo skaičius pagal šilumos srautą  $Gr_q = g \cdot \beta \cdot d_e^4 \cdot q_w / \nu^2 \cdot \lambda$ ;  $g$  – laisvojo kritimo pagreitis, m/s<sup>2</sup>;  $h$  – kanalo aukštis, m;  $i$  – entalpija, J/kg;  $Nu$  – Nuselto skaičius;  $p$  – slėgis, Pa;  $u$  – tėkmės greitis, m/s;  $x$  – atstumas nuo kaitinimo pradžios (išilginė koordinatė), m;  $x, y, z$  – koordinatės;  $\alpha$  – šilumos atidavimo koeficientas;  $\beta$  – temperatūrinis plėtimosi koeficientas, 1/K;  $\lambda$  – šiluminio laidumo koeficientas, W/(m·K);  $\mu$  – dinaminės klampos koeficientas, Pa·s; indeksai: 1, 2 pirma ir antra sienelė;  $in$  – įtekėjime;  $w$  – ant sienelės.

### Literatūra

1. Petukhov B. S., Polyakov A. F. Turbulent mixed convection heat transfer, Nauka, Moscow, 1986.
2. Jackson J. D., Cotton M. A.; Axell B. P. Studies of mixed convection in vertical tubes. Review, *International Journal of Heat Fluid Flow*. 1988, Vol. 10, No. 1. pp. 2-15.
3. Jackson J. D. Influences of buoyancy on velocity, turbulence and heat transfer in ascending and descending flows in vertical passages. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> Baltic Heat Transfer Conference. Advances in Heat Transfer Engineering*, Kaunas, Lithuania. 2003, pp. 57-78.
4. Vilemas J., Poškas P. Effect of body forces on turbulent heat transfer in channels, LEI-Begell House. Kaunas-New York. 1999.

5. Scheele G. F., Rosen E. M., Hanratty T. J. Effects of Natural Convection on Transition to Turbulence in Vertical Pipes, *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1960, Vol. 38, pp. 67-73.
6. Scheele G. F., Hanratty T. J. Effects of Natural Convection Instabilities on Rates of Heat Transfer at Low Reynolds Numbers, *AIChE Journal*, 1963. Vol. 9, No. 2, pp. 183-185.
7. Joye D. D., Jacobs W. S. Backflow in the Inlet Region of Opposing Mixed Convection Heat Transfer in a Vertical Tube, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Heat Transfer Conference*. 1994. Vol. 5, pp. 489-494.
8. Behzadmehr A., Laneville A., Galanis N. Experimental Study of Onset of Laminar-Turbulent Transition in Mixed Convection in a Vertical Heated Tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008. Vol. 51. No. 25-26. Pp. 5895-5905.
9. Poskas P., Poskas R., Sirvydas A., Smaizys A. Experimental investigation of opposing mixed convection heat transfer in the vertical flat channel in a laminar-turbulent transition region, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011. Vol. 54, No. 1-3, pp. 662-668.
10. Walters D. K., Cokljat D. A. three-equation eddy-viscosity model for Reynolds-averaged Navier-Stokes simulations of transitional flows, *Journal of Fluids Engineering*. 2008, Vol. 130.
11. Menter F. R., Langtry R. B., Likki S. R., Suzen Y. B., Huang P. G., Volker S. A correlation based transition model using local variables. Part 1. Model formulation, *Journal of Turbomachinery*. 2004. Vol. 128. No. 3. pp 413-422.
12. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32. No. 8. pp. 1598-1605.
13. Wilcox D. C. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, Inc. La Canada, California. 1998
14. Launder B. E., Reece G. J. Rodi W. Progress in the development of a Reynolds-Stress turbulence closure, *Journal of Fluid Mechanics*. 1975. Vol. 68, No. 3. pp. 537-566.
15. ANSYS-FLUENT Inc., 2012. FLUENT 14.0 User Documentation

### **Numerical Three-Dimensional Simulation of Mixed Convection in a Vertical Flat Channel**

#### **Summary**

Results of the numerical simulation of mixed convection in a vertical flat channel in case of a transitional region for aiding flows are presented. Steady numerical three-dimensional simulations were performed using the Ansys-Fluent 14 code. Investigations were performed in airflow at 0.2MPa pressure with symmetrical heating for Reynolds numbers  $Re_{in} = 2400, 2900$  and Grashof numbers  $Gr_{qin} = 4.1 \cdot 10^8, 5 \cdot 10^8$  accordingly. Modelling results demonstrate that circular flow takes place near the heated walls.

## Unikalių vandens fizinių savybių įtaka kondensacijai tarpfaziniame paviršiuje

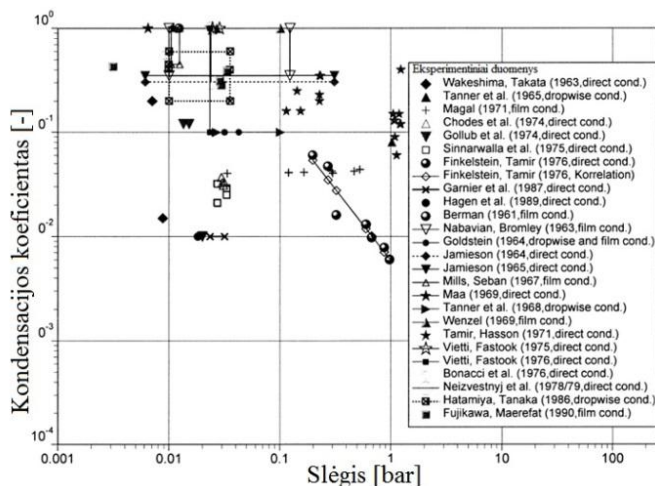
Mindaugas Drūlia  
Lietuvos energetikos institutas

Vanduo yra labiausiai paplitęs ir dažniausiai naudojamas natūralus junginys Žemėje. Tačiau jis pasižymi daugeliu savybių, kurios, lyginant su panašiomis medžiagomis, yra neįprastos. Dėl vandens unikalių fizinių savybių gausos, ši medžiaga plačiai pritaikoma technologiniuose įrenginiuose. Pavyzdžiui, dėl didelės vandens šiluminės talpos  $C_p$  (4,19 kJ/kgK) jį patogu naudoti branduoliniuose reaktoriuose ir šiluminiuose kontūruose, kaip šilumos nešėją. Grynas vanduo yra labai geras tirpiklis, ir jame nuolat yra tam tikras ištirpusių druskų kiekis, kuris daro įtaką vandens savybėms ir kondensacijos procesams; dėl to eksperimentų, atliktų su grynu vandeniu, yra mažai. Dėl fazės grįžtamumo, vandens garai naudojami turbinose elektros energijai generuoti, ir t. t. Tačiau kyla klausimas, kas nulemia visas šias savybes, kurių dėka vanduo taip plačiai pritaikomas? Arba, kaip būtų galima įvertinti vandens savybių įtaką vandens elgsenai, keičiant aplinkos sąlygas?

Žvelgiant molekulinio lygmeniu, vandens molekulės sudarytos iš vieno deguonies ir dviejų vandenilio atomų, susietų kovalentiniais ryšiais. Skysčio sistemoje esant daugiau vandens molekulių, šios sąveikauja silpnesniais ryšiais, Van der Waalso bei vandeniliniiais. Pastarieji nulemia daugelį unikalių vandens fizinių savybių. Iš viso viena  $H_2O$  molekulė gali sudaryti iki 6 ryšių su aplinkinėmis molekulėmis. Iš jų 4 gali būti vandeniliniai ryšiai (H-ryšiai). Šių ryšių dėka, vandens molekulės gali formuotis į polimerinius darinius, dar vadinamus klasteriais. Kadangi  $H_2O$  molekulė yra poliška, joms suformavus klasterį, šis įgyja atstojamąjį poliariškumą. Tokie klasteriai formuojasi vienas šalia kito, o jų kiekis apibūdinamas klasterių tankiu. Apskaičiuota, kad prie tarpfazinio vandens-garo paviršiaus esantys klasteriai yra didensio tankio nei tūryje. Apskaičiuota [1], kad vidutiniškai vandenyje kiekviena  $H_2O$  molekulė sudaro 3 ryšius su kitomis  $H_2O$  molekulėmis H-ryšių pagrindu. Vieno klasterio gyvavimo laikas vidutiniškai trunka  $10^{-12}$ – $10^{-9}$  s [2]. Tai trumpas laikas, nulemtas elektrono judėjimo greičio aplink H atomo branduolį bei šiluminių vibracijų [2]. Sudarytieji ryšiai yra ganėtinai stiprūs, lyginant su  $H_2O$  molekulių šilumine energija ( $k \cdot T$ ). Palyginimui, kai  $T = 273$  K, H-ryšio stiprumas yra 0,24 eV, o šiluminė energija lygi 0,023 eV, t. y. ~10 kartų mažiau. Vienam klasteriui nutrūkus, tuojau pat suformuojamas kitas. 2006 m. Smith atliktame darbe su vandens klasterių simuliacijomis [3] teigiama, kad H-ryšiai tarp molekulių taip greitai nutraukiami ir atstatomi, kad visas skystis gali būti laikomas kaip ištisinis H-ryšių tinklas. Kaip H-ryšys yra susijęs su kondensacija tarpfaziniame paviršiuje?

Vandens garavimo ir kondensacijos procesai plačiai tyrinėjami beveik šimtmetį, tiek eksperimentiškai, tiek sudarant teorinius modelius [4] procesų spartai matuoti. Tiesa, iš teorinių modelių iki šiol nelabai pavyksta atkurti realaus vandens

savybių, nors šie modeliai ir teikia naudingos informacijos apie vandens elgseną [5]. Marek ir Straub [6] įvertino skirtingų mokslininkų taikomus kondensacijos koeficientus, kurie prie to paties slėgio skyrėsi keliomis eilėmis. Paklaidų galima nepaisyti kondensacijos koeficientams skiriantis keliais procentais. Šiuo atveju ignoruoti rezultatus būtų neadekvatu. Tai suponuoja mintį, kad naudotieji kondensacijos koeficientai neatitinka fizinės realybės, arba dėl eksperimentinių rezultatų netikslumo, arba dėl neteisingų prielaidų, kuriomis vadovaujantis priimti šie koeficientai.



1 pav. Kondensacijos koeficientų priklausomumai nuo slėgio, išmatuoti skirtingų mokslininkų. Adaptuota iš [6]

Anksčiau darant logiškas prielaidas bei vadovaujantis klasikine Maksvelo-Bolcmano teorija, buvo manoma, kad vanduo gali pereiti į garo fazę tuo atveju, jei vandens vidutinė temperatūra viršytų garuose esančių molekulių vidutinę temperatūrą. Mokslininkų Ward et al [7], Badam et al [8] eksperimentiniuose darbuose buvo gauti priešingi šiai teorijai rezultatai: buvo aptikti temperatūriniai „šuoliukai“ tarpfaziniame vandens-garo paviršiuje garavimo ir kondensacijos metu, kuomet garo temperatūra buvo aukštesnė nei vandens. Badam eksperimente skirta daug dėmesio matavimų tikslumui gerinti, tad jų rezultatai yra patikimi. Ward et al ir Badam et al darbai patvirtina poziciją, kad sprendžiant kondensacijos uždavinius, klasikiniame metode taikomi pataisos koeficientai yra įvedami, nes pradinė Maksvelo-Bolcmano teorijos prielaida vandeniui yra netinkama.

Klasikinės teorijos principas yra, kad vandens molekulės išgaravimas ir kondensacija yra dviejų molekulių sąveikos pasekmė. Analitiniai metodai kondensacijos srautams skaičiuoti dažnai išvedinėjami iš vadinamosios Hertz-Knudsen-Schrage lygties:

$$J = \left( \frac{2}{2 - \alpha_e} \right) \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \cdot \left( \frac{\alpha_c \cdot P_{fi}}{\sqrt{T_{fi}}} - \frac{\alpha_e \cdot P_{gi}}{\sqrt{T_{gi}}} \right) \quad (1)$$

čia:  $J$  – kondensacijos arba garavimo srautas;  $\alpha_e$ ,  $\alpha_c$  – garavimo ir kondensacijos koeficientai;  $M$  – vandens molinė masė;  $R$  – universalioji dujų konstanta;  $P_{fi}$ ,  $P_{gi}$  – slėgis prie pat paviršiaus iš skysčio pusės, ir iš garo pusės;  $T_{fi}$ ,  $T_{gi}$  – atitinkamos temperatūros. Plėtojant skaičiavimo modelius, taikomi pataisais koeficientai, kurie kartais skiriasi net ir esant labai panašioms eksperimentinėms sąlygoms, kaip rašoma Marek & Straub [6] darbe. Kyla klausimas, kokių modelių būtų galima taikyti, norint atsisakyti pataisais koeficientų ar sumažinti jų įtaką kondensacijos spartos skaičiavimuose?

Vadovaujantis tarpmolekulinių ryšių stiprumo palyginimu su vandens šiluminės energijos kiekiu, galima daryti prielaidą, kad  $H_2O$  molekulei norint išgaruoti, nepakanka vienos molekulės smūgio energijos tam, kad būtų nutraukti trys H-ryšiai. Momentas, kai  $H_2O$  molekulė neturi H-ryšių su kitomis molekulėmis yra labai trumpas ir retas įvykis. Kita vertus, garo molekulės kinetinė energija yra mažesnė nei vandens paviršiaus įtempimo jėgos. Kad molekulė būtų įterpta tarp šių ryšių ir susikondensuotų, galimai egzistuoja kitoks mechanizmas nei dviejų molekulių sąveika. Tokioms hipotezėms patikrinti reikėtų atlikti kitus eksperimentus.

### Išvados

1. Unikalias vandens fizines savybes nulemia vandeniliniai ryšiai tarp  $H_2O$  molekulių.
2. Šios savybės savo ruožtu daro įtaką kondensacijos ir garavimo procesams.
3. Vandenilinio ryšio stiprumas yra apie 10 kartų didesnis nei vandens šiluminė energija, esant normalioms sąlygoms.
4. Garo molekulės kondensacija negali būti dviejų molekulių sąveikos pasekmė.
5. Kondensacijai aprašyti naudojamų Maksvelo-Bolcmano skirstinių sudarymo pradinės prielaidos galimai yra klaidingos.

### Literatūra

1. Lenz A., Ojamäe L. „Theoretical IR spectra for water clusters  $(H_2O)_n$  ( $n = 6-22, 28, 30$ ) and identification of spectral contributions from different H-bond conformations in gaseous and liquid water“, J. Phys. Chem. A, 110, (2006) pp 13388-13393.
2. Lower S. „A gentle introduction to water and its structure“. Vancouver, Canada (2014) <http://www.chem1.com/acad/sci/aboutwater.html>.
3. J. D. Smith, Ch. D. Cappa, K. R. Wilson, R. C. Cohen, P. L. Geissler, and R. J. Saykally, „Unified description of temperature-dependent hydrogen bond rearrangements in liquid water“, PNAS (2005).
4. Wallqvist A. and Mountain R. D. „Molecular models of water: Derivation and description“, Reviews in Computational Chemistry 13 (1999) 183-247.

5. Chaplin M. “Water structure and science” (2015) [http://www1.lsbu.ac.uk/water/water\\_structure\\_science.html](http://www1.lsbu.ac.uk/water/water_structure_science.html).
6. Marek, R, J. Straub “Analysis of the evaporation coefficient and the condensation coefficient of water”, *Int. J. Heat Mass Transfer* 44 (2001) pp 39-53.
7. Ward C. A., Stanga D. “Interfacial conditions during evaporation or condensation of water”, *Phys. Rev. E*, Vol. 64, pp 05159091-99. (2001).
8. Badam V.K, Kumar V., Durst F., Danov K. Experimental and theoretical investigation of interfacial temperature jumps during evaporation, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, (2007) pp 276-292.

### **The influence of unique water physical properties on the condensation at water-vapor interface**

#### **Summary**

This article is a review on some of the unique water physical properties that influence condensation and evaporation at water-vapor interface. The hydrogen bonding causes molecules to form into clusters. The calculations of condensation rates by classical Maxwellian distribution are based on two-particle event, and correction factors cannot be avoided. However, these factors range by several orders of magnitude under the same conditions. The hypothesis is that Maxwellian-Boltzmann initial assumption for water may be incorrect. Further experiments could improve the understanding about condensation issues.

## Lašo uždavinio skaitinio eksperimento optimizavimas lašelio terminių parametrų aspektu

Monika Maziukienė, Gintautas Miliauskas, Arvydas Adomavičius  
Kauno technologijos universitetas

Skysčio išpurškimas plačiai pritaikomas energetikoje, transporte ir pramonėje. Tokių terminių technologijų efektyvumą apibrėžia labai stipriai išpurškimo procese išplėtotas kontakto tarp skystosios disperguotos ir nešančiosios dujinės terpių kontakto paviršiaus plotas. Todėl šilumokaitos ir masės mainų procesai tarp skysčio lašelių ir jų dujinės apsupties yra labai intensyvūs. Pernašos procesų išpurkšto skysčio technologijose apibrėžimas yra žinomas kaip „lašo“ uždavinys, kurio sprendiniai yra dvifazio lašelių ir dujų srauto šilumos ir masės mainų parametrų laikinės  $P(\tau)$  funkcijos. Tarp pernašos parametrų yra svarbi terminių parametrų  $P_T(\tau)$  funkcijų grupė, kurioje pagrindinėmis laikomos dujų srauto  $T_d(\tau)$  temperatūros ir lašelio nestacionarusis temperatūros lauko  $T(r, \tau)$  funkcijos, apibrėžiančios šilumokaitos procesų dujų sraute ir lašeliuose varančiąsias jėgas. „Lašo“ uždavinys apjungia „lašo vidinį“ ir „lašo išorinį“ uždavinius. „Lašo vidinių“ uždavinių apibrėžiamas pernašos procesų intensyvumas lašelyje. „Lašo išorinių“ uždavinių apibrėžiama pernašos procesų intensyvumas tarp lašelio ir jo apsupties bei dvifazio srauto parametrų kitimas. „Lašo“ uždaviniui išspręsti taikomi analitiniai, skaitiniai ir kombinuoti analitiniai-skaitiniai tyrimo metodai [1]. Analitiniai sprendiniai galimi tik tam tikrais apibrėžtais kraštinių sąlygų atvejais. Kai lašelio  $2R$  skersmuo ir jo paviršiaus  $T_R$  temperatūra yra apibrėžti, tuomet lašelio fazinių virsmų intensyvumą patogiau aprašyti pagal skysčio garo srauto tankio analitinį modelį [2], atsižvelgiant į difuzinį garo sklaidimą ir Stefano hidrodinaminio srauto įtaką. Garuojančio lašelio išorinio šildymo intensyvumas dažniausiai apibrėžiamas panašumo teorijos pagrindu grindžiamas modeliais, kuriose Stefano hidrodinaminio srauto slopinantis poveikis garuojančio lašelio konvekciniam šildymui įvertinamas Spoldingo šilumos pernašos parametro funkcijomis [3]. Pusskaidrio lašelio spinduliuotės šilumokaitai apibrėžti, išplėtoti spektrinės spinduliuotės modeliai [4-6].

Lašelio nestacionarusis temperatūros laukas aprašo lašelio atskirų sluoksnių temperatūros kitimą laike. Nestacionariojo temperatūros lauko  $T(r, \tau)$  funkcijos apibrėžimo metodas labai priklauso nuo šilumokaitos lašelyje sąlygų. Kai skystis lašelyje stabilus, tuomet  $T(r, \tau)$  funkcija parašoma integralaus tipo išraiškomis grindžiamais modeliais [6, 7], leidžiančias atsižvelgti į sudėtinį šilumos plitimą lašelyje laidumu ir spinduliuavimu. Galimas su cirkuliuojančiu skysčiu skysčio pernešamos konvekinės šilumos indėlis lašelio energiniame balanse įvertinamas efektyviojo šilumos laidumo teorijos metodu [8]. Pagal lašelio nestacionariojo

temperatūros lauko  $T(r, \tau)$  funkciją apibrėžiamos svarbios lašelio paviršiaus, jo centro ir masės vidutinės temperatūros bei lokalaus temperatūros gradiento  $T_R(\tau)$ ,  $T_C(\tau)$ ,  $T_m(\tau)$  ir  $gradT_R(\tau)$  funkcijos atitinkamai. Dujų ir lašelio paviršiaus temperatūrų  $T_d(\tau) - T_R(\tau)$  skirtumas apibrėžia lašelio išorinės šilumokaitos varančiąją jėgą. Lašelio paviršiaus ir jo centro temperatūrų  $T_R(\tau) - T_C(\tau)$  skirtumas apibrėžia lašelio vidinės šilumokaitos varančiąją jėgą. Neizoterminio lašelio terminės būseną kitimą apibrėžia jo masės vidutinės temperatūros  $T_m(\tau)$  funkcija, o lokalųjį šilumos srautą laidumu lašelyje apibrėžia nestacionariojo temperatūros lauko gradiento funkcija:  $q_{k,r}(\tau) = -\lambda_r(\tau) \cdot gradT_r(\tau)$ .

Sudėtinės šilumokaitos lašelyje laidumu ir spinduliavimu atveju nestacionariojo temperatūros lauko funkcija aprašoma begaline integralių išraiškų eilute [6]:

$$T(r, \tau) = T_R(\tau) + \frac{2}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi}{R} \int_0^{\tau} f_n \exp \left[ -a \left( \frac{n\pi}{R} \right)^2 (\tau - \tau_*) \right] d\tau_*, \quad (1)$$

kurioje  $f_n$  funkcija atsižvelgiama į lašelio paviršiaus  $T_R$  temperatūros kitimo tempą ir lokalaus spinduliuotės srauto  $q_s(r)$  funkcijos savitumus:

$$f_n = (-1)^n \frac{R}{n\pi} \frac{dT_R}{d\tau} - \frac{1}{Rc_{p,l}\rho_l} \int_0^R q_s \left( \frac{n\pi}{R} \cos \frac{n\pi}{R} - \sin \frac{n\pi}{R} \right) dr. \quad (2)$$

Sudėtinio šilumos plitimo laidumu ir spinduliavimu lašelio terminės būsenos kitimo (1, 2) modelis reikalauja apibrėžtos lašelio paviršiaus temperatūros  $T_R(\tau)$  funkcijos. "Lašo" uždavinio "vidinio" ir "išorinio" uždavinių sprendiniai suminių šilumos  $q_{\Sigma} = q_s + q_c$  srautų bei fazinių virsmų šilumos  $q_f$  srauto atžvilgiu susiejami prie lašelio paviršiaus pritekančių ir nuo jo nutėkančių šilumos srautų atitikimo reikalaujančia sąlyga:

$$\bar{q}_{\Sigma}^{isor} + \bar{q}_{\Sigma}^{vid} + \bar{q}_f^{isor} \equiv 0. \quad (3)$$

Skaitiniai schemai sudaryti (3) išraiška konkretizuojama pritaikius lašelio konvekcinio šildymo [7], sudėtinio šilumos plitimo (1, 2), lokalaus srauto tankio pusskaidriame lašelyje [6] bei fazinių virsmų [2] modelius. Šilumos konvekcijos indėlis lašelio vidinėje šilumokaitoje įvertinamas efektyviojo šilumos laidumo parametru [7]. Konkretizuotos išraiškos (3) sprendinys lašelio paviršiaus temperatūros atžvilgiu apibrėžiamas pagal iteracinio tipo skaitinę schemą. Jos tinklėlis sudaromas pasirinktu lašelio šildymo  $0 \div \tau_f$  laikotarpiu graduojant laiko  $\tau$  koordinatę ir lygiagrečiai graduojant radialinę  $r$  koordinatę lašelio matmens

atžvilgiu, kai ji kinta  $r \equiv 0 \div R$  intervale. Tam numatomas laiko žingsnių  $I-1$  skaičius, kai  $\sum_{i=1}^{I-1} (\tau_{i+1} - \tau_i) = \tau_f$ , ir parenkamas radialinės koordinatės žingsnių  $J-1$  skaičius, kai  $\sum_{j=1}^{J-1} (r_{j+1} - r_j) = R$ . Nestacionarųjį temperatūros  $T_{i,j}$  lauką ir jo gradientą  $grad T_{i,j}$  optimalu apibrėžti (1, 2) išraiškų integraliose eilutėse įvertinus 81 narį [9], o lašelio radialinėje koordinatėje jau tradiciškai įvertinama 41 tašku.

Lašeliui garuojant ar ant jo paviršiaus kondensuojantis skysčio garui, lašelio masė ir išmatavimai kinta. Todėl analizuoti nestacionariojo temperatūros lauko funkciją  $r$  koordinatės atžvilgiu yra sudėtinga. Numačius lašelio sferiškumą, jo matmens kitimas apibrėžiamas lašelio spindulio  $R(\tau)$  funkcija. Tuomet patogų radialinę  $r$  koordinatę pervesti į bematės radialinės koordinatės  $\eta = r/R(\tau)$  formą, kuri užtikrina universalų kintančio matmens lašelio vienetinį bematį  $\eta_{r=R} = 1$  spindulį. Lašelio šildymo laidumu atveju ("k" šilumokaite) yra išryškintas lašelio terminių parametrų  $P_T(\tau)$  funkcijų pervedimo į Furje  $Fo \equiv \tau \cdot a_0 / R_0^2$  kriterijumi išreikštą laiko mastelį tikslingumas, kadangi  $P_T(Fo)$  funkcijos išpurškiamo skysčio  $T_0$  temperatūra ir dujų srauto  $T_d$  temperatūra bei skysčio garo dujų mišinyje tūrine  $\bar{p}_{g,\infty} = p_{g,\infty} / p$  dalimi apibrėžtais atvejais nejautrios lašelių dispersiškumui [10]. Tuomet lašelio gyvavimo trukmę nusakančiam fazinių virsmų  $0 \div \tau_f$  ciklui, kuris yra individualus skirtingo dispersiškumo lašeliams, apibrėžti pakanka sumodeliuoti  $0 \div Fo_{f,"k"}$  fazinių virsmų ciklą laisvai parinktam  $R_0$  dispersiškumo lašeliui [11].

Išpurkšto skysčio terminės technologijos dažnai susijusios su skystojo kuro deginimu. Kuro lašelių fazinių virsmų ciklui yra būdingas garavimo procesas, kuriame galimi nestacionariojo ir pusiausviro garavimo režimai. Jie išskiriami pagal lašeliui teikiamos šiluminės energijos pasiskirstymą šildyti skystį lašelyje ir jį garinti. Pusiausviro garavimu laikomas fazinių virsmų atvejis, kai lašeliui teikiama šiluma skystį tik garina. Terminėse technologijose dažnai pritaikomas ir vandens išpurškimas. Jau tradiciniu galima laikyti vandens išpurškimą oro kondicionavimo sistemų garinimo kameros ar degimo fakele jo temperatūrai reguliuoti.

Pastaruoju metu vis plačiau iškastinį kurą siekiama pakeisti biokuru. Iškyla šalinamų drėgnų biokuro dūmų fazinių virsmų šilumos utilizavimo poreikis. Kondensacinių ekonomizerių technologijose savo vietą randa vandens išpurškimas. Tuomet išryškėja kondensacinio  $Fo \equiv 0 \div Fo_{ko}$  ir nestacionariojo garavimo  $Fo \equiv Fo_{ko} \div Fo_e$  režimų modeliavimo svarba vandens lašelių fazinių virsmų cikle optimaliam šilumos utilizavimo įrenginių darbo režimui apibrėžti. Kondensaciniame fazinių virsmų režime lašelio paviršius pašyla nuo pradinės  $T_0$  temperatūros iki

rasos taško  $T_r$  temperatūros. Fazinių virsmų režimo iš kondensacinio į nestacionariojo garavimo režimą kaitos momentu vandens garo srautas tampa nuliniu, o jo vektorius pakeičia kryptį: link lašelio sklidęs dūmuose buvęs vandens garas, prasidėjęs garavimui, keičiamas nuo lašelio paviršiaus į dūmus sklindančiu išgaravusio vandens garu.

Skaitinio modeliavimo metu fazinių virsmų režimo kaitai būtina skirti išskirtinį dėmesį, kadangi iteracinė skaitinė schema  $Fo \equiv Fo_{ko} \pm \Delta Fo$  intervale gali tapti nestabilia dėl fazinių virsmų srauto  $q_f^{isor} \equiv m_g \cdot L$  ženklo neapibrėžtumo greičiausio nusileidimo metodu veikiančiame iteraciniame cikle. Todėl skaitiniam eksperimentui vykdyti kūrybingai pritaikoma darbe [11] išplėta dvejų etapų eksperimentų metodika, tačiau numatoma papildoma vienodo  $\Delta Fo_i$  žingsnio modeliuojamo fazinių virsmų ciklo režimuose sąlyga. Furje laiko žingsnis apibrėžiamas pirmajame etape modeliuojant kondensacinį fazinių virsmų  $Fo \equiv 0 \div Fo_{ko}$  režimą:  $\Delta Fo_i \equiv Fo_{ko} / (I_{ko} - 1)$ , kai  $I_{ko} = 21$ . Kondensacinio fazinių virsmų režimo  $Fo_{ko}$  trukmę pradžioje tenka spėti ir pirmojo etapo metu nuosekliai tikslinti. Keliamas reikalavimas, jog laiko  $Fo_{i=21}$  momentui vykdomame iteraciniame  $it \equiv 1 \div IT$  cikle apibrėžta lašelio paviršiaus temperatūra  $T_{R,i=21} \equiv T_{J,i,it=IT}$  būtų kiek įmanoma artimesnė rasos taško temperatūrai  $T_r$  ir užtikrintų sklandų perėjimą į nestacionariojo garavimo režimą  $i = 22$  laiko momentu. Kiekviename iteraciniame cikle apibrėžiamai  $T_{J,i,it=IT}$  temperatūrai keliamas reikalavimas, kad šilumos srautų balansas lašelio paviršiuje tenkintų sąlygą:  $|1 - (\bar{q}_\Sigma^{vid} + \bar{q}_f^{is}) / \bar{q}_\Sigma^{is}| \cdot 100\% < 0.02\%$ . Lašelio matmuo iteracinio ciklo metu patikslinamas po kiekvienos iteracijos, todėl apskaičiuojant kitus lašelio šilumos ir masės mainų  $P_{it}$  parametrus taikoma  $R_{it} \equiv R_{it-1}$  prielaida [12].

Išpurškiamo vandens lašelių pradinis  $w_{l,0}$  greitis dažniausiai skiriasi nuo dūmų tekėjimo  $w_d$  greičio, todėl lašeliai dūmų atžvilgiu slysta  $\Delta w_l = |w_d - w_l|$  greičiu. Nors pasipriešinimo jėgų poveikyje lašelių slydimas dūmų srauto atžvilgiu slopsta, tačiau kondensaciniame fazinių virsmų režime vyrauja lašelių konvekcinis šildymas [13]. Slystančio lašelio paviršiuje kylančios jėgos iššaukia priverstinę skysčio cirkuliaciją lašelyje, kurios poveikis šilumos plitimui įvertinamas efektyviuoju šilumos laidžio parametru:  $q_c^{vid} = -k_c \cdot \lambda_l \cdot grad T_R$ . Efektyvusis šilumos laidžio parametras apibrėžiamas Peklė kriterijaus skysčiui funkcija  $k_c = f(Pe_l)$  [7].

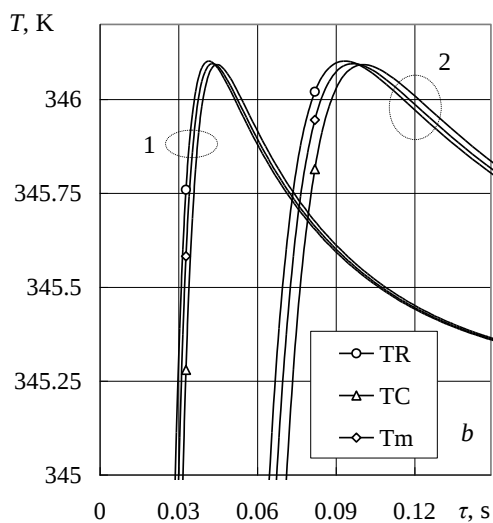
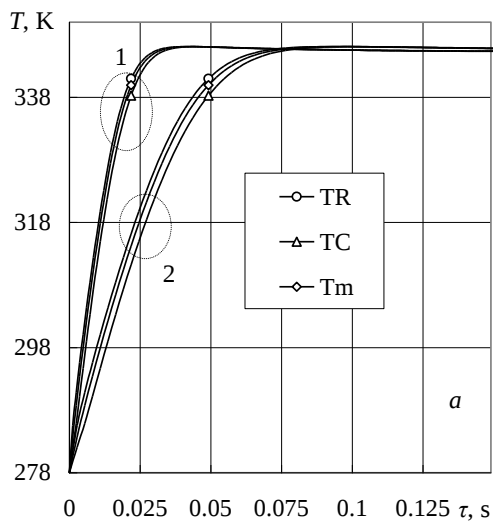
Norint apibrėžti optimalias vandens išpurškimo dūmų šilumos utilizavimo technologijose sąlygas, reikia ištirti vandens lašelių kondensacinio ir nestacionariojo garavimo režimų dėsningumus plačiame kraštinių sąlygų diapazone. Kraštinės

sąlygos apibrėžiamos išpurškiamo vandens ir dūmų srauto parametrais. Pagrindiniais parametrais laikytina vandens temperatūra, lašelių dispersiškumas, dūmų temperatūra ir drėgnumas bei vandens lašelių slydimo pradinis greitis. Vandens temperatūros bei dūmų temperatūros ir jų drėgnumo kitimo diapazonus apibrėžia biokuro deginimo technologijų praktika. Vandens lašelių dispersiškumą apibrėžia dispergatorių parametrai. Lašelių dispersiškumas yra skirtingas. Tai labai išplečia skaitinio eksperimento apimtis. Todėl būtų patrauklu platesniam lašelių dispersiškumo spektrui išplėsti laisvai pasirinkto lašelio fazinių virsmų ciklo modeliavimo rezultatus. Tokia galimybė yra pagrįsta laidumu šildomo lašelio fazinių virsmų ciklo modeliavimo Furje laiko mastelyje atvejui [11], kai kraštinės sąlygos yra apibrėžtos pradiniais vandens ir dujų srauto parametrais. Kyla klausimas: ar galima būtų darbo [11] rezultatus išplėsti dūmuose slystančių lašelių fazinių virsmų ciklui? Tai leistų optimizuoti lašelių fazinių virsmų ciklo modeliavimo procesą ir žymiai sumažinti skaitinio eksperimento apimtis. Nегаруојаnčіо лашеліо шіldуmо ладуmу "k" шіlumоkаітос atvejis tradiciškai apibrėžiamas  $Nu = 2$  sąlyga. Slystančio nегаруојаnčіо лашеліо kоnvekсіnіо шіldуmо іntensyvumas aprašomas empirine išraiška [7]:

$$Nu = 2 + 0.522 Re^{1/2} Pr^{1/3}. \quad (4)$$

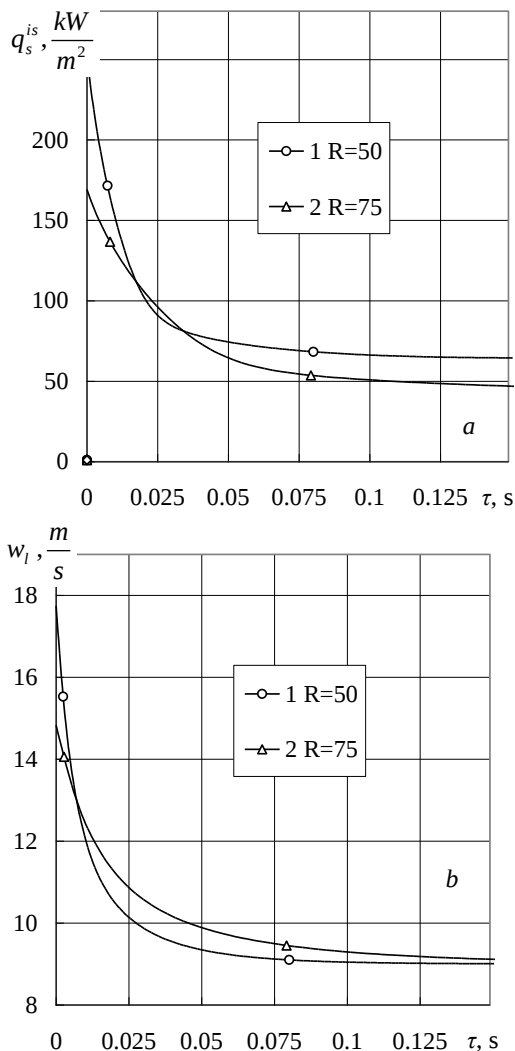
Reinoldso kriterijui (4) išraiškoje apibrėžti pritaikoma modifikuota forma  $Re \equiv 2R\rho_g \Delta w_l / \mu_{gd}$ , kurioje dūmų tankis  $\rho_d \equiv f(T_d)$ , o vandens garo ir dūmų mišinio dinaminės klampos koeficientas  $\mu_{gd} \equiv f(T_{gd})$ , kai  $T_{gd} = T_R + (T_d - T_R)/3$ . Prandtlіо  $Pr = a_{gd} / \nu_{gd}$  kriterіjuje temperatūrinis koeficientas  $a$  ir kinematinės klampos koeficientas  $\nu$  parenkami vandens garo ir dūmų mišiniui pagal  $T_{gd}$  temperatūrą.

Galima pastebėti, jog "k" šilumokaitos sąlygų apibrėžimas  $Nu = 2$  ir  $Re = 0$  sąlygomis yra identiškas. Todėl verta išpurškiamo vandens lašelіus sugrupuoti pagal konkrečiam purkštukui būdingų Reinoldso  $Re$  kriterіjų grupes ir jose esančių lašelių pradinį slydimo іntensyvumą apibrėžti pradinіu  $Re_0$  kriterіjumi. Galima manyti, jog lašelių grupėse terminіų parametрų  $P_{T, Re_0}(Fo)$  funkcіјoms turėtų galіoti jų universalumas lašelių dispersiškumo atveju, kuris yra jau patvirtintas  $P_{T, Re=2}(Fo)$  funkcіјoms. Tam patvirtinti sumodeliuotas  $T_0 = 278$  K temperatūros ішpurkštо vandens slystančių lašelių grupei  $Re_0 = 30$  priskirtų pradinіо  $2R_0 = 100 \cdot 10^{-6}$  ir  $2R_0 = 150 \cdot 10^{-6}$  m skersmens lašelių шіlіmas ir faziniai virsmai  $T_d = 400$  K temperatūros ir  $p = 0.1$  MPa slėgio drėgnų  $\bar{p}_{g, \infty} = 0.3$  dūmų sraute.

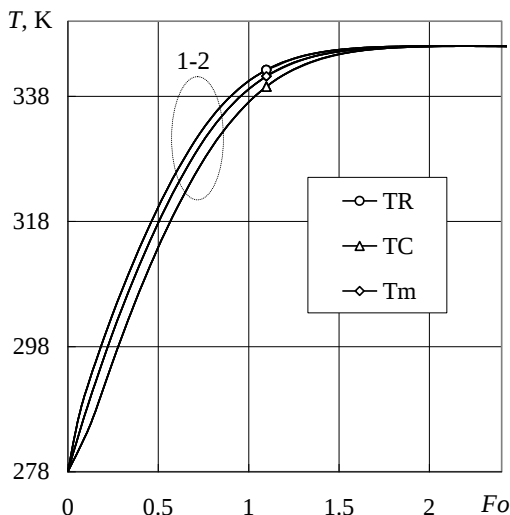


1 pav. Skirtingo skersmens lašelių paviršiaus, centro ir masės vidutinės temperatūrų  $T_R(\tau)$ ,  $T_C(\tau)$  ir  $T_m(\tau)$  funkcijų grafikai nestacionariųjų fazinių virsmų režime (a) ir nestacionariojo garavimo baigiamojame ir pusiausviros garavimo pradinėje stadijose (b).  $R_0 \cdot 10^6$ , m: (1) 50, (2) 75

Apskaičiuotųjų skirtingo skersmens lašelių paviršiaus, centro ir masės vidutinės temperatūrų kitimą aprašančių  $T_R(\tau)$ ,  $T_C(\tau)$  ir  $T_m(\tau)$  funkcijų grafikai yra ryškiai saviti (1 pav.). Paveiksle 1 pav. *a* taškai nurodo lašelio terminę būseną fazinių virsmų režimo iš kondensacinio į nestacionarųjį garavimą kaitos momentu. Tuomet lašelių paviršius būna pašilęs iki  $T_R(\tau \equiv \tau_{ko}) \equiv T_{rt} = 342.28$  K temperatūros. Nestacionariojo garavimo metu lašeliai pašyla iki pusiausviro garavimo temperatūros  $T_e \approx 346.1$  K temperatūros. Fazinių virsmų režimo iš nestacionariojo garavimo į pusiausviro garavimo režimą kaitos momentą apibrėžia  $T_R(\tau)$ ,  $T_C(\tau)$  ir  $T_m(\tau)$  funkcijų grafikų susikirtimo taškas (1 pav. *b*), nurodantis artimą izoterminei lašelio terminę būseną. Ji pasiekama lašelio paviršiniams sluoksniams nestacionariojo garavimo pabaigoje pradėjus aušti, o centriniams sluoksniams dar šylant. Pusiausviro garavimo režime vanduo pradeda aušti visame lašelio tūryje, tačiau paviršiniai lašelio sluoksniai aušta sparčiau (1 pav. *b*). Prielaidas vandeniui aušti sudaro silpnėjantis lašelio konvekcinių šildymo intensyvumas (2 pav. *a*) lašelių slydimui dūmuose slopstant (2 pav. *b*). Taigi, lašelio terminės būsenos kitimas realiu laiku stipriai priklauso nuo lašelio dispersiškumo. Terminių parametrų  $P_T(\tau)$  funkcijas galima lengvai transformuoti į Furje kriterijaus laiko mastelį. Tačiau reikia įvertinti, jog Furje kriterijaus ir realaus laiko mastelius susiejantis  $a_0 / R_0^2$  daugikliai priklauso nuo lašelių dispersiškumo ir šiuo atveju yra 55.5728 ir 23.8098, kai lašelio pradinis  $2R_0$  skersmuo yra 100 ir 150 mikrometrų atitinkamai. Realaus laiko mastelį pakeitus Furje kriterijaus universalaus laiko masteliu, lašelio terminių parametrų kitimą apibūrinančių  $P_T( Fo )$  funkcijų grafikai tampa nejautrūs lašelių dispersiškumui (3 pav.). Tampa aišku, jog nestacionariojo temperatūros lauko  $T(\eta, Fo)$  funkcijos grafikas taip pat yra nejautrus lašelių dispersiškumui (4 pav.).



2 pav. Skirtingo skersmens slystančių lašelių konvekcinio šildymo intensyvumo kitimas (a) ir slydimo dūmų atžvilgiu kitimas (b) nestacionariųjų fazinių virsmų režimu ir pusiausviro garavimo pradinėje stadijoje realaus laiko mastelyje.  $R_0 \cdot 10^6$ , m: (1) 50, (2) 75;  $q_{c,0}^{is}$ ,  $\frac{kW}{m^2}$ : (1) 253.8, (2) 169.2;  $w_{l,0}$ , m/s: (1) 17.75, (2) 14.83;  $w_d = 9$  m/s

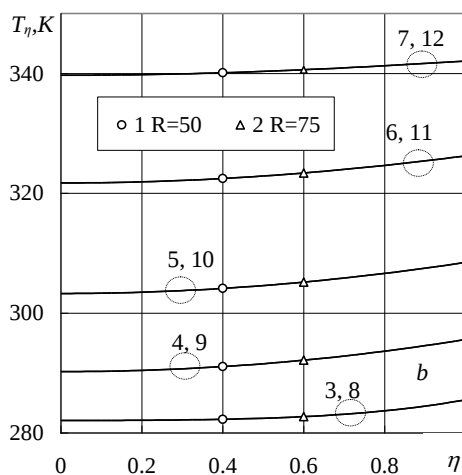
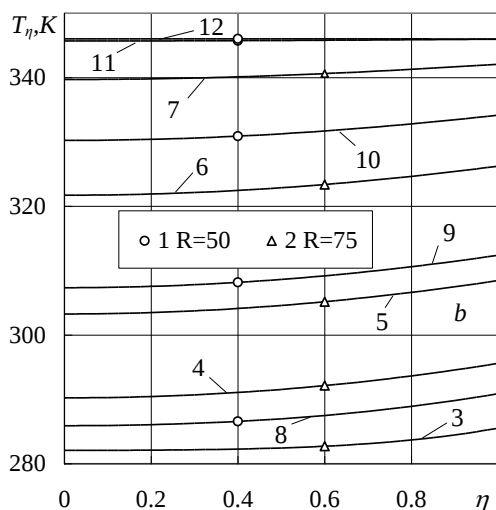


3pav. Skirtingo skersmens lašelių paviršiaus, centro ir masės vidutinės temperatūrų  $T_R(Fo)$ ,  $T_C(Fo)$  ir  $T_m(Fo)$  funkcijų grafikai nestacionariųjų fazinių virsmų režimu ir pusiausviros garavimo pradinėje stadijoje

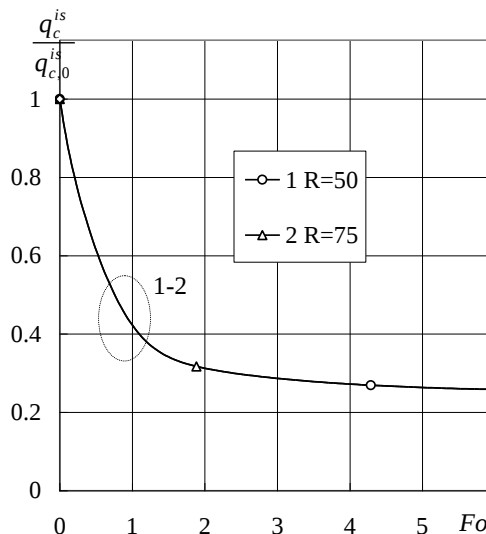
Realiam laike skirtingo stambumo lašeliai šyla sparčiau (4 pav. a), tačiau jų šilimo dinamika Furje laiko mastelyje tampa identiška (4 pav. b).

### Apibendrinimas.

Vandens  $T_0$  temperatūra, dūmų  $T_d$  temperatūra bei  $\bar{p}_{v,\infty}$  drėgnumu ir pradiniu Reinoldso  $Re_0$  kriterijumi apibrėžtais atvejais lašelio terminių parametrų kitimą aprašančioms lašelių dispersiškumui nejautrioms  $P_T(Fo)$  funkcijoms sudaryti pakanka sumodeliuoti laisvai pasirinkto skersmens lašelio fazinių virsmų ciklą. Pagal jo modeliavimo rezultatus pakanka parinktais Furje kriterijaus  $Fo_{if}$  momentais apibrėžti lašelio terminio parametrų santykinius  $\bar{P}_{T,Fo_f} \equiv P_T(Fo \equiv Fo_{fi}) / P_{T,0}$  pokyčius ir pagal juos apibrėžti lašelių terminius  $P_T(\tau \equiv \tau_{if})$  parametrus realaus laiko mastelyje dominančiam lašelių dispersiškumo spektrui, atsižvelgus į individualų Furje kriterijaus ir realaus laiko mastelius susiejantį  $a_0 / R_0^2$  daugiklį.



4 pav. Nestacionariojo temperatūros lauko  $T(\eta, \tau)$  funkcijos grafiko priklausomumas nuo lašelių dispersiškumo (a) funkcijos  $T(\eta, Fo)$  grafiko universalumas.  $R_0 \cdot 10^6$ , m: (1) 50, (2) 75. Šildymo laikas  $\tau$ , s: (3, 8) 0.0273, (4, 9) 0.00819, (5, 10) 0.0164, (6, 11) 0.035, (7, 12) 0.0519; Furje kriterijus  $Fo$ : (3, 8) 0.065, (4, 9) 0.195, (5, 10) 0.39, (6, 11) 0.715, (7, 12) 1.235



5 pav. Konvekcinės šilumos srauto bematės  $\bar{P}_q \equiv q_c^{is} / q_{c,0}^{is}$  formos

$\bar{P}_q(Fo) \equiv q_c^{is}(Fo) / q_{c,0}^{is}$  grafiko universalumas.

Svarbu yra tai, jog universalias lašelių dispersiškumo atžvilgiu funkcijas galima sudaryti visiems pagal  $Re_0$  kriterijų sugrupuotų lašelių šilumos ir masės mainų parametrams. Tačiau tik terminiams parametrams egzistuoja dimensinės formos universalios  $P_T(Fo)$  funkcijos. Kitiems, ne terminiams lašelio parametrams, universalios funkcijos egzistuoja tik bematėje formoje. Tai patvirtina energinio parametro  $P_q \equiv q_c^{is}$  (2 pav. a) bematės  $\bar{P}_q \equiv q_c^{is} / q_{c,0}^{is}$  formos  $\bar{P}_q(Fo) \equiv q_c^{is}(Fo) / q_{c,0}^{is}$  grafiko universalumas (5 pav.).

### Literatūra

1. Sazhin S.S. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006. Vol. 32: 162–214.
2. Kuzikovskij A. V. Dynamic of spherical particle in powerful optical field, *Izv. VUZ Fizika*, 1970. No. 5: 89–94.
3. W.A. Sirignano, *Dynamics and transport processes of sprays*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
4. Tuntomo A.; Tien C.L.; Park S.H. Internal distribution of radiant absorption in a spherical particle, *J. Heat Transfer*, 1991. Vol. 113: 407–412.

5. Tseng C.C.; Viskanta R. Enhancement of water droplet evaporation by radiation absorption, *Fire Safety J.*, 2006. Vol. 41: 236–247.
6. Miliauskas G. Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001. Vol. 44: 785–798.
7. Sazhin S. Modeling of heating, evaporation and ignition of fuel droplets: combined analytical, asymptotic and numerical analysis, *Journal of Physics: Conference Series*, 2005. Vol. 22: 174–193.
8. Abramzon B., Sirignano W. A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1989. Vol. 32: 1605–1618.
9. Maziukienė M., Miliauskas G. Vandens lašelių fazinių virsmų ciklo skaitinio modeliavimo iteracinės schemos optimizavimo savitumai, *Šilumos energetika ir technologijos* - 2014 [elektroninis išteklius]. 2014: 113-122.
10. Miliauskas G., Sabanas V., Bankauskas R., Miliauskas G., Sankauskaitė V. The peculiarities of sprayed liquid's thermal state change, as droplets are heated by conduction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008. Vol. 51:4145–4160.
11. Miliauskas G. Grynojo skysčio lašelių fazinių virsmų režimų universalusis ciklas. 1. Ciklo sudarymo metodas ir pernašos procesų skaitinio modeliavimo metodika, *Energetika*. 2014. Vol 60-2: 77–95.
12. Miliauskas G.; Maziukienė M. Modelling of heat and mass transfer processes in phase transformation cycle of sprayed water into gas. 1. The calculation peculiarities of droplet phase transformation parameters, *Mechanics*, 2014. Vol. 6: 550-558.
13. Miliauskas G.; Maziukienė M. Modelling of heat and mass transfer processes in phase transformation cycle of sprayed water into gas. 2. Phase transformation peculiarities of a droplet heated up by convection in humid gas flow, *Mechanics*, 2015. Vol. 2: 123-128.

## Optimization of droplet task numerical research in aspect of droplet thermal parameters

### Summary

An unsteady phase transformation cycle was modelled in Reynolds  $Re_0 = 30$  group for water droplets that is slipping in humid smoke flow. Universality of droplet thermal parameters  $P_T(Fo)$  functions graphs was based on in aspect of droplets dispersity.

## Aliuminio ir aliuminio oksido priedų įtaka autopolimerizacinės polimetilmetakrilato plastmasės šilumos laidžiui

Adolfas Jančauskas\*, Marija Buinevičiūtė\*\*

\*Kauno technologijos universitetas, \*\*Lietuvos sveikatos mokslų universitetas

**Įvadas.** Polimetilmetakrilatas (toliau – PMMA) – tai akrilinės dervos pagrindo plastikas, itin dažnai naudojamas odontologijoje plokšteliniams protezams gaminti. PMMA pasižymi pagrindinėmis odontologijoje naudojamų medžiagų charakteristikomis, t. y. yra beskonė, bekvapė, netoksiška, nedirginanti burnos audinių, estetiška, lengva, nebrangi, nesudėtingai koreguojama [1].

Odontologijoje pastaraisiais dešimtmečiais buvo analizuojamas pacientų komfortas dėvint akrilinės dervos pagrindo plokštelines protezus [2] Buvo pastebėti žmogaus terminiai jutimų sutrikimai, siejami su suprastėjusiais pojūčiais valgant. Ištirta, kad plokšteliniams protezams gaminti naudojamos medžiagos pasižymi mažu šiluminiu laidžiu. Pacientas sunkiai jaučia temperatūros pokyčius gomurio srityje. Aukštas šiluminio plėtimosi koeficientas sąlygoja vidinius tempimo pokyčius ir deformacijas.

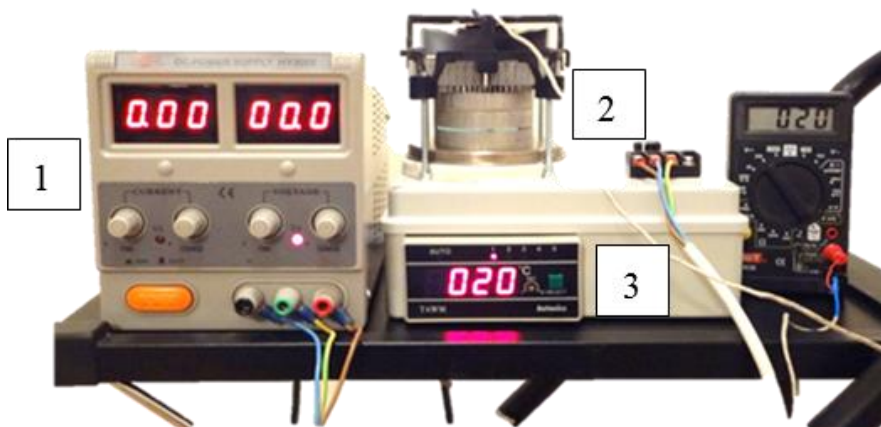
Praktikoje šią problemą stengiamasi išspręsti keliais būdais [3]: 1) pridendant priedų į medžiagą, 2) chemiškai pakeičiant medžiagos struktūrą, 3) ieškoma alternatyvių medžiagų. Paprasčiausia ir pigiausia išeitis yra priedai. Straipsnyje [3] pateikiami autopolimerizacinio polimetilmetakrilato plastiko šiluminio laidžio matavimai, įterpiant tam tikrą dalį aliuminio ir aliuminio oksido priedų.

**Tyrimo metodika.** Autopolimerizacinių polimetilmetakrilato plokštelių šiluminiui laidžiui nustatyti buvo panaudotas šiam tikslui pagamintas tyrimo standas (1 pav.), kuriame šilumos laidžio koeficientas nustatomas palyginimo metodu [4].

Šilumos laidžio koeficiento nustatymas atliekamas palyginant žinomo šilumos laidžio medžiagos laidį su tiriamosios medžiagos šilumos laidžiu. Tyrimas pagrįstas tuo, kad per į paketą sudėtas plokšteles prateka vienodo dydžio šilumos srautas. Vienos iš pakete esančių medžiagų šilumos laidžio koeficientas turi būti žinomas, pvz., stiklo. Stiklo ir tiriamosios medžiagos plokštelės yra plonos, todėl jų paviršių temperatūras iš abiejų plokštelių pusių pamatuoti yra techniškai sudėtinga. Tuo tikslu, tarp kaitintuvo ir žinomo laidžio plokštelės, tarp šios ir tiriamosios plokštelės bei už tiriamosios plokštelės įdėtos aliuminio plokštelės. Kadangi aliuminis yra šimtus kartų laidesnis šilumai už žinomo laidžio ir tiriamos medžiagos plokšteles, pakanka pamatuoti aliuminio plokštelių temperatūras, nes jos atitiks (su labai maža paklaida) tų paviršių temperatūras, su kuriomis jos susiliečia.

Tyrimuose naudotas standas susideda iš: elektrinio maitinimo bloko 1; plokštelių paketo 2, kurį sudaro kaitinimo elementas, aliuminio plokštelės ir tarp jų sudėtos stiklo ir tiriamosios medžiagos plokštelės, ir aušintuvas su ventiliatoriumi

paketo viršuje; temperatūrų matavimo sistemos, susidedančios iš K tipo termoporų ir matavimo prietaisų 3.



1 pav. Tyrimo stendas šilumos laidžio koeficientui nustatyti palyginamuoju metodu

Šilumos srautas tiriamojoje plokštelėje išreiškiamas iš Furjė šilumos laidžio dėsnio lygtimi:

$$\lambda_d = \lambda_z * [(T_1 - T_2) * \sigma_d] / [(T_2 - T_3) * \sigma_z] \quad (1)$$

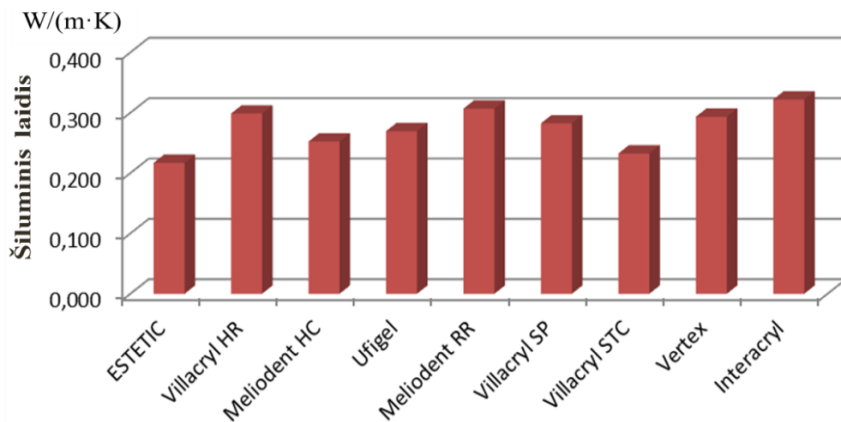
čia:  $T_1, T_2, T_3$  – aliuminio plokštelių temperatūros: tarp kaitintuvo ir žinomo laidžio plokštelės  $T_1$ , tarp žinomo laidžio ir tiriamos plokštelės  $T_2$ , tarp tiriamos plokštelės ir aušintuvo  $T_3$ , K;  $\lambda_z$  – žinomo laidžio plokštelės šilumos laidžio koeficientas, W/mK;  $\sigma_z$  – žinomo laidžio plokštelės storis, nustatomas pamatuojant plokštelę mikrometru, m.

Stiklo šilumos laidžio koeficientas apskaičiuojamas pagal priklausomumą:

$$\lambda_e = 0,74 + 0,001 * (T_m - 273,5) \quad (2)$$

čia:  $T_m = 0,5 * (T_2 + T_3)$  – vidutinė stiklo skritinio temperatūra.

**Tyrimo rezultatai ir analizė.** Pirmuoju bandymų etapu buvo tirtos dažniausiai odontologijoje naudojamos polimetilmetakrilato plokštelės. Apskaičiuoti devynių skirtingų bazinių medžiagų plokštelių šiluminiai laidžiai. Jų šiluminiai laidžiai pateikiami grafiškai (2 pav.).



2 pav. Įvairių protezinių PMMA plastikų šiluminio laidžio palyginimas

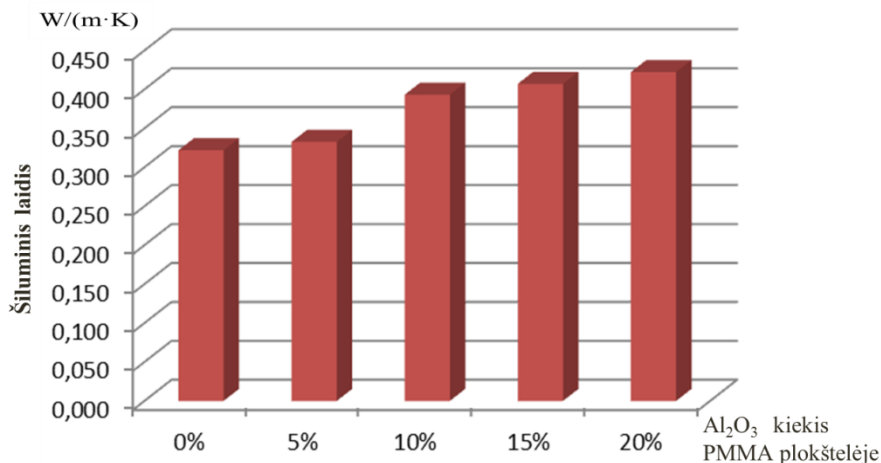
Matome, kad visų protezų gamyboje naudojamų plastmasių šilumos laidžiai svyruoja nežymiai, t. y. nuo 0,217 iki 0,322 W/(m K). Šiluminiui laidžiui gerinti parinktas didžiausią šiluminį laidį turintis autopolimerizacinio (savaiminio kietėjimo) polimetilmetakrilato plastikas Interacryl® (gamintojas Intertend, Slovėnija).

Į Interacryl® polimetilmetakrilato plokštelę buvo įmaišyta 5 %, 10 %, 15 %, 20 % pagal masę aliuminio oksido. Aliuminio oksido frakcijos dydis – 50  $\mu\text{m}$ . 1 lentelėje pateikiami kiekvienos plokštelės charakteringi duomenys ir išmatuoto šiluminio laidžio rezultatai.

1 lentelė. Polimetilmetakrilato plokštelė su aliuminio oksidu

|                                                                                     | PMMA Plokštelė su aliuminio oksidu pagal masę | T <sub>1</sub> , °C | T <sub>2</sub> , °C | T <sub>3</sub> , °C | Storis, mm | Šiluminis laidis, W/(m·K) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|---------------------------|
|  | 0 %                                           | 58,0                | 51,0                | 20,0                | 1,91       | 0,322                     |
|  | 5 %                                           | 58,0                | 51,0                | 21,0                | 1,91       | 0,333                     |
|  | 10 %                                          | 58,0                | 50,0                | 21,0                | 1,89       | 0,393                     |
|  | 15 %                                          | 58,0                | 50,0                | 22,0                | 1,90       | 0,407                     |
|  | 20 %                                          | 58,0                | 50,0                | 23,0                | 1,89       | 0,422                     |

Kaip matome iš 1 lentelės, didinant Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> procentinį kiekį, plastiko spalva šviesėja, t. y. daro įtaką plokštelės estetiniam vaizdui. Nepaisant to, didinant aliuminio oksido kiekį, tendencingai didėja ir plokštelės šiluminis laidis. Gauti rezultatai pavaizduoti grafiškai 3 pav.



3 pav. PMMA plokštelių šiluminio laidžio priklausomumas nuo jose esančio aliuminio oksido kiekio

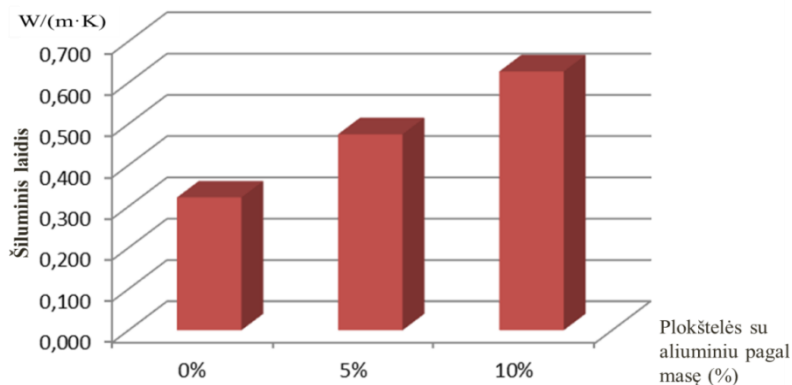
Gauti rezultatai rodo, kad įmaišius į polimetilmetakrilato plokštelę aliuminio oksido, jos laidumas didėja apie 30 %, kai aliuminio oksido dalis siekia 20 %.

Sekančiame tyrimų etape į PMMA plastmasę buvo įmaišyta metalinio aliuminio (aliuminio pudros), atitinkamai 5 % ir 10 % pagal masę ir matuoti šiluminiai laidžiai. Duomenys ir rezultatai pateikiami 2 lentelėje.

2 lentelė. Polimetilmetakrilato plokštelės su aliuminio pudra

|                                                                                     | PMMA Plokštelė su aliuminio pudra pagal masę | T <sub>1</sub> , °C | T <sub>2</sub> , °C | T <sub>3</sub> , °C | Storis, mm | Šiluminis laidis, W/(m·K) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|---------------------------|
|  | 0 %                                          | 58,0                | 51,0                | 20,0                | 1,89       | 0,322                     |
|  | 5 %                                          | 58,0                | 49,0                | 22,0                | 1,89       | 0,475                     |
|  | 10 %                                         | 58,0                | 47,0                | 22,0                | 1,90       | 0,627                     |

Ištyrus polimetilmetakrilato plokštes su skirtingais kiekiais aliuminio oksido, buvo gauti rezultatai, pavaizduoti 4 pav.



4 pav. PMMA plokštelių šiluminio laidžio priklausomumas nuo jose esančio aliuminio pudros kiekio

Visų tirtų plastmasių šiluminiai laidžiai tarpusavyje skyrėsi nereikšmingai. Plastmasės su aliuminio oksido skirtingomis koncentracijomis šiluminiai laidžiai pavaizduoti 4 pav. Šiluminis laidis pagerėjo 30 proc. Spalvos pokyčiai buvo matomi akimi, tačiau toleruojami. Plastmasės su aliuminio pudra skirtingomis koncentracijos šiluminiai laidžiai pavaizduoti 5 pav.

Šilumos laidis su 10 % aliuminio priedu padidėjo beveik dvigubai – iki 0,6 W/mK. Tačiau spalvos pokyčiai buvo dideli jau nuo 5 % aliuminio priedo. Pokyčiai tiek dideli, kad negalėtų būti toleruojami dėl estetinių priežasčių.

### Išvados

1. Bazinių akrilinių medžiagų, skirtų dantų plokšteliniams protezams gaminti, šilumos laidžiai skiriasi nežymiai, t. y. sudaro nuo 0,217 iki 0,322 W/(m K).
2. Įmaišius į PMMA plokštelę 20 % pagal masę aliuminio oksido, jo medžiagos laidumas pagerėjo 30 % ir įtakos plokštelės estetiniam vaizdui – atspalviui šis kiekis beveik neturi.
3. Įmaišius į PMMA plokštelę 10 % pagal masę metalinio aliuminio, jo šiluminis laidis pagerėja net 95 %, tačiau estetiniu požiūriu medžiaga yra netinkama naudoti.

### Literatūra

1. Shah J, Bulbule N, Kulkarni S, Shah R, Kakade D. Comparative Evaluation of Sorption, Solubility and Microhardness of Heat Cure Polymethylmethacrylate Denture Base Resin & Flexible Denture Base Resin, 2014; 8(8): ZF01–ZF04.
2. Soygun K, Bolayir G, Boztug A. Mechanical and thermal properties of palyamide vs reinforced PMMA denture base materials, 2013; 5(2): 153–160

3. Chaijareenont P, Takahashi M. Effect of different amounts of 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane on the flexural properties and wear resistance of alumina reinforced PMMA, 2012; 31(4):623-8.
4. Adomavičius A, Balčius A, Gudzinskas J, Miliauskas G, Šinkūnas S. Šilumos laidumo tyrimo laboratorinis darbas, KTU, Šilumos ir atomo energetikos katedros. Mokomosios termodinamikos laboratoriniai darbai. 2012. p. 42.

### **Effect of different amounts of alumina and aluminium oxide on thermal conductivity of autopolymerized denture base resin**

#### **Summary**

This article provides an overview of the possibilities of increasing a PMMA plastics thermal conductivity by using different materials, such as alumina and aluminium oxide. In order to see the changes of thermal characteristics a thermal conductivity determination device was used. The results showed that both materials alumina and aluminium oxide increased the denture thermal conductivity. 10% aluminium oxide to PMMA plastic increased the thermal conductivity by 22%. Increasing the amount of alumina showed even better results, as 10% of alumina increased the thermal conductivity by 95%.

## Исследование влияния высоты слоя миникольцевой насадки на гидравлическое сопротивление

Элеонора Хачян, Александр Пушнов, Андрей Соколов

Насадочные контактные устройства, используемые в качестве инструмента интенсификации процессов переноса тепла и массы на границе раздела фаз и вблизи нее путем развития поверхности контакта и улучшения перемешивания потоков, используются в тепло-массообменных процессах, нашедших себе широкое применение в промышленности.

К числу процессов, используемых в наибольших масштабах, относятся абсорбция, ректификация и испарительное охлаждение воды [3].

Миникольцевые насадки обеспечивают возможность для увеличения нагрузок по газу и жидкости в технологических аппаратах [1,2]. Разработанная в МГМУ новая конструкция миникольцевой насадки типа УКН, выполнена из полипрена толщиной листа 0,2 мм. Геометрические характеристики испытанной насадки типа УКН представлены в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические характеристики насадки типа УКН.

| Размер насадки, мм | Удельная поверхность $a$ , $\text{м}^2/\text{м}^3$ | Порозность $\epsilon$ , $\text{м}^3/\text{м}^3$ | Количество элементов насадки в $1 \text{ м}^3$ , шт | Эквивалентный диаметр $d_e$ , м |
|--------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------|
| 50×10×0.2          | 53.25                                              | 98.2                                            | 35031                                               | 7.37                            |



Рис 1. Стенд с насадкой

Испытания сухой насадки проводили на стенде в аппарате  $D = 200$  мм. Высоту насадки изменяли в пределах (50–150) мм с шагом 50 мм. Скорости воздушного потока в аппарате изменяли в пределах (0,3–0,8) м/с, что соответствует вязкостному режиму течения в аппаратах с насадкой.

Опытный стенд и вид сверху на аппарат с испытанной насадкой показан на фото (см. Рис 1).

Результаты опытов представлены на графиках в виде зависимостей  $\Delta P = f(w_0)$  (рис. 2) и  $\Delta P_H = f(w_0)$  (рис. 3):

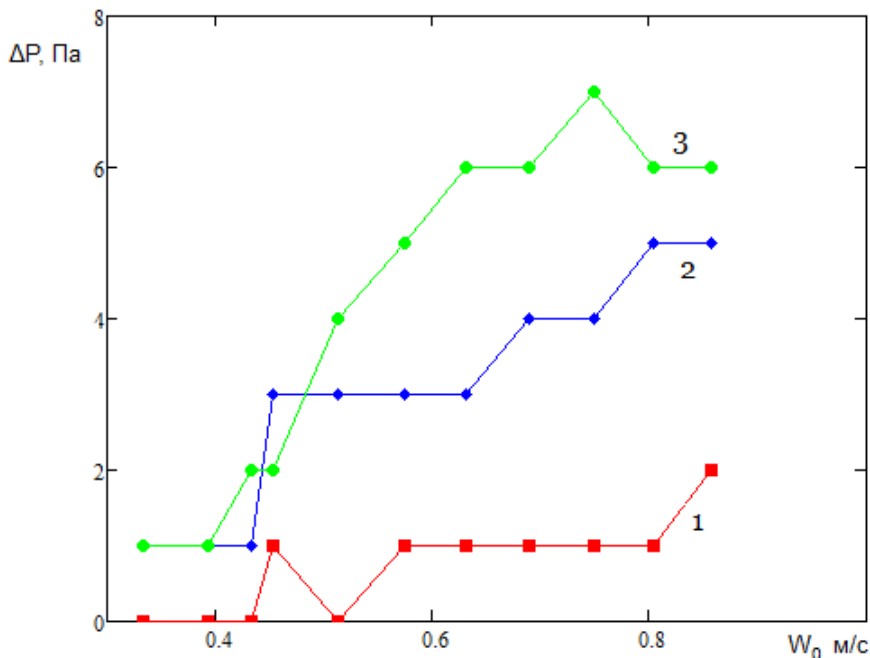


Рис 2. Зависимость потери напора в слое насадки от скорости газового потока при различных высотах слоя насадки ( $H$ ): 1 –  $H = 55$  мм; 2 –  $H = 105$  мм; 3 –  $H = 135$  мм

Из графиков видно, что при увеличении высоты слоя насадки её сопротивление возрастает.

Обобщение полученных результатов проводили в виде уравнения:

$$\Delta P = \xi \cdot (H \cdot w_0)^2 \cdot \rho_g \cdot a_8 \cdot \epsilon_2 \quad (1)$$

где:

$\xi$  - коэффициент сопротивления при прохождении газа через слой насадки;

$H$  - высота слоя насадки, м;

$\rho_g$  - плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\omega_0$  - скорость газа в расчете на полное сечение пустого аппарата, м/с;

$a$  - удельная поверхность насадки, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;

$\varepsilon$  - порозность, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

В результате обработки опытных данных получено, что зависимость удельного сопротивления сухой насадки типа УКН от фиктивной скорости газа в расчете на полное сечение пустого аппарата описывается уравнением:

$$\Delta P = A \cdot (\omega_0)^n \quad (2)$$

где  $A = 107$ ;  $n = 2.56$ .

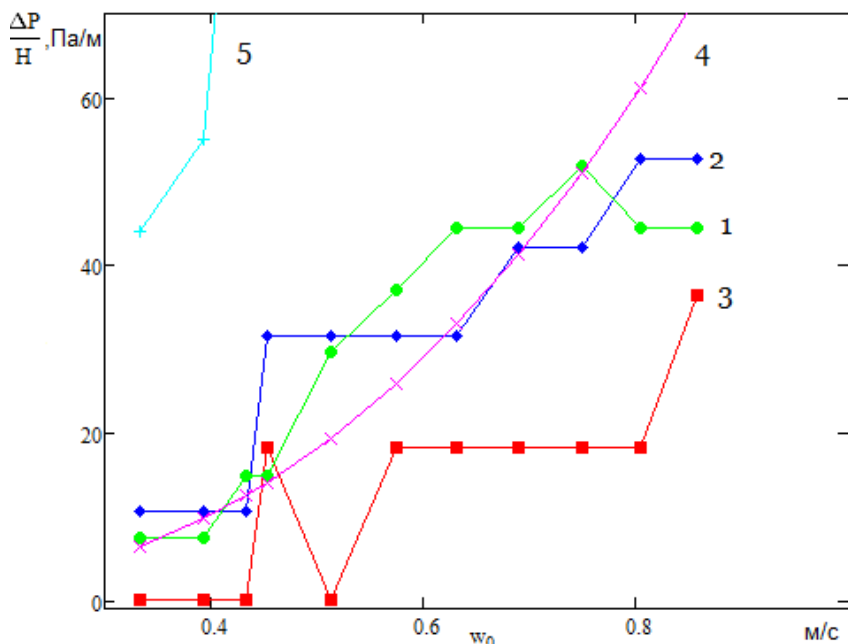


Рис 3. Зависимость относительной потери напора в слое насадки от скорости газового потока в слое насадки различной высоты. Обозначения аналогичны на Рис 2.: 4 – расчет по уравнению (2), 5 – испытание регулярной насадки конструкции Петрашовой Е. Н. [4]

Представленные результаты могут быть использованы при расчете гидравлического сопротивления перспективных миникольцевых насадок в вязкостном режиме течения в скрубберных аппаратах при осуществлении экологической очистки дымовых газов от углекислого газа.

### Литература:

1. Пушнов А.С., Соколов А.С., Сидельников И.И., Курбатова Е.А., Митрофанова Е.Г. Гидродинамика миникольцевых насадок из полимерного материала. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2014, № 5, с.40-42
2. Чиж К.В., Пушнов А.С., Беренгартен М.Г. Структура укладки миникольцевых насадок в колонных аппаратах. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2014, № 4, с.23-26
3. Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушнов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных теплообменников аппаратов. Монография. Под ред. Лаптева А.Г., Казань: Отечество, 2013 г., 454 с. С.14
4. Петрашова Е.Н. Совершенствование насадок для сепарации капель в контактных аппаратах. Автореферат на соискание ученой степени ктм. М.: МГУИЭ, 2010 г.

### Investigation of the effect of the mini-ring packings bed height on hydraulic resistance

#### Summary

Results of an experimental study of the effect of the height of the bulk layer of the new type mini-ring packings on the hydraulic resistance of the column unit are presented. The results presented as a drawing and approximated by equation.

## Experimental investigation of heat and mass transfer during natural convection on a horizontal cylinder confined by vertical walls

Roman Neilo

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”

**Abstract.** This paper presents results of experimental work on investigation of heat and mass transfer during natural convection around a horizontal cylinder confined by vertical walls. Smoke visualization technique was used for determination of mass transfer characteristics.

### 1. Introduction

Natural convection heat transfer from a horizontal cylinder is a widely used practice in heat transfer. Very often, such cylinder is placed in special constructive surroundings, which can drastically change fluid flow and heat transfer characteristics. In general, for a horizontal cylinder, these conditions can be divided into vertical and horizontal confining (parallel or perpendicular to the direction of gravitational acceleration). Horizontal confining has several important additional effects occurring when heat plume from hot cylinder is placed between vertical walls. Buoyancy effects in this situation lead to conditions similar to forced convection inside a vertical channel (between vertical walls). In this way, heat transfer coefficient can be increased.

Despite of many practical applications and a noticeable heat transfer effect, many aspects of such process have not been described [1, 2, 3]. For example, there are almost no investigations of the influence of a narrow channel (when channel width ( $W$ ) is twice smaller than the cylinder diameter ( $d_w$ ) –  $W < 2.0 \times d_w$ ), temperature gradient ( $\Delta T = T_w - T_{amb}$  when it is more than 30C:  $\Delta T \geq 30$  °C); many investigations were based on a small cylinder diameter ( $d_w \leq 9.0$ mm). Moreover, there are no visualization results, which would show the changes in mass transfer characteristics; however, many investigators explain the increase of the heat transfer coefficient by such changes.

All of these points of view helped to complete main tasks for the experimental investigation: studying a heat transfer characteristic of horizontal cylinder ( $d_w \geq 10.0$  mm) confined by vertical walls of a narrow channel (with changeable width and height), additionally, making a visualization investigation and underlining changes in mass transfer characteristics.

## 2. Experimental setup

Experimental setup is schematically shown in Fig. 1. The experimental facility consisted of a vertical channel, where horizontal cylinders were placed inside. The cylinder was electrically heated, and electricity power was measured by a wattmeter. Inside the cylinder wall, one thermocouple was mounted, which indicated the cylinder wall temperature. Walls of the channel were made of plastic glass, which allowed taking photos and making video records during the visualization.

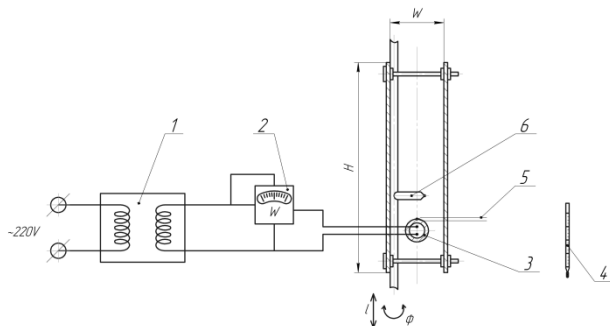


Fig. 1. The experimental facility: 1 – current changer; 2 – wattmeter; 3 – experimental tube; 4 – thermometer of ambient temperature; 5 – thermocouple of the cylinder wall temperature; 6 – probe of flow field temperature

Smoke visualization technic was used for mass transfer investigation. Experimental results of the validation stage were reported in [4, 5, 6].

## 3. Results. Visualization of mass transfer

In Fig. 2a, the results of visualization without heat flux ( $q_w = 0$ ) are presented. These results are the same as those obtained in free volume [4, 6].

In Fig. 2b and c experimental results with  $q_w = idem$  are presented. It is clearly seen that the buoyancy effect inside the channel leads to a more intensive flow motion, compared with free volume conditions. One can see that fluid flow separates from the cylinder wall before its upper edge; in the aft part of the cylinder, two vortices are placed. Such results indicate that the overall heat transfer condition should be described as mixed convection [7]. Changes in fluid motion depend on geometric characteristics of the channel. According to the experimental results, when  $W = 4d_w$  flow rate decreases, and flow characteristic back to the such one, which was obtained in free volume condition. On the other side, step-by-step decreasing of the channel width allowed receiving a characteristic, which was not

described in literature before: during investigation with minimal channel width ( $W = 1.1 \cdot d_w$  and  $W = 1.2 \cdot d_w$  (for  $d_w = 22\text{mm}$ )), a capsizes was obtained. It had several stages, which changed cyclically: the beginning of the cycle can be described as a slow upward moving with almost no vortices observed.

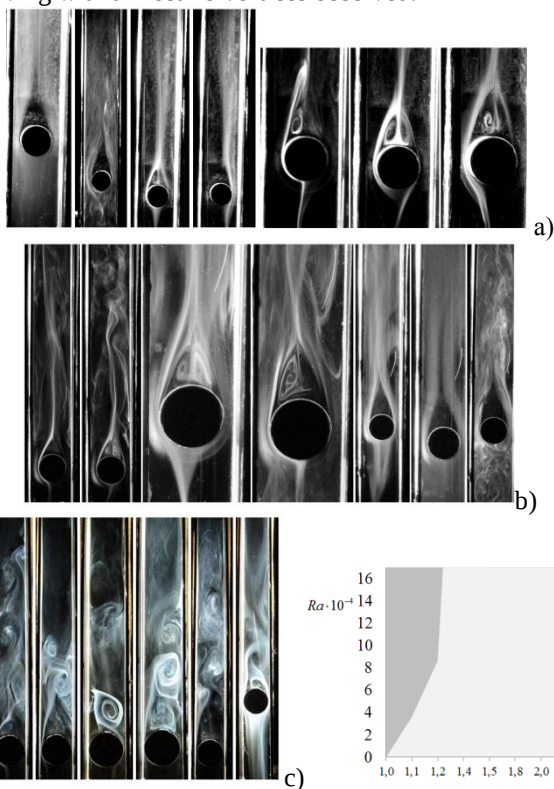


Fig. 2. Visualization results: a)  $W = 1.8 \cdot d_w$ ,  $Ra = 1.3 \cdot 10^5$ ; b)  $W = 1.5 \cdot d_w$ ,  $Ra = 1.5 \cdot 10^5$ ; c)  $W = 1.2 \cdot d_w$ ,  $Ra = 1.6 \cdot 10^5$ ; d) behaviour map of heat and mass transfer processes around horizontal cylinder in vertical slot depending on Rayleigh ( $Ra \cdot 10^{-4}$ ) and channel width ( $W/d_w$ ): ■ – invariance area; ■ – area of capsizes; □ – area of great depending heat transfer coefficient from the channel width.

Fluid slowly moved through the narrowest part of the channel and went almost strictly vertically up.

After some time in a certain area along the output end, a fast outflow occurred, and it was replaced by cold fluid start in the opposite part of the output section (at the same time). The intensity of such outflow is great, so it causes pressure gradient,

which draws cold fluid inside the channel. This downward moving is also very intensive, and it drops deeply into the channel close to the cylinder level. On the way, this cold fluid “washes” all of the previously existing construction (almost the entire smoke volume) making many vortices. After this step, hot fluid is absent; all the motion stops in the upper part of the channel. After a short period, fluid becomes hotter due to heat transfer, and a slow upward motion begins. It is the start point of the next cycle. All the images in Fig. 2c represent individual stages, which were described. One more special feature was observed: hydraulic resistance of midsection of cylinder in the channel is so high that any fluid disturbances in the upper part do not penetrate into the lower part, where motion continues to be slow and laminar. Average duration of the cycle is between 50 and 90 seconds.

According to such results, capsizing effects were additionally investigated. Quantitative correlation from Rayleigh number ( $Ra = g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot d_w^3 / \nu^2$ ) and channel width was observed. Based on such data, behaviour map was proposed (Fig. 2d). There are several specific areas: invariance area – channel walls do not affect heat and mass transfer processes; area of capsizing – there sustainable circulation through the channel is periodically broken; and area of great depending – there heat and mass transfer processes completely depend on channel sizes. The last area is limited by other ones; in general, there are higher heat and mass transfer characteristics, compared to free volume and other area cases. At the smallest height of the channel, the registered capsizing effect was  $H = 16.9 \times d_w$ . The next case with a smaller channel height, which was investigated, was  $H = 10.2 \times d_w$ , but no evidence of capsizing was observed.

According to such results, it was shown that the optimum channel width (with the highest heat transfer coefficient) is explained by characteristics of mass transfer.

#### 4. Results of heat transfer investigation

Results of heat transfer investigation are presented in Fig. 3a.  $Nu$  is a Nusselt number, which level for the widest channel was equal to Nusselt number in free volume case.. In Fig. 3b, a relative level of heat transfer coefficient is shown: increasing or decreasing compared to the free volume case. Additionally, a line, which connects the points of the maximum heat transfer coefficient, is presented. It is clearly seen that the increase of the higher level of heat transfer coefficient was observed for lower  $Ra$ . Besides, when  $Ra$  decreases, the optimum channel width increases. The results of the heat transfer investigation described here fully correspond to the mass transfer results and behaviour map. So, in the area of invariant mass flow, heat transfer level equal to the free volume case is observed. Decrease of the channel width leads to the decrease of heat transfer intensity; the smallest level was observed during the capsized regime.

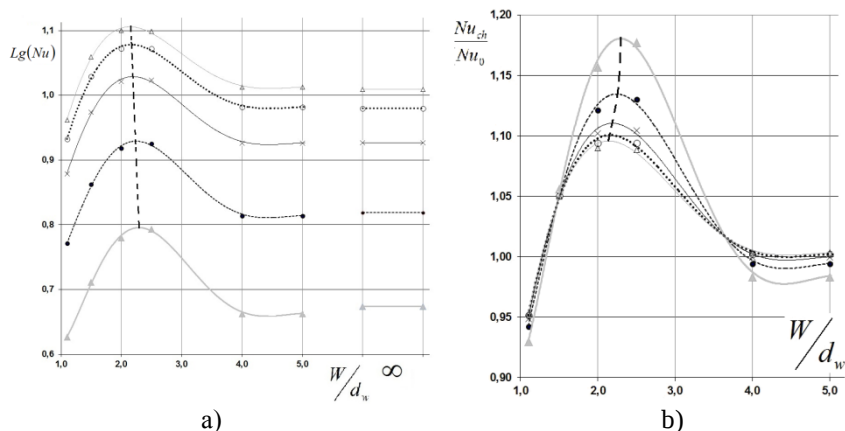


Fig. 3 Results of heat transfer investigation: heat transfer coefficient ( $Lg(Nu)$ ) depends on  $Ra$  and  $w/d_w$  ( $H/d_w \approx 32$ ): a) absolute results; b) relative results:

— $\triangle$ —  $Lg(Ra) = 3.90$ ; — $\bullet$ —  $Lg(Ra) = 4.48$ ; — $\times$ —  $Lg(Ra) = 4.90$ ; — $\circ$ —  $Lg(Ra) = 5.11$ ; — $\triangle$ —  $Lg(Ra) = 5.23$ ; — — — optimum channel widths.

According to such results, heat transfer coefficient from the horizontal cylinder, confined in vertical channel, can be calculated using:

$$Nu_{\square h} = C_{ch} \times Ra^{0.25} \times e^{0.006 \times \frac{H}{d_w}} \quad (1)$$

where  $C_{ch} = -0.067 \times \eta^2 + 0.39 \times \eta - 0.008$  ( $\eta = Ra^{0.015} \cdot W/d_w$ ), for  $1.1 \leq W/d_w < 4.0$ ,  $0 < H/d_w \leq 32$  and  $9.1 \times 10^3 \leq Ra \leq 1.7 \times 10^5$ .

**Conclusion.** The results of the experimental investigation clearly show that depending on the channel width, heat transfer characteristics can drastically change. This is the result of mass transfer changes: intensity of mass flow can increase or decrease depending on geometric sizes of the channel. Inside the investigated field, the obtained results have shown the existence of optimum channel width, which leads to the maximum heat transfer coefficient. Maximum increase was 18%, and the optimum channel width –  $2.2 \leq W/d_w < 2.3$  for  $9.1 \cdot 10^3 \leq Ra \leq 1.7 \cdot 10^5$ .

### Bibliography

1. Marsters, C. F. (1975) Natural convective heat transfer from a horizontal cylinder in the presence of nearby walls. *The Canadian journal of chemical*

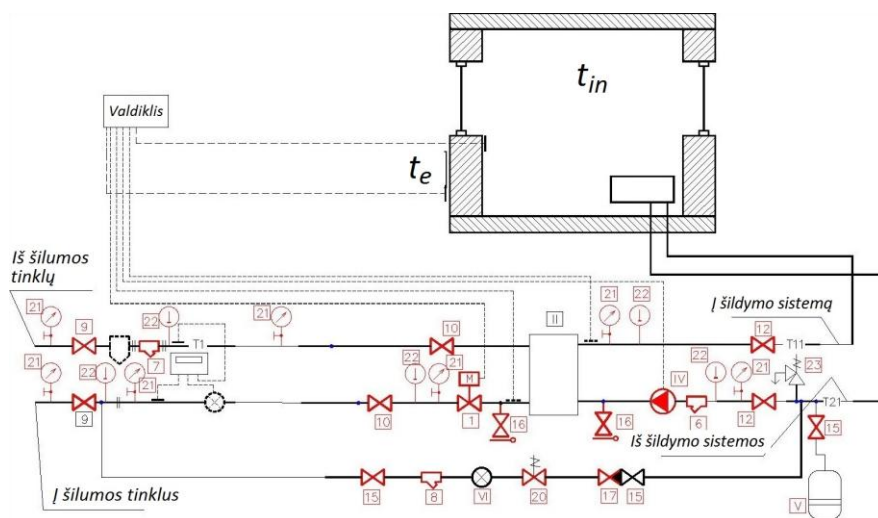
- engineering. V. 53, issue 1, pp.144-149.
2. Bakhtier, F., Selcuk, I. G. (1982) Natural and mixed convection heat transfer around a horizontal cylinder within confining walls. *Numerical heat transfer*. Vol. 5. pp. 329-341.
3. Sadegh Sadeghipour, M., Pedram Razi, Y. (2001) Natural convection from a confined horizontal cylinder: the optimum distance between the confining walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. No. 44. pp. 367-374
4. Neilo R.V. Experimental investigation heat and mass transfer during natural convection. *Šilumos energetika ir technologijos*. Kaunas (Lithuanian). 31 Jan 2014, pp. 95-98.
5. Tuz, V. O., Neilo, R. V. Experimental heat transfer investigation on horizontal cylinder during natural convection. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2013, No. 6/5 (66), pp.17-23.
6. Neilo R. V. Smoke visualization of dynamic field during nature convective. *Technology Audit and Production Reserves*. 2014, №1/1 (15), pp. 10-14.
7. Kitamura K. Heat transfer of combined forced and natural convection from horizontal cylinder to air // K. Kitamura, K. Mototani, F. Kimura. *Heat Transfer – Asian Research*. V. 36, issue 8. – 2007. pp. 474-488.

## 5 ŠILDYMAS, ŠILUMOS TIEKIMAS IR TERMOFIKACIJA

### Pastatų šildymo sistemų darbo režimo optimizavimas taikant valdymo matematinius modelius

Stasys Šinkūnas, Mantas Morkvėnas, Jozas Gudzinskas, Romaldas Morkvėnas  
 Kauno technologijos universitetas

**Tyrimo objektas** - pastato šildymui tiekiamos šilumos srauto ir šildymo sistemų darbo režimų valdymo ir automatinio reguliavimo pastato įvade probleminiai klausimai, galimi jų sprendimo būdai, pateikiami autorių siūlomi šildymo sistemų darbo procesų valdymo matematinio modeliavimo metodai, kurių pritaikymo galimybės atsiranda pradėjus šilumos vartojimo įrenginiuose taikyti šiuolaikines technologijas ir kurių taikymas praktikoje leistų optimizuoti šildymo sistemų darbo režimą. Šiame darbe autorių analizuojamos tyrimo objekto schemas ir projektuojamieji darbo režimai pavaizduoti 1, 2 ir 3 paveiksluose.



1 pav. Šildymo sistemų darbo režimų valdymo ir automatinio reguliavimo pastato įvade principinė schema

Valdiklio reguliuojama tiekiamo į šildymo sistemą šilumnešio temperatūros  $t_3$  ir lauko oro temperatūros  $t_e$  projektuojamoji priklausomybė aprašoma tokia formule:

$$t_3 = t_{in} + \left( \frac{t_{3n} + t_{2n} - t_{in}}{2} - t_{in} \right) \left( \frac{t_{in} - t_e}{t_{in} - t_{en}} \right)^{0,75} + \left( \frac{t_{3n} - t_{2n}}{2} \right) \left( \frac{t_{in} - t_e}{t_{in} - t_{en}} \right) \quad (1)$$

čia:

$t_{3n}$  – projektuojamoji tiekiamo į šildymo sistemą šilumnešio temperatūra, °C;

$t_3$  – tiekiamo į šildymo sistemą šilumnešio temperatūra, °C;

$t_{2n}$  – projektuojamoji grąžinamo iš šildymo sistemos šilumnešio temperatūra, °C;

$t_2$  – grąžinamo iš šildymo sistemos šilumnešio temperatūra, °C;

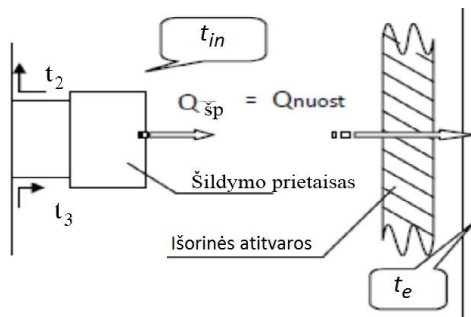
$t_{in}$  – projektuojamoji šildomų patalpų oro temperatūra, °C. Priimta, kad gyvenamosioms patalpoms ši temperatūra yra lygi +18 °C.

$t_{en}$  – projektuojamoji lauko oro temperatūra, °C;

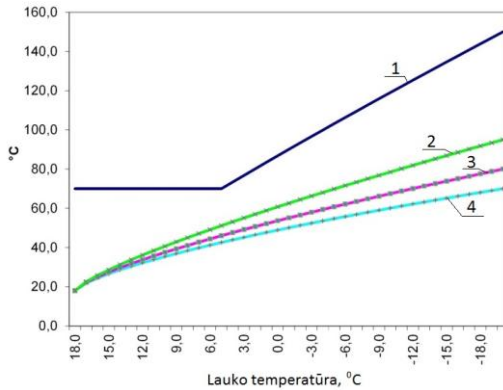
$t_e$  – lauko oro temperatūra, °C.

Pastatų šildymo sistemos galia projektuojama ir reguliuojama taip, kad būtų užtikrinama patalpų vidaus oro temperatūra  $t_{in}$ , esant lauko oro temperatūrai norminėmis sąlygomis  $t_{en}$ . ir kitu laiku  $t_e$  (šildymo sezono lauko oro temperatūrų diapazone).

Tiekiamo į šildymo prietaisus šilumnešio temperatūrą  $t_3$  automatiškai reguliuoja valdiklyje integruota ir šildymo sistemos įvade įrengta *trikdžio kompensavimo* automatinio reguliavimo sistema (1 pav.), kuomet valdiklis matuoja lauko oro temperatūrą  $t_e$  ir tiekiamo į šildymo prietaisus šilumnešio temperatūrą  $t_3$ , ir atitinkamai keičia šildančio šilumnešio srautą taip, kad būtų išlaikytas santykis tarp lauko oro temperatūros  $t_e$  ir tiekiamo į šildymo prietaisus šilumnešio temperatūros  $t_3$  (3 pav.) pagal iš anksto nustatytą priklausomybę (1 formulė), sudaryta vadovaujantis šilumos mainų šildomose patalpose dėsniais grandinėje: šildymo prietaisas – patalpos temperatūra  $t_{in}$  – šilumos srautas (nuostoliai) per išorines atitvaras – lauko oro temperatūra  $t_e$  (2 pav.).



2 pav. Šilumos mainų šildomose patalpose schema



3 pav. Tiekiamo šilumnešio temperatūrų ir lauko oro temperatūros skaičiuojamosios priklausomybės. 1 – iš šilumos tiekimo tinklų tiekiamo termofikacinio vandens temperatūra  $t_1$ , °C; 2 – į pastato šildymo prietaisus tiekiamo šilumnešio temperatūra  $t_3$ , °C; 3 – į šilumos tinklus grįžtančio termofikacinio vandens temperatūra  $t_2$ , °C; 4 – iš pastato šildymo prietaisų grįžtančio šilumnešio temperatūra  $t_{2i}$ , °C

### Tyrimo objekto problemų analizė ir siūlomi sprendimai:

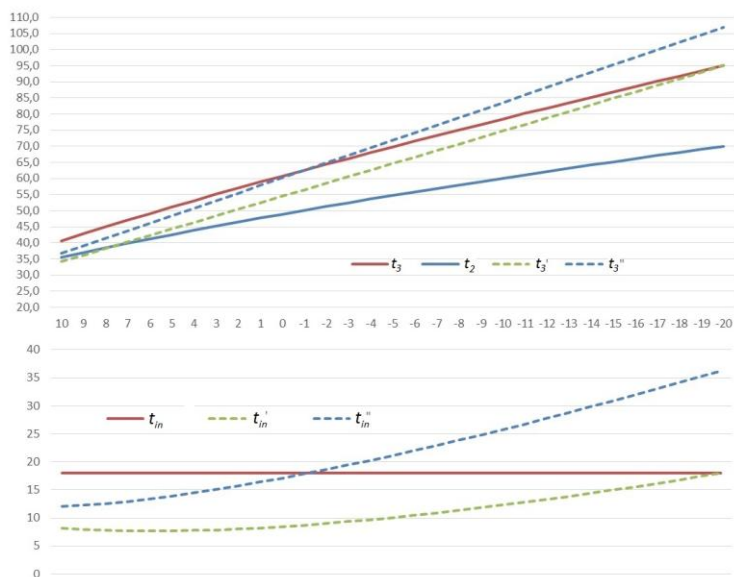
1. Dauguma šiuo metu gaminamų valdiklių, gali realizuoti tik tiesinę priklausomybę tarp lauko oro  $t_e$  ir tiekiamo šilumnešio  $t_3$  temperatūrų;
2. Renovuojant pastatų išorines atitvaras, nekeičiama šildymo sistemos galia;
3. Valdiklyje realizuojama priklausomybė tarp lauko oro  $t_e$  ir tiekiamo šilumnešio  $t_3$  temperatūrų (1 formulė) neįvertina nestacionaraus šilumos mainų proceso (šilumos inercijos) per iš orines atitvaras.

Pirmuoju atveju projektuojamos ir faktinės priklausomybės tarp lauko oro  $t_e$  ir tiekiamo šilumnešio  $t_3$  temperatūrų ir jų įtaka projektuojamai patalpų vidaus temperatūrai  $t_{in}$  pavaizduotos 4 paveiksle.

Kaip matome iš šiam paveiksle pateiktų temperatūrų grafikų šiuo atveju, jeigu valdiklis bus suderintas projektuojamai tiekiamo šilumnešio temperatūrai  $t_{3n}$ , faktinė patalpų vidaus temperatūra  $t_{if}$  visame lauko oro temperatūrų diapazone bus žemesnė už projekcinę  $t_{in}$ , jeigu valdiklis bus suderintas tam tikrai tarpinei tiekiamo šilumnešio temperatūrai  $t_3$ , faktinė patalpų vidaus temperatūra  $t_{if}$ , esant žemesnėms lauko oro temperatūroms bus aukštesnė, o aukštesnėms – žemesnė už projekcinę temperatūrą  $t_{in}$ .

Valdikliai yra derinami tik keičiant nustatomą, pagal poreikius, (paprastai eksperimento būdu prie tam tikrų atsitiktinių lauko oro temperatūrų) lauko oro ir tiekiamo šilumnešio temperatūrų santykio (tiesinę) priklausomybę. Tai sudaro

prielaidas, kad tam tikruose lauko oro temperatūrų diapazonuose neužtikrinama reikiama patalpų oro temperatūra.

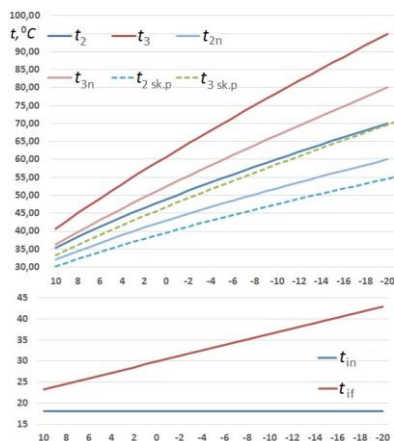


4 pav. Projektuojamos (išstinės linijos) ir faktinės (punktyrinės linijos) valdiklyje realizuojamos priklausomybės tarp lauko oro  $t_e$  ir tiekiamo šilumnešio  $t_3$  temperatūrų ir jų įtaka projektuojamai patalpų vidaus temperatūrai  $t_{in}$

Šiuo atveju problema gali būti sprendžiama:

- jei yra numatytos tokios techninės galimybės valdiklyje, skaidyti reguliavimo tiesę į lauko oro temperatūrų sektorius taip, kad kiekviename sektoriuje ši tiesė būtų galimai artimesnė projektuojamajai (1 formulė) ir atitinkamai vietoje arba naudojant nuotolinio valdymo sistemas pagal faktinę lauko oro temperatūrą koreguoti valdiklio parametrus;
- įdiegti papildomą modulį ar programinę įrangą, realizuojant valdiklyje lauko oro temperatūros ir tiekiamo į šildymo sistemas šilumnešio temperatūros projektuojamąją priklausomybę (1 formulė).

Antruoju atveju, kuomet renovuojant pastatų išorines atitvaras, atitinkamai nekeičiama šildymo sistemos galia, projektuojamos ir faktinės priklausomybės tarp lauko oro  $t_e$  bei  $t_{en}$  ir tiekiamo šilumnešio  $t_3$  bei  $t_{3n}$  temperatūrų ir jų įtaka patalpų vidaus temperatūroms  $t_{if}$  bei  $t_{in}$  pavaizduotos 5 paveiksle.



5 pav. Projektuojamos ir faktinės priklausomybės tarp lauko oro  $t_e$  bei  $t_{en}$  ir tiekiamo šilumnešio temperatūrų  $t_3$  bei  $t_{3n}$  ir jų įtaka patalpų vidaus temperatūroms  $t_{if}$  bei  $t_{in}$

Kaip matome iš 5 paveikslė pateiktų temperatūrų grafikų šiuo atveju, jeigu valdiklis bus suderintas projektuojamai tiekiamo šilumnešio temperatūrai  $t_{3n}$ , atitinkančiai šilumos nuostoliams iki pastato išorinių atitvarų renovavimo, padidinant jų šilumos varžą, faktinė patalpų vidaus temperatūra  $t_{if}$  visame lauko oro temperatūrų diapazone bus aukštesnė už projektinę  $t_{in}$ , jeigu valdiklis bus suderintas tam tikrai tarpinei tiekiamo šilumnešio temperatūrai  $t_3$ , pagal faktinę patalpų vidaus temperatūrą  $t_{if}$ , esant atitinkamai lauko oro temperatūrai, tikėtina, kad visame lauko oro temperatūrų diapazone  $t_{if}$  bus lygi ar artima  $t_{in}$ .

Šiuo atveju problema gali būti sprendžiama:

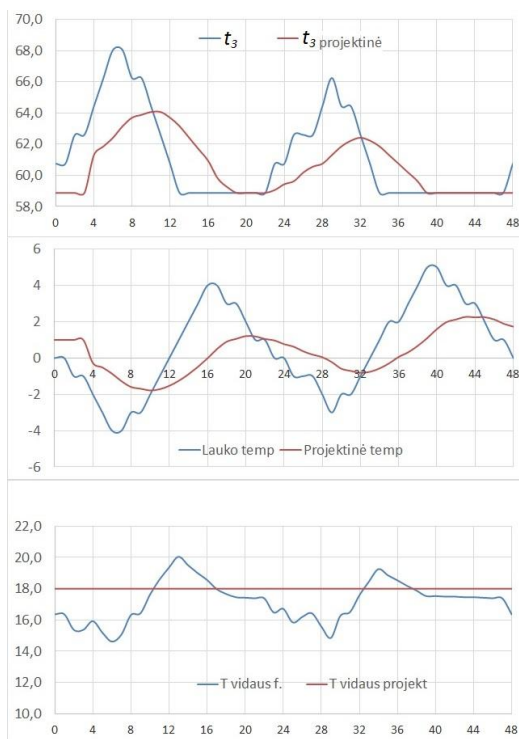
- eksperimento būdu, matuojant  $t_{if}$  ir lyginant su  $t_{in}$  keisti valdiklio priklausomybės tarp lauko oro  $t_e$  ir tiekiamo šilumnešio  $t_3$  temperatūrų nustatymus arba naudojant nuotolinio valdymo sistemas pagal faktines lauko oro  $t_e$  ir vidaus patalpų  $t_{if}$  (jeigu yra tokios techninės galimybės) temperatūras atitinkamai koreguoti valdiklio parametrus;
- paskaičiuoti pastato projektuojamų šilumos nuostolių po ir prieš atitvarų renovavimą santykį  $K$ , vadovaujantis formule  $(t_{in} - t_{en}) = K(t_{in} - t_{enk})$  perskaičiuoti projektuojamą lauko oro temperatūrą  $t_{enk}$ , realizuojant valdiklyje lauko oro temperatūros  $t_{enk}$  ir tiekiamo į šildymo sistemas šilumnešio temperatūros  $t_{3n}$  projektuojamąją priklausomybę (1 formulė).

Trečiuoju atveju valdikliui pagal lauko oro temperatūrą  $t_e$  palaikant tiekiamo į šildymo sistemą šilumnešio temperatūrą  $t_3$  (1 formulė) dėl šiluminės inercijos

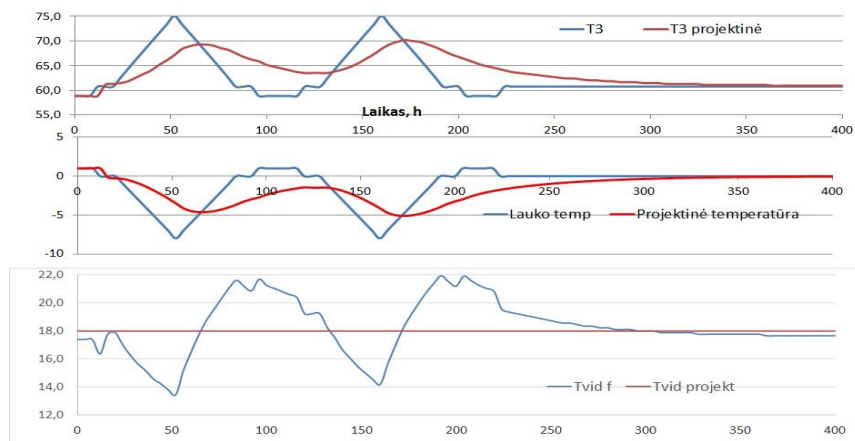
pereinamųjų procesų metu nebus užtikrinama pastovi patalpų vidaus oro temperatūra. Norint pašalinti šią problemą būtina įvertinti atitvarų šilumos inerciją.

Tuo tikslu siūloma įvesti projektuojamos lauko oro temperatūros  $t_{ep}$  sąvoką, kuri nuo faktinės momentinės lauko oro temperatūros realiaame laike skirtųsi tokiu nestacionaraus proceso dėsningumu, koku vyksta nestacionarus šilumos mainai per išorės atitvaras tarp patalpos ir lauko oro temperatūrų. Autorių siūlomas projektuojamos lauko oro temperatūros, įvertinus atitvarų šilumos inerciją, skaičiavimo matematinis modelis ir jo taikymo praktikoje galimybės pateiktos [2, 3, 4].

Projektuojamos ir faktinės priklausomybės tarp lauko oro  $t_e$  ir tiekiamo šilumnešio  $t_3$  temperatūrų ir jų įtaka projektuojamai patalpų vidaus temperatūrai  $t_{in}$  įvertinus ir neįvertinus atitvarų šilumos inerciją pavaizduotos 6 ir 7 paveiksluose.



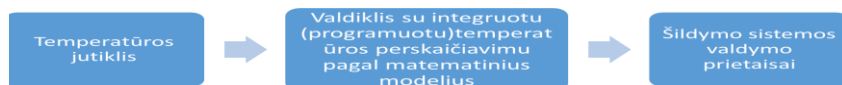
6 pav. Projektuojamos ir faktinės priklausomybės tarp lauko oro  $t_e$  ir tiekiamo šilumnešio  $t_3$  temperatūrų ir jų įtaka projektuojamai patalpų vidaus temperatūrai  $t_{in}$  įvertinus ir neįvertinus atitvarų šilumos inerciją, esant trumpalaikiams (paros) lauko oro temperatūrų svyravimams



7 pav. Projektuojamos ir faktinės priklausomybės tarp lauko oro  $t_e$  ir tiekiamo šilumnešio  $t_3$  temperatūrų ir jų įtaka projektuojamai patalpų vidaus temperatūrai  $t_{in}$  įvertinus ir neįvertinus atitvarų šilumos inerciją, esant ilgalaikiams (kelių parų) lauko oro temperatūrų svyravimams

Kaip matome iš 6 ir 7 paveiksluose pateiktų temperatūrų grafikų šiuo atveju, jeigu valdiklis reguliuoja tiekiamo šilumnešio temperatūrą  $t_3$  pagal 1 formulę, neįvertinus išorinių atitvarų šilumos inercijos, faktinė šildomų patalpų temperatūra  $t_{if}$  tam tikru dėsniumu nukrypsta nuo projektinės  $t_{if}$

Šiuo atveju problema gali būti sprendžiama valdiklyje įdiegus tiekiamo į šildymo sistemą šilumnešio temperatūros projektuojamos priklausomybės (1 formulė) bei pastato atitvarų šilumos inercijos įvertinimo projektuojamos lauko oro temperatūros  $t_{ep}$  skaičiavimo matematinio modelio modulį, atliekantį realiam laike ir sąlygose faktinės lauko oro temperatūros  $t_{ef}$  perskaičiavimą į projektuojamą (įvertinus pastato atitvarų šilumos inerciją) lauko oro temperatūrą  $t_{ep}$  (8 paveikslas).



8 pav. Tiekiamo į šildymo sistemą šilumnešio temperatūros perskaičiavimo blokinė schema

### **Išvados**

Siekiant efektyvaus šilumos vartojimo ir tinkamo mikroklimato sąlygų užtikrinimo patalpose, šildymo sistemų darbo režimo reguliavimo procese turėtų būti:

- įvertintas pastato išorės atitvarų šiluminis inertiškumas, naudojant siūlomą projektinės lauko oro temperatūros skaičiavimo matematinį modelį;
- įvertinta projektuojamoji (dėl natūralios konvekcijos šilumos mainų procesų šildymo prietaiso aplinkoje ypatumų) tiekiamo šilumnešio ir lauko oro temperatūrų priklausomybė;
- įvertinta šilumos nuostolių pokytis renovavus išorės atitvaras ir nepakeitus šildymo sistemos galios.

Šiame darbe pateikiamas optimalių skaičiuojamųjų šilumnešio parametrų nustatymo ir skaičiavimo matematinis modelis ir praktinio taikymo rekomendacijos sudaro prielaidas didinti aprūpinimo šiluma sistemų efektyvumą.

### **Literatūra**

1. Gedgaudas M., Šležas A., Švedarauskas J., Tuomas E. Šilumos tiekimas. Vilnius, 1992, p. 17-26, 88-120.
2. Morkvėnas R. Šilumos tiekimo pastatų šildymui reguliavimo matematinis modelis. Šiluminė technika, 2004, Nr. 3(21), p. 4-6.
3. Šinkūnas S., Morkvėnas M., Gudzinskas J., Morkvėnas R. Šilumos mainų pastatuose matematiniai modeliai ir jų taikymo pastatų šildymo sistemų darbo režimo valdymui galimybių tyrimas. Šilumos energetika ir technologijos, 2013.
4. Šinkūnas S., Morkvėnas M., Gudzinskas J., Morkvėnas R. Šilumos mainų pastatuose matematiniai modeliai ir jų taikymo pastatų šildymo sistemų darbo režimo valdymui galimybių tyrimas. Šilumos energetika ir technologijos, 2014.

### **Optimization of buildings heating systems working mode using mathematical models**

#### **Summary**

The methodology and recommendations of building heating system parameter optimization were given in this article. The optimization includes dynamic heat transfer characteristics and evaluates heat capacity of different building partitions. The calculation algorithm of heat capacity evaluation for building heating system control was designed and it is presented in this article.

## Daugiabučių namų oro kokybės tyrimai

Violeta Motuzienė

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

**Ivadas.** Lietuva geografiniu požiūriu yra vidutinių platumų klimato juostoje, todėl šalyje būdingi ryškūs keturi metų laikai. Šaltuoju metų laiku žmonės vidutiniškai iki 90 % viso laiko praleidžia uždaroje patalpoje, daugiausiai – savo namuose. Taigi, norint išvengti negalavimų, didelės reikšmės turi gyvenamųjų namų vėdinimas ir nuolat užtikrinami norminiai oro kokybės parametrai.

Visuose Lietuvoje esančiuose senos statybos bei 95 % renovuotuose ir naujai pastatytuose daugiabučiuose pastatuose yra įrengta natūrali vėdinimo sistema [1]. Didėjant esamų ir naujai statomų pastatų sandarumui, mažėja į patalpas patenkančio lauko oro kiekis. Todėl, gerai izoliuotuose nevėdinamuose arba prastai vėdinamuose daugiabučiuose pastatuose, oro tarša gali būti kelis ar net keliasdešimt kartų didesnė nei lauko oro [2]. Juose žmonės skundžiasi neaiškios kilmės negalavimais, kurie daugiausia siejami su buvimu patalpoje. Ypač tai aktualu šaltuoju metų laiku, kai žmonės vengia atverti orlaides ar langus. Taigi, vyraujantis daugiabučiuose natūralus vėdinimas nėra pakankamai patikimas, dėl jo atsiranda papildomų šilumos nuostolių, jis gali sukelti diskomfortą.

Pagrindinis gyvenamųjų ir viešosios paskirties pastatų oro taršos šaltinis yra žmogus, išskiriantis daugiausia CO<sub>2</sub>, kurio koncentracija nusakoma patalpų oro kokybė. Viešųjų pastatų oras klasifikuojamas į 4 kategorijas (IDA1, IDA2, IDA3, IDA4) [3], atsižvelgiant į CO<sub>2</sub> koncentraciją patalpos ore. Šiame tyrime daroma prielaida, kad ši klasifikacija tinkama ir gyvenamos paskirties pastatams ir laikoma, kad patalpos pakankamai gerai vėdinamos, jei CO<sub>2</sub> koncentracija juose neviršija 1000 ppm. Nustatyta, kad nuo 1000–2500 ppm žmonės gali jausti mieguistumą, galvos skausmą bei kitus požymius, o viršijant 2500 ppm koncentraciją, jau galimas neigiamas poveikis žmogaus sveikatai.

Šio tyrimo tikslas – ištirti patalpų oro kokybę daugiabučiuose pastatuose šaltuoju metų laikotarpiu, nustatyti faktinę oro apykaitą dėl infiltracijos bei gautus rezultatus sugretinti su atliktos gyventojų apklausos rezultatais.

Tikslui pasiekti įvairiuose daugiabučiuose pastatuose, kuriuose įrengta natūrali vėdinimo sistema, buvo matuojami patalpų oro parametrai šildymo sezono metu: CO<sub>2</sub> koncentracijos kiekis ore, oro temperatūra bei santykinė drėgmė. Straipsnyje pristatomi tik CO<sub>2</sub> koncentracijos matavimo rezultatai. Taip pat atlikta gyventojų apklausa, siekiant išsiaiškinti gyventojų žinias apie vėdinimą ir su tuo susijusius jų įpročius.

**Tyrimo objektai.** Tyrimo objektai – įvairiuose Vilniaus miesto mikrorajonuose esančių senos (pastatyti iki 1992 m.) ir naujos statybos bei renovuotų daugiabučių pastatų (1 pav.) butai. Visuose tirtuose objektuose yra sumontuoti plastikiniai langai

bei naudojamos natūralaus vėdinimo sistemos, išskyrus vieną renovuotą daugiabutį, kurio vėdinimo sistemoje įrengtas šilumos siurblys oras – vanduo, tačiau tyrimo atlikimo metu jis neveikė, todėl priimta, jog šio daugiabučio namo butuose taip pat yra natūrali vėdinimo sistema. Viso tyrimo metu patalpų mikroklimato parametrai tirti 19-oje butų, iš kurių 9 yra senos statybos daugiabučiuose pastatuose, 4 – naujos statybos bei 6 – renovuotuose daugiabučiuose (1 pav.).



1 pav. Tipiniai tyrimo metu matuoti senos ir naujos statybos bei renovuoti daugiabučiai

### Tyrimo metodika

Daugiabučių pastatų mikroklimato parametrų matavimai atliekami pagal norminių dokumentų [4, 5] reikalavimus. Kiekviename daugiabučio namo bute matavimai buvo atliekami šildymo sezono metu, savaitės laikotarpiu, anglies dvideginio koncentraciją matuojant 5 min. intervalu. Matavimams naudotas prietaisas „Telaire 7001“. Siekiant visuose butuose suvienodinti matavimų sąlygas, patalpų oro kokybės tyrimams buvo pasirinktos tos pačios paskirties patalpos – butų svetainės. Svetainės kaip matavimo objektas buvo pasirinktos todėl, kad būdami namie įprastai daugiabučių namų gyventojai būtent jose praleidžia daugiausiai laiko (neskaitant miegui skirtą laiką). Dviejų butų, esančių renovuotame name matavimo rezultatus teko atmesti, nes gyventojai išjungė arba perstatė matavimo prietaisus, kas iškreipė rezultatus.

Turint kiekvieno buto išmatuotus anglies dvideginio koncentracijos patalpų ore kitimo duomenis, pagal (1) formulę nustatomos tirtų butų oro apykaitos:

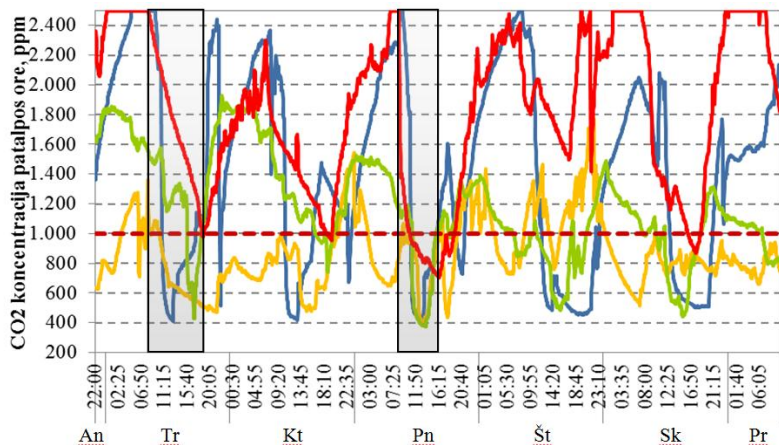
$$n = \frac{(\ln(c_p - c_g) - \ln(c_g - c_e)) \cdot 3600}{t}; \quad (1)$$

čia:  $c_p$  – pradinė išmatuota dujų koncentracija patalpoje, ppm;  $c_g$  – galinė išmatuota dujų koncentracija patalpoje, ppm;  $c_e$  – lauko oro dujų koncentracija (400 ppm) [5];  $t$  – laikas tarp pradinės ir galinės dujų koncentracijos kitimo, s.

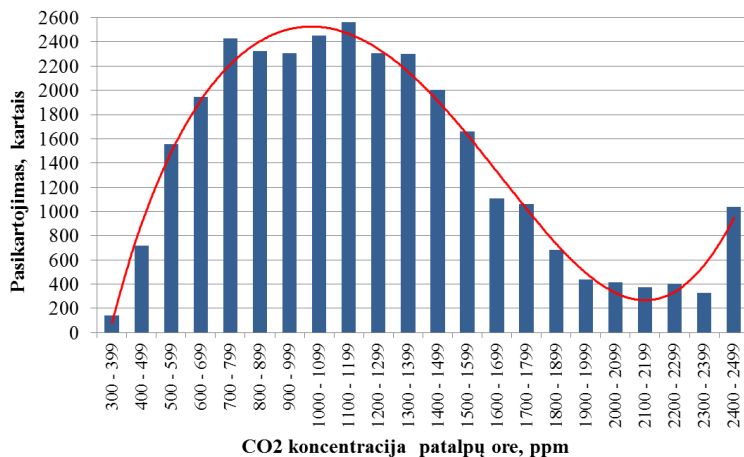
Norint apskaičiuoti oro apykaitą dėl infiltracijos, pirmiausiai iš kiekvienam butui nubraižytų CO<sub>2</sub> koncentracijos kitimo grafikų skirtingomis savaitės dienomis ir skirtingu laiku yra pasirenkami charakteringi CO<sub>2</sub> koncentracijos mažėjimo periodai su aiškiais pradinėmis ir galutinėmis reikšmėmis, nustatomas laikas, per kurį koncentracija sumažėja iki minimumo. Žinant šiuos duomenis, apskaičiuojamos atskirų laiko tarpų butų oro apykaitos reikšmės.

**Rezultatai.** Atliktus CO<sub>2</sub> koncentracijos matavimus, buvo sudaryti atskiri grafikai senos statybos, renovuotuose ir naujos statybos namuose esantiems butams. Esminių skirtumų tarp šių trijų pastatų tipų nebuvo pastebėta, visuose butuose pasitaikė įvairių anglies dvideginio svyravimų, todėl pateikiamas tik renovuotų butų pavyzdys (2 pav.). Visuose nagrinėtuose butuose tam tikrais laikotarpiais buvo viršijama rekomenduojama CO<sub>2</sub> koncentracijos riba (1000 ppm), daugumoje butų ji viršijama praktiškai visada, kai patalpose yra žmonės. Iš vertintų 17 butų – 4-iose anglies dvideginio koncentracija nuolat viršija 2500 ppm ribą (t. y. prietaiso matavimo ribas), o tokia koncentracija, kaip minėta, yra pavojinga sveikatai. Tokių butų naujos statybos namuose nepasitaikė, to priežastis gali būti didesnės erdvės, neatskirtos pertvaromis.

Daugiabučių pastatų butų CO<sub>2</sub> koncentracijos rezultatų analizei atlikti yra sudaromas grupuotų duomenų tankio funkcijos grafikas – histograma (3 pav.). Siekiant gauti šį grafiką, visos išmatuotos daugiabučių pastatų butų anglies dvideginio koncentracijos gyvenamųjų patalpų ore reikšmės suskirstytos į intervalus bei nustatytas jų pasikartojimas per savaitę – dažnis. Pateikiama visų tyrimo metu matuotų butų CO<sub>2</sub> koncentracijų patalpų ore pasikartojimų per savaitę histograma (3 pav.).



2 pav. CO<sub>2</sub> koncentracijos renovuotose namuose esančiuose butuose kitimo (skirtingos spalvos kreivė žymi atskirą butą) grafikai

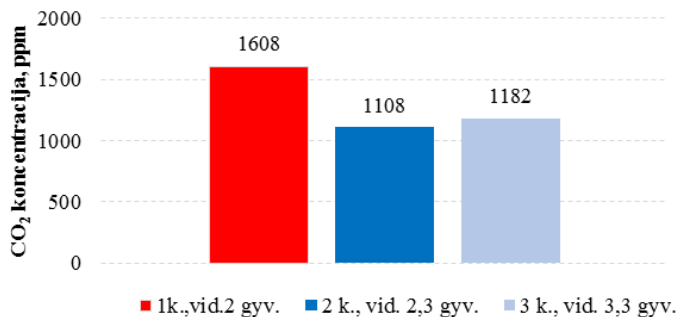


3 pav. CO<sub>2</sub> koncentracijos butuose dažnių histograma per savaitę

Iš aukščiau pateikto grafiko (3 pav.) matyti, jog matuotu laikotarpiu dažniausiai pasikartojančios CO<sub>2</sub> koncentracijos reikšmės yra 1100–1199 ppm intervale. Šio patalpų mikroklimato parametro vidutinė reikšmė, įvertinus matavimo prietaisų paklaidas, yra lygi 1217–50 ppm. Ši vidutinė CO<sub>2</sub> koncentracijos gyvenamųjų patalpų ore reikšmė yra beveik 22 % didesnė už reglamentuose [5] rekomenduojamą 1000 ppm koncentracijos ribą. Palyginti apskaičiuojamas dar vienas šio mikroklimato parametro reikšmių vidurkis. Šiuo atveju nevertinamos reikšmės užfiksuotos darbo dienomis nuo 8:00 iki 17:00 valandos, kai dauguma gyventojų dirbo ir nebuvo

namuose. Tokiu atveju vidutinė  $\text{CO}_2$  koncentracija butuose, įvertinus matavimo prietaisų paklaidas, padidėjo iki 1301–50 ppm. Ši vidutinė reikšmė yra 30 % didesnė už reglamentuose rekomenduojamą ribą.

Sudarius visų tyrime nagrinėtų 17 butų  $\text{CO}_2$  koncentracijos patalpų ore kitimo grafikus per savaitę (4 pav.), pastebėta tendencija, jog paprastai 1 kambario butuose  $\text{CO}_2$  koncentracija tam tikromis paros valandomis yra kur kas didesnė nei 2 ar 3 kambarių butuose (4 pav.).



4 pav. Vidutinės  $\text{CO}_2$  koncentracijos 1, 2 ir 3 kambarių butuose reikšmės per savaitę

Iš 4 pav. matyti, kad matuotu laikotarpiu 2 ir 3 kambarių butuose vidutinė  $\text{CO}_2$  koncentracija siekė atitinkamai 1108 ir 1182 ppm, o 1 kambario butuose ji buvo apie 30 % didesnė ir vidutiniškai siekė 1608 ppm. Taip pat pastebima, kad 3 kambarių butuose vidutinė  $\text{CO}_2$  koncentracija buvo šiek tiek didesnė nei 2 kambarių butuose. To priežastis – didesnis žmonių (pagrindinių taršos šaltinių) tankis butuose.

Siekiant nustatyti oro apykaitas dėl infiltracijos butuose, 17 butų išskaičiuotos iš viso 94 oro apykaitos reikšmės charakteringiems laiko momentais. Du charakteringi periodai, kaip pavyzdys, pavaizduoti 2 pav. Iš jų matyti, kad ryte buvusi maksimali išmatuota koncentracija iki vakaro nukrenta iki leistinos ribos. Taip nutinka, kai patalpose nėra žmonių ( $\text{CO}_2$  šaltinių), o patalpos oras yra maišomas su infiltruojamu lauko oru. Taigi, laikas, per kurį koncentracija sumažės, priklauso nuo patalpos sandarumo.

Gauta, kad oro apykaita dėl infiltracijos atskirais periodais butuose svyruoja nuo 0,04 iki 0,71  $\text{h}^{-1}$ , o bendra vidutinė visų tyrime matuotų butų oro apykaita yra lygi 0,276  $\text{h}^{-1}$ . Taigi, kai kurių butų oro apykaita yra tiek maža, kad beveik atitinka pasyviai namui keliamus sandarumo reikalavimus. Skirtumas tik tas, kad itin sandarūs energiškai efektyvūs pastatai privalo turėti mechaninę vėdinimo sistemą su šilumos atgavimu, o analizuojamuose pastatuose jos nėra.

Kaip minėta, buvo papildomai atlikta daugiabučių gyventojų apklausa, kurioje dalyvavo 143 respondentai. Ji parodė, kad: net 60 % gyventojų neturi supratimo, kokia turi būti oro apykaita patalpose; tik 40 % respondentų reguliariai vėdina

patalpas atidarydami langus; 69 % respondentų, būdami namie reguliariai jaučia ligoto pastato sindromus (pagrinde mieguistumą), 41 % respondentų šaltuoju metų laikotarpiu nepatenkinti oro kokybe. Vertinant vėdinimo svarbą renovuojamuose pastatuose, apie renovacijos naudą yra girdėję net 83 % respondentų, o apie vėdinimo svarbą tik 39 %. Tokie apklausos rezultatai leidžia daryti prielaidas, kad prasta oro kokybė patalpose daugiausia nulemta gyventojų žinių apie vėdinimą ir įpročių ar/ir noro reguliariai vėdinti patalpas stygiaus.

Taigi, apibendrinant aišku, kad daugumoje butų oro kokybė žmonių buvimo laikotarpiu yra prasta, kai kuriais atvejais, net kenksminga sveikatai. Akivaizdu, kad natūralus vėdinimas nėra efektyvus vėdinimo būdas sandariuose pastatuose. Todėl būtinas reguliarius natūralus patalpų vėdinimas atidarant langus arba orlaides. Tam reikia keisti gyventojų įpročius. Kitas galimas sprendimas, kuris yra energiškai efektyvesnis, bet ne visada techniškai įmanomas ir ekonomiškai priimtinas – subalansuoto mechaninio vėdinimo sistema su šilumogrąža.

**Padėkos.** Dėkoju Viliui Ankėnui už pagalbą atliekant tyrimą bei Vilniaus Gedimino Technikos universiteto Pastato energetinių ir mikroklimato sistemų laboratorijai už suteiktą matavimo įrangą tyrimams atlikti.

### Išvados

1. Tirtuose butuose CO<sub>2</sub> koncentracijos ore vidutinė reikšmė visu matavimo laikotarpiu buvo lygi 1217 ppm, nevertinant darbo valandų (nuo 8:00 iki 17:00 val.) – 1031 ppm. Ši reikšmė atitinkamai 22 % ir 30 % viršijo rekomenduojamą 1000 ppm koncentraciją. Vidutinė CO<sub>2</sub> koncentracija buvo didesnė 1 kambario butuose, lyginant su dviejų ir trijų kambarių butais, ji buvo vidutiniškai 30 % didesnė ir siekė 1608 ppm.
2. Iš vertintų 17 butų – 4-iose anglies dvideginio koncentracija nuolat viršija sveikatai pavojingą 2500 ppm ribą.
3. Gauta tyrime dalyvavusių butų oro apykaita svyruoja nuo 0,04 iki 0,71 h<sup>-1</sup>, o bendra vidutinė visų analizuotų daugiabučių oro apykaita yra 0,276 h<sup>-1</sup>.
4. Prastas patalpų vėdinimas būdingas tiek seniems, tiek renovuotiems ir naujos statybos daugiabučiams. Vertinant matavimo ir gyventojų apklausos rezultatus, akivaizdu, kad gyventojams trūksta žinių ir įpročių, galinčių pagerinti oro kokybę jų gyvenamoje aplinkoje. Todėl spręsti problemą galima keičiant vartotojų elgseną arba diegiant energiškai efektyvias mechanines vėdinimo sistemas.

### Literatūra

1. Dargis, G. Hibridinis vėdinimas – optimalus energijos išteklių tausojimo būdas. APS 3 (2009): 108-111.

2. Kim, S.-S., Kang, D.-H., Choi, D.-H., Yeo, M.-S., Kim, K.-W. Comparison of strategies to improve indoor air quality at the pre-occupancy stage in new apartment buildings. *Building and Environment* 47 (2012): 109–125.
3. EN 13779:2007 Negyvenamųjų pastatų ventiliacija. Ventiliacijos ir patalpų oro kondicionavimo sistemų eksploatacinių charakteristikų reikalavimai, 2007, 72 p.
4. HN 42:2009 „Gyvenamųjų ir visuomeninių pastatų patalpų mikroklimatas“, 2009.
5. STR 2.09.02:2005 „Šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas“, 2005.

### **Investigation of indoor air quality in apartment buildings**

#### **Summary**

The paper presents the investigation of indoor air quality in 19 naturally ventilated apartments of new built, renovated and unrenovated buildings in Vilnius. Research has shown that the issue of poor air quality exists in most of analysed cases. Average defined carbon dioxide concentration in analysed apartments during non-working hours exceeded recommended value by 30%. In 4 of them CO<sub>2</sub> concentration regularly exceeded 2500 ppm – the limit when indoor air quality becomes hazardous. Average defined tightness of the apartments is equal to 0.276 h<sup>-1</sup>. The survey of occupants has also shown the lack of knowledge and inhabits concerning efficient natural ventilation.

## **Daugiabučių namų vidaus šildymo ir karšto vandens sistemų modernizavimas 2012/27/ES direktyvos kontekste**

Romanas Savickas

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

**Ivadas.** Europos Sąjunga susiduria su didėjančiomis importuojamų energijos išteklių apimtimis, ribotais energetiniais ištekliais, klimato kaita bei ekonomine krize. Tai sąlygoja atkreipti daugiau dėmesio į energetinį efektyvumą, nes mažinant pirminės energijos išteklių vartojimą, tiesiogiai mažinamas priklausomumas nuo importuojamų energetinių išteklių ir didinamas energetinis saugumas. Energetiškai efektyvios ekonomikos raida skatina inovatyvius technologinius sprendimus bei didina ES pramoninį konkurencingumą, skatina ekonomikos augimą bei kvalifikuotos darbo jėgos vietų kūrimą. Daug dėmesio skiriama viešojo sektoriaus energijos efektyvumui didinti. Dar didesni tikslai ir įpareigojimai numatyti siekiant įgalinti, kad galutinis vartotojas pats reguliuotų savo energijos suvartojimą, nes pastatuose suvartojama 40 % viso ES galutinio energijos vartojimo.

**2012/27/ES efektyvumo direktyvos įpareigojimai Lietuvai.** 2012/27/ES efektyvumo direktyvos 7 straipsnis numato, kad iki 2020 m. gruodžio 31 d. turi būti pasiektas bendras galutinės energijos suvartojimo sutaupymo tikslas sutaupyti pas galutinį vartotoją kasmet po 1,5 %. Numatytas tikslas yra užtikrinti, kad nuo 2014 m. sausio 1 d. iki 2020 m. gruodžio 31 d. kiekvienais metais būtų sutaupyta naujas energijos kiekis, atitinkantis 1,5 % visų energijos skirstytojų ir/arba mažmeninės prekybos energija įmonių, paskirtų kaip įpareigosios šalys, kasmet galutiniams vartotojams parduodamo energijos kiekio.

2012/27/ES efektyvumo direktyvos 9 straipsnis numato, kad gyvenamuosiuose daugiabučiuose, kuriems šiluma ir karštas vanduo tiekiami centralizuotu būdu, ne vėliau kaip iki 2016 m. gruodžio 31 d. privalo būti įrengti individualūs suvartojamo šilumos ir karšto vandens kiekio skaitikliai. Jei patiekiamos šilumos kiekiui matuoti individualių šilumos skaitiklių negalima įrengti dėl techninių priežasčių arba šis įrengimas nėra ekonomiškai naudingas, tuomet kiekviename šildymo prietaise suvartotai šilumai įvertinti privalo būti naudojami individualūs šilumos kiekio dalikliai.

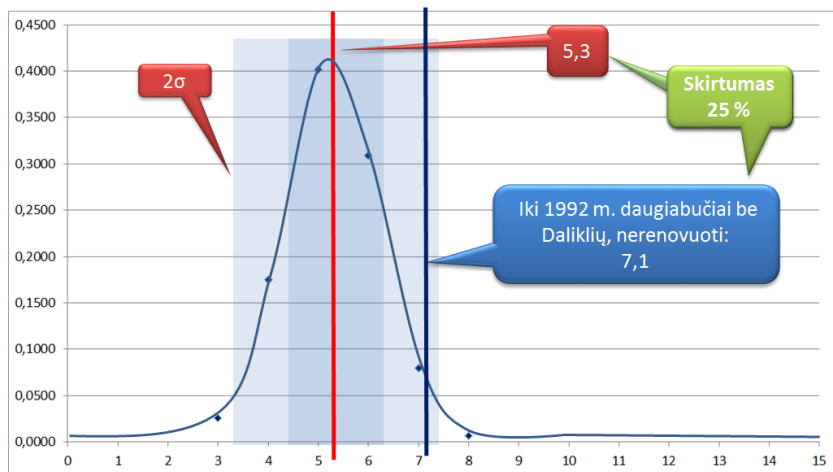
2012/27/ES efektyvumo direktyvos 10 straipsnis numato, kad sąskaitų išrašymas privalo būti grindžiamas faktiškai suvartotu kiekiu. Galutinio vartotojo einamuoju laikotarpiu suvartotos energijos kiekio ir per tą patį praėjusių metų laikotarpį suvartoto energijos kiekio palyginimas. Geriausiai, kad tai būtų pavaizduota grafiškai. Galutiniam vartotojui sąskaitose pateikiama informacija turi būti tiksli ir grindžiama faktiškai suvartotu kiekiu. Šis įsipareigojimas gali būti įgyvendintas reguliaraus savarankiško duomenų registravimo sistema, kurios dėka galutinių vartotojų skaitiklių rodmenys būtų perduodami energijos tiekėjui,

nesunkiai gauti papildomą informaciją dėl ankstesnio vartojimo, kas leistų pačiam galutiniam vartotojui daryti išsamią savikontrolę.

2012/27/ES efektyvumo direktyvos 10 straipsnis numato nesunkiai gauti papildomą informaciją dėl ankstesnio vartojimo, kas leistų pačiam galutiniam vartotojui daryti išsamią savikontrolę, gauti išsamius bet kurios paros, savaitės, mėnesio ar metų vartojimo duomenis. Šie duomenys turi būti prieinami galutiniam vartotojui internetu arba naudojant apskaitos prietaiso sąsają ir turi apimti ne mažiau 24 ankstesnių mėnesių laikotarpį. Sąskaitose, sudaromose sutartyse, sandoriuose ir paskirstymo centruose išduodamuose kvituose arba kartu su jais galutiniam vartotojui būtų aiškiai ir suprantama forma pateikiamas palyginimas su vidutiniu normalizuotu tipiniu arba lyginamuoju tos pačios vartotojų grupės galutiniu vartotoju arba juose būtų pateikiama nuoroda į tokią informaciją ir palyginimą. Galutiniai vartotojai turi turėti galimybę elektroniniu būdu susipažinti su sąskaitose pateikiama informacija ir gauti elektronines sąskaitas.

2012/27/ES direktyvos dėl energijos vartojimo efektyvumo centralizuoto šilumos tiekimo sektoriuje įgyvendinimas galimas pritaikius energijos vartojimo efektyvumą didinančias technines priemones. Pilnas šių priemonių paketo derinys suteikia galimybę pasiekti didesnę energetinę efektyvumą ir gali būti taikomas pavyzdiniu lygmeniu, tačiau svarbu išskirti ir minimalias priemones, kurios suteikia galimybę energetinę efektyvumą pasiekti minimaliu lygmeniu. Atlikta studija rodo, kad rekonstravus pastato vidaus šildymo sistemas, įrengus individualią šilumos ir karšto vandens apskaitą kiekvienam galutiniam vartotojui, potencialiai tipiniam iki 1992 m. statybos daugiabučiui pastatui galima sutaupyti apie 25 % šiluminės energijos. 1 pav. matome energijos vartojimo įvertinimą iki 1992 m. daugiabučiuose pastatuose su dalikliais ir be (be renovuotų ir be naujų) bei 25 % šiluminės energijos vartojimo skirtumą tarp šių pastatų.

**Šildymo ir KV sistemų modernizavimas 2012/27/ES efektyvumo direktyvos kontekste.** Statistiniai duomenys rodo, kad tipinis iki 1992 m. statybos neapšiltintas daugiabutis pastatas vertinant statistinę medianą gali sutaupyti apie 25 % šiluminės energijos, tačiau yra pastatų, kurie sutaupė dar daugiau ir yra pastatų, kurie sutaupė mažiau. Apibendrinant galima teigti, kad konkrečiame pastate sutaupymų dydis priklauso ir kinta nuo to, kiek šiuo metu pastatas yra peršildomas, kokia jo šildymo ir karšto vandens sistemų būklė. Šių potencialių sutaupymų galima pasiekti 1 lentelėje nurodytomis minimaliomis techninėmis priemonėmis.



1 pav. Iki 1992 m. daugiabučiai pastatai su dalikliais ir be jų (be renovuotų ir be naujų)

1 lentelė. Minimalios techninės priemonės

| r. | Priemonė                                                                                                       | Priemonė minimaliam energ. efektyvumui | Priemonė didesniai energ. efektyvumui |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|
| .  | Nepriklausomo tipo šilumos punktas šildymui ir karštam vandeniui ruošti                                        | +                                      | +                                     |
| .  | Šildymo sistemos subalansavimas                                                                                | +                                      | +                                     |
| .  | Karšto vandens sistemos subalansavimas                                                                         | +                                      | +                                     |
| .  | Termostatiniai ventiliai ant pastato šildymo sistemos šildymo prietaisų                                        | +                                      | +                                     |
| .  | Individuali šilumos apskaita kiekvienam pastato vartotojui (šilumos skaitikliai arba šilumos kiekio dalikliai) | +                                      | +                                     |
| .  | Karšto vandens apskaita kiekvienam pastato vartotojui                                                          | +                                      | +                                     |
| .  | Išmanioji pažangioji belaidė apskaitos ir duomenų nuskaitymo sistema                                           | +                                      | +                                     |
| .  | Energetiškai efektyvūs šildymo ir karšto vandens siurbiai                                                      | -                                      | +                                     |
| .  | Šildymo prietaisų pakeitimas efektyvesniais                                                                    | -                                      | +                                     |
| 0. | Ekranai už šildymo prietaisų                                                                                   | -                                      | +                                     |

Investicijų poreikis minimaliomis techninėmis priemonėmis įrengti individualią šilumos apskaitą šilumos kiekio dalikliais yra apie 50 Lt/m<sup>2</sup> arba apie 3000 Lt tipiniam 60 m<sup>2</sup> butui. Darbus būtų galima atlikti per 1 dieną. Tai neužkerta kelio tolesnei pastato atitvarų renovacijai, nes apšiltinus pastato atitvaras, vidaus šildymo ir karšto vandens sistemas vis tiek reikės rekonstruoti pagal naujus poreikius. Tai atlikus iki atitvarų rekonstrukcijos, jos belaukiant jau bus taupoma energija.

**Ekonominis 2012/27/ES direktyvos dėl energijos vartojimo efektyvumo centralizuoto šilumos tiekimo sektoriuje įgyvendinimo vertinimas.** Efektyvumo direktyvos įpareigojimai Lietuvai pagal atskirus sektorius pateikti 2 lentelėje. Iš šios lentelės matome, kad šilumos sektoriui įpareigojimas iki 2020 m. yra 870 GWh, numatytos skirti investicijos 290 mln. Lt/m.

2 lentelė. Efektyvumo direktyvos įpareigojimai pagal sektorius

| Nr. | Pavadinimas                                                        | Elektra | Šiluma | Dujos  |
|-----|--------------------------------------------------------------------|---------|--------|--------|
| 1.  | Galutinis suvartojimas, ktne (2012)                                | 767,2   | 646,8  | 548,1  |
| 2.  | Galutinis suvartojimas, %                                          | 39,1 %  | 33,0 % | 27,9 % |
| 3.  | Bendras įpareigojimų sistemos tikslas be renovacijos iki 2020, GWh | 2,639   |        |        |
| 4.  | Tikslai įpareigotosioms šalims iki 2020, GWh                       | 1032    | 870    | 737    |
| 5.  | Metinis tikslas įpareigotosioms šalims, GWh                        | 172     | 145    | 123    |
| 6.  | Investicijos priemonei, mln. Lt/GWh                                | 2       |        |        |
| 7.  | Investicijos per metus, mln. Lt                                    | 344,0   | 290,0  | 245,7  |
| 8.  | Parama investicijoms per metus, mln. Lt (20 %)                     | 68,8    | 58,0   | 49,1   |

**2012/27/ES direktyvos dėl energijos vartojimo efektyvumo nuostatų įgyvendinimo scenarijai.** Siekiant įvertinti 2012/27/ES direktyvos dėl energijos vartojimo efektyvumo nuostatų įgyvendinimo potencialą, paskaičiuoti skirtingi scenarijai, kokie potencialūs sutaupymai galimi įvertinant investicijų pasiskirstymą laike:

1. Kai investicijos vienkartinės ir atliktos pirmais 2015 m. visiems 30 mln. m<sup>2</sup> pastatų;

2. Kai investicijos atliekamos visiems 30 mln. m<sup>2</sup> pastatų;

3. Kai investicijos atliekamos 50 % pastatų (15 mln. m<sup>2</sup>), investicijos yra vienkartinės ir atliktos pirmais 2015 m.;

4. Kai investicijos atliekamos 50 % pastatų (15 mln. m<sup>2</sup>), tačiau investicijos paskirstomos tolygiai per visus 6 įgyvendinimo metus;

5. Kai investicijos atliekamos 50 % pastatų (15 mln. m<sup>2</sup>), tačiau investicijos paskirstomos tolygiai per pirmus 3 įgyvendinimo metus.

Skirtingi scenarijai pateikti lentelėse. Skaičiavimuose šilumos kaina priimta 26,2 ct/kWh (24 ct/kWh + 9 % PVM). Iš jų matome, kad taikant I-ąjį scenarijų ir įgyvendinant technines priemones visiems 100 % pastatų per pirmuosius 2015 m., iki 2020 m. būtų sutaupoma 4292 GWh vietoje numatytojo 870 GWh tikslo.

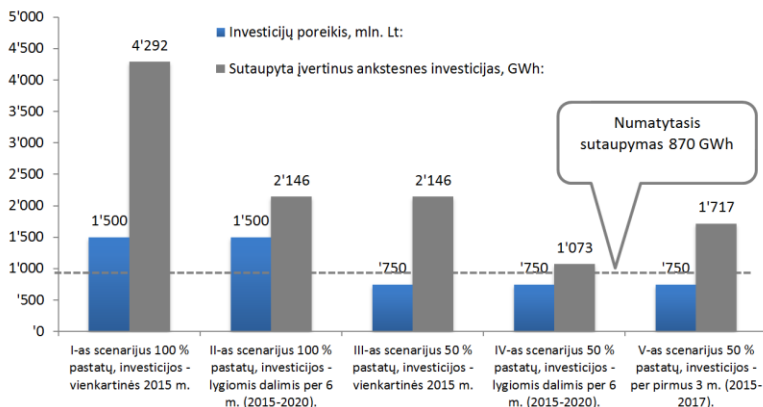
Investicijos priemonei sudaro 0,35 Lt/kWh. Tačiau vertinant faktinį techninių priemonių įdiegimą, išlieka įtemptas šių priemonių diegimo grafikas, nes viską reikėtų įgyvendinti per vienerius metus. Žinant, kad taikant technines priemones reikės paruošti techninius projektus, suderinti darbų atlikimą su kiekvienu gyventoju, šį terminą galima įvardinti kaip įtemptą. Vadovaujantis aukščiau pateiktu pavyzdžiu, šį scenarijų galima būtų identifikuoti kaip optimistinį maksimalų galimą pasiekti potencialiu scenarijumi.

Taikant II-ąjį scenarijų ir įgyvendinant technines priemones visiems 100 % pastatų lygiomis dalimis kiekvienais metais, iki 2020 m. būtų sutaupoma 2146 GWh, vietoje numatytojo 870 GWh tikslo. Investicijos priemonei sudaro 0,70 Lt/kWh. Šį scenarijų galima būtų identifikuoti kaip optimistinį, nes planuojama įdiegti priemones visiems 100 % pastatų. Tačiau vertinant galutinių šilumos vartotojų atžvilgiu, pagal šį scenarijų visiems 100 % pastatų vartotojams būtų įdiegtos techninės priemonės.

Taikant III-ąjį scenarijų ir įgyvendinant technines priemones 50 % pastatų per pirmuosius 2015 m., iki 2020 m. būtų sutaupoma 2146 GWh, vietoje numatytojo 870 GWh tikslo. Investicijos priemonei sudaro 0,35 Lt/kWh. Šį scenarijų galima būtų identifikuoti kaip tinkamą, nes būtų suspėta pasiekti numatytą sutaupymą ir jis būtų net didesnis nei numatyta įpareigotajai šaliai. Tačiau vertinant faktinį techninių priemonių įdiegimą, išlieka įtemptas šių priemonių diegimo grafikas, nes viską reikėtų įgyvendinti per vienerius metus. Žinant, kad taikant technines priemones reikės paruošti techninius projektus, suderinti darbų atlikimą su kiekvienu gyventoju, šį terminą galima įvardinti kaip įtemptą.

Taikant IV-ą scenarijų ir įgyvendinant technines priemones 50 % pastatų lygiomis dalimis, iki 2020 m. būtų sutaupoma 1073 GWh, vietoje numatytojo 870 GWh tikslo. Investicijos priemonei sudaro 0,70 Lt/kWh. Šį scenarijų galima būtų identifikuoti kaip realų, nes nebūtų suspėta pasiekti numatyto sutaupymo įpareigotajai šaliai. Vertinant galutinių šilumos vartotojų atžvilgiu, pagal šį scenarijų techninės priemonės būtų įdiegtos 50 % pastatų vartotojų.

Taikant V-ą scenarijų ir įgyvendinant technines priemones 50 % pastatų per pirmuosius 3 metus (2015–2017 m.), iki 2020 m. būtų sutaupoma 1717 GWh, vietoje numatytojo 870 GWh tikslo. Investicijos priemonei sudaro 0,44 Lt/kWh. Šį scenarijų galima būtų identifikuoti kaip tinkamą, nes būtų suspėta pasiekti numatytą sutaupymą ir jis būtų net didesnis nei numatyta įpareigotajai šaliai. Vertinant galutinių šilumos vartotojų atžvilgiu, pagal šį scenarijų techninės priemonės būtų įdiegtos 50 % pastatų vartotojų. Vertinant faktinį techninių priemonių įdiegimą, šių priemonių diegimo grafikas nėra toks įtemptas ir paskirstytas per 3 metus. Atliktos 2012/27/ES direktyvos dėl energijos vartojimo efektyvumo nuostatų įgyvendinimo scenarijų analizės rezultatai pateikti 2 pav.



2 pav. 2012/27/ES direktyvos dėl energijos vartojimo efektyvumo nuostatų įgyvendinimo scenarijai

### Išvados

1. Naujoje Energijos vartojimo efektyvumo didinimo įpareigojimų schemoje, įpareigosios šalys turėtų įdiegti energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonės galutinių vartotojų pusėje:
  - Individualią vartotojų šiluminės energijos apskaitą šilumos skaitikliais, o ten, kur tai techniškai neįmanoma (vienavamzdėse ir dvivamzdėse sistemose) – dalikliais; šildymo sistemų balansavimą, siekiant užtikrinti 2012/27/ES Direktyvoje 7, 9 ir kituose straipsniuose numatytas nuostatas;
  - Individualią vartotojų karšto vandens apskaitą butuose, karšto vandens sistemų balansavimą, siekiant užtikrinti 2012/27/ES Direktyvoje 7, 9 ir kituose straipsniuose numatytas nuostatas;
  - „Pažangiosios matavimo sistemos“ diegimo priemonės, apimančias energijos transformavimo šaltiniuose sistemas (šilumos punktai ir t. t.), siekiant užtikrinti 2012/27/ES Direktyvos 7, 9, 10 ir kituose straipsniuose numatytas nuostatas;
  - „Pažangiosios matavimo sistemos“ diegimo priemonės, siekiant užtikrinti 2012/27/ES Direktyvos 10 ir kituose straipsniuose numatytas nuostatas dėl sąskaitose pateikiamos informacijos.
  - „Pažangiosios matavimo sistemos“ diegimo priemonės, apimančias energijos perdavimo sistemas, siekiant užtikrinti 2012/27/ES Direktyvos 7, 9, 10 ir kituose straipsniuose numatytas nuostatas.
2. Atlikta studija rodo, kad rekonstravus pastato vidaus šildymo sistemas, įrengus individualią šilumos ir karšto vandens apskaitą kiekvienam galutiniam vartotojui, potencialiai tipiniam iki 1992 m. statybos daugiabučiui pastatui

- galima sutaupyti apie 25 % šiluminės energijos. Statistiniai duomenys rodo, kad tipinis iki 1992 m. statybos neapšiltintas daugiabutis pastatas, vertinant statistinę medianą, gali sutaupyti apie 25 % šiluminės energijos, tačiau yra pastatų, kurie sutaupė dar daugiau ir yra pastatų, kurie sutaupė mažiau. Konkrečiame pastate sutaupymų dydis priklauso ir kinta nuo to, kiek šiuo metu pastatas yra peršildomas, kokia jo šildymo ir karšto vandens sistemų būklė.
3. Šių potencialių sutaupymų galima pasiekti šiomis minimaliomis techninėmis priemonėmis:
    - 3.1. Nepriklausomo tipo šilumos punkto įrengimas šildymo ir karšto vandens ruošimui;
    - 3.2. Šildymo sistemos subalansavimas;
    - 3.3. Karšto vandens sistemos subalansavimas;
    - 3.4. Termostatinį ventilių ant pastato vidaus šildymo sistemos šildymo prietaisų įrengimas;
    - 3.5. Individualios šilumos apskaitos kiekvienam pastato vartotojui įrengimas;
    - 3.6. Karšto vandens apskaitos kiekvienam pastato vartotojui įrengimas;
    - 3.7. Įrengiant išmaniąją pažangiąją belaidę apskaitos ir duomenų nuskaitymo sistemą. Šią sistemą galima įrengti senus šilumos apskaitos prietaisus pasibaigus jų eksploatacijos terminui keičiant į naujus išmaniuosius.
  4. Svarbu pažymėti, kad minimalių techninių priemonių taikymas pastate privalo būti įgyvendinamas visiškai visų šių priemonių apimtimi. Vien tik šildymo ir karšto vandens sistemų stovų subalansavimas ir termostatinį ventilių įrengimas laukiama viso pastato energijos vartojimo sutaupymo neduos, nes gyventojai neturės motyvacijos sau prisukti termostatinčius ventilius ir taupyti šiluminę energiją, jei mokėjimai išliks paskirstomi pagal pastato plotą. Šiam tikslui, siekiant gauti viso pastato energijos vartojimo sutaupymą, individualios kiekvieno šildymo prietaiso apskaitos įrengimas yra privalomas. Reikia pažymėti, kad pagal 2012/27/ES Direktyvos nuostatas daugiabučiuose ir daugeliui paskirčių naudojamuose pastatuose, kuriuose yra centrinis šilumos/vėsumos tiekimo šaltinis arba kuriuos aptarnauja centralizuoto šilumos tiekimo tinklas ar centrinis daug pastatų aptarnaujantis šaltinis, ne vėliau kaip 2016 m. gruodžio 31 d. turi būti įrengti individualaus suvartojimo skaitikliai, kuriais, jei tai techniškai įmanoma ir ekonomiškai veiksminga, būtų matuojamas kiekvienos patalpos šilumos, vėsumos ar karšto vandens suvartojimas. Jei šilumai matuoti individualių skaitiklių naudoti neįmanoma dėl techninių priežasčių arba tai nėra ekonomiškai veiksminga, kiekviename radiatoriuje suvartotai šilumai matuoti naudojami individualūs šilumos kiekio dalikliai. Individualius šilumos kiekio daliklius įrengti techniškai įmanoma visuose daugiabučiuose pastatuose, tačiau įrengimo konkrečiame pastate ekonominį pagrįstumą galima įvertinti pagal potencialių sutaupymų neapibrėžtumo analizę ir to konkretaus pastato faktinį šiluminės energijos

vartojimą. Taip pat svarbu pažymėti, kad karšto vandens skaitiklių pakeitimas į šiuolaikinius antimagnetinius karšto vandens skaitiklius su vienalaikio rodmenų nuskaitymo galimybe taip pat stipriai prisideda prie bendro šiluminės energijos sutaupymo pastate (bendrojoje 25 % potencialioje sutaupymų skaitinėje reikšmėje jis yra įvertintas), nes nebelieka nesąžiningų gyventojų bei vartotojų, kurių suvartotas ir jų butuose neapskaitytas karšto vandens kiekis pagal galiojančią šilumos paskirstymo metodiką pagal plotą yra paskirstomas visiems butams proporcingai, tai priskiriant prie šilumos kiekio patalpoms šildyti.

5. Siekiant įdiegti energijos efektyvumo technines priemones ir tinkamai bei laiku pasiekti 2012/27/ES Direktyvoje numatytus efektyvumo tikslus, reikia pagal pateiktus įgyvendinimo scenarijus pasirinkti realiausiai laiko atžvilgiu įgyvendinamą scenarijų, atkreipiant dėmesį ir į tai, kokios būtų taikomos investicijos bei kokią didžiausią naudą galutiniams vartotojams suteikia atitinkamas scenarijus po jo įgyvendinimo laikotarpio.

### Literatūra

1. CŠT istorija. Prieiga internete: <http://www.lsta.lt/lt/pages/cstistorija>.
2. Kveselis, V.; Tamonis, M. Centralizuoto šilumos tiekimo konkurencingumo problemos: naujų technologijų iššūkis. Energetika, 2006, Nr. 3. p. XX-YY.
3. LR ūkio ministro 1999 m. gruodžio 21 d. įsakymas Nr. 424 dėl Šilumos energijos ir šilumnešio kiekio apskaitos taisyklių patvirtinimo, V/Ž., 1999, Nr. 112-3270;
4. Automatizuoti šilumos punktai [interaktyvus]. Prieiga internete: < <http://www.axis.lt/lt/grupes-imonos/axis-industries/silumos-ir-vandens-apskaita-reguliavimas/kat/automatizuoti-silumos-punktai-ir-komplektacija/automatizuoti-silumos-punktai.html> >
5. Lietuvos šilumos tiekėjų asociacija. Šilumos tiekimo bendrovių 2013 metų ūkinės veiklos apžvalga. Vilnius: Baltijos kopija, 2014;
6. Gudžinskas, J., Lukoševičius, V., Martinaitis, V., Tuomas, E. Šilumos vartotojo vadovas. Vilnius: Standartų spaustuvė, 2011
7. Kuro kainos [interaktyvus]. Prieiga internete: < <http://www.lsta.lt/lt/pages/apie-silumos-uki/kuro-kainos> >;
8. Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija. 2013 metų veiklos ataskaita. Vilnius, 2014;
9. Karbauskaitė J. Energijos vartojimo pastatuose efektyvumo didinimo svarba (pranešimas), Kaunas: KTU Architektūros ir statybos institutas;
10. Holmström P., Customer in focus – case prisdialogen (pranešimas), Helsinkis, Suomija, Svensk Fjärrvarme 2014 m.;

11. LR aplinkos ministro 2003 m. gruodžio 24 d. įsakymas Nr. 705 dėl Statybos techninio reglamento str. 2.02.01:2004 „Gyvenamieji pastatai“ patvirtinimo, V/Ž., 2004, Nr. 23-721;
12. LR energetikos ministro 2014 m. gegužės 30 d. įsakymas Nr. 1-149, Dėl energijos vartojimo efektyvumo veiksmų plano patvirtinimo;
13. LR Seimas, Dėl nacionalinės energetinės nepriklausomybės strategijos patvirtinimo, 2012 m. birželio 26 d. Nutarimas Nr. XI-2133, Vilnius;
14. Lietuvos higienos norma HN 42: 2009 Gyvenamųjų ir visuomeninių pastatų patalpų mikroklimatas, V/Ž., 2009 m. Nr. 159–7219;
15. Direktyva 2006/32/EB 2006 m. balandžio 6 d. dėl energijos galutinio vartojimo efektyvumo ir energetinių paslaugų, panaikinanti Tarybos direktyvą 93/76/EEB;
16. Direktyva 2012/27/ES 2012 m. spalio 25 d. dėl energijos vartojimo efektyvumo, kuria iš dalies keičiamos direktyvos 2009/125/EB ir 2010/30/ES bei kuria panaikinamos direktyvos 2004/8/EB ir 2006/32/EB;
17. Direktyva 2010/31/ES 2010 m. gegužės 19 d. dėl pastatų energinio naudingumo;
18. UAB „Cowi Lietuva“ ataskaita Energijos vartojimo efektyvumo įpareigojimų sistemos, 2012/27/ES direktyvos kontekste, sudarymas. 2013;
19. UAB „Cowi Lietuva“ ataskaita Maksimalių šilumos suvartojimo normų daugiabučių namų butams ir kitoms patalpoms šildyti įvertinimas, 2013 m. liepos 12 d.;
20. RSN 156-94 Statybinė klimatologija. Vilnius: 1995;
21. Gedgaudas M., Šležas A., Švedrauskas J., Tuomas E. Šilumos tiekimas. Vilnius: Aušra, 1992;
22. Čiuprinskienė J., Čiuprinskas K. Pastato šildymo sistemos projektavimas, Vilnius: Technika, 2006;
23. LR šilumos ūkio įstatymas, V/Ž., 2003, Nr. 51-2254 (aktuali red. nuo 2014-05-17);
24. Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba prie Aplinkos ministerijos [interaktyvus]. Prieiga internete < <http://www.meteo.lt/> >;
25. UAB „Danfoss“. Techninis žinynas šildymo sistemų modernizavimui. 2014;
26. UAB „Danfoss“. 10 sėkmingos renovacijos istorijų. 2013;
27. Запорная и регулирующая арматура [interaktyvus]. Prieiga internete < <http://sanitarywork.ru/text/razdel-ii-tsentralnoe-otoplenie/60-zapornaya-i-reguliruyuschaya-armatura> >;
28. Sėkmingos renovacijos pavyzdys - Marijonų g. 31 - 31A [interaktyvus]. Prieiga internete < <http://www.leka.lt/straipsniai/sėkmingos-renovacijos-pavyzdys-marijonu-g-31-31a> >;
29. Wikipedia „Smart meter“ [interaktyvus]. Prieiga internete < [http://en.wikipedia.org/wiki/Smart\\_meter](http://en.wikipedia.org/wiki/Smart_meter) >;
30. Valstybinės kainų ir energetikos kontrolės komisijos 2010 m. liepos 27 d. nutarimas Nr. O3-133 „Dėl Nupirkto šilumos ar kitos energijos kiekio

- nustatymo pagal normas, kai prieš karšto vandens ruošimo įrenginius šilumos apskaitos prietaiso nėra arba jis sugedęs, metodikos patvirtinimo“, V/Ž., 2010, Nr.92-4901;
31. Komisijos komunikatas Europos parlamentui ir tarybai, Energijos vartojimo efektyvumo direktyvos įgyvendinimas. Komisijos gairės, Briuselis, 2013 11 06, COM(2013) 762 final;
  32. Grundfos Pumps Baltic, Efektyviai ir taupiai veikiantys cirkuliaciniai siurbiai, 2014;
  33. Grundfos Pumps Baltic, Grundfos sprendimai šilumos punktams, 2014;
  34. Grundfos Pumps Baltic, Siurblių veikimo optimizavimas, 2014;

### **Implementation of the provisions of directive 2012/27/EU on energy efficiency at minimal cost in the district heating sector**

#### **Summary**

This paper is aimed at presenting the evaluation of the provisions set forth in Article 7 (Energy efficiency obligation schemes), Article 9 (Metering), Article 10 (Billing information), Article 11 (Cost of access to metering and billing information) and other articles of Directive 2012/27/EU on energy efficiency in relation to implementation of the provisions governing energy efficiency at minimal cost in the district heating sector, the potential of implementation of the obligations set out in the Directive in terms of installation of individual metering with economic, technical evaluation and justification. On the basis of the carried out study, potential technical measures aimed at implementation of the objectives of the afore-mentioned directive have been prepared.

## Šilumos siurblio, saulės kolektorių ir saulės elementų sistemos modeliavimas

Giedrė Streckienė

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

**Įvadas.** Pastato gyvavimo ciklo esminiai etapai yra jo sukūrimas, susidedantis iš projektavimo ir statybos, bei naudojimas. Statinio ir jo inžinerinių sistemų projektavimas turi didžiulės įtakos galutiniam rezultatui. Naudojimo etape, kuomet siekiama sukurti komfortines sąlygas ir pastatas prižiūrimas, suvartojamas didžiausias energijos kiekis, sudarantis 80–85 % visos pastato gyvavimo cikle sunaudojamos energijos. Be to, šio etapo metu išsiskiria per 50 % šiltnamio dujų emisijų [1, 2]. Atsižvelgiant į tai, pastato naudojimo etapui turi būti skiriama itin daug dėmesio ir jau projektavimo metu reikėtų įvertinti galimybes sumažinti energijos poreikius ateityje.

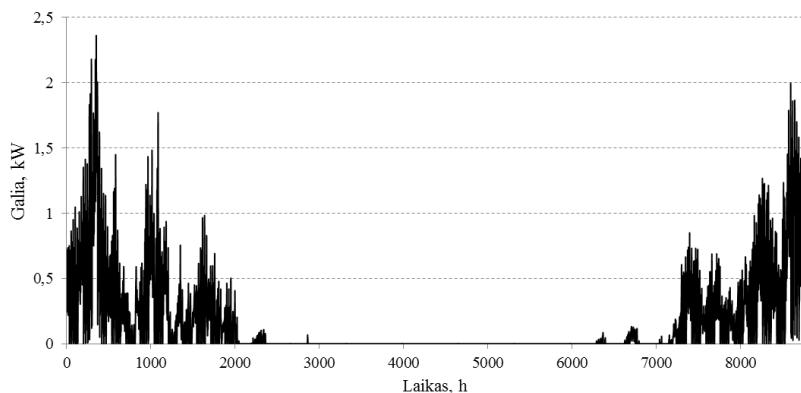
Siekiant tvarios energetikos tikslų, pastatų sektoriuje vis dažniau nagrinėjamos galimybės integruoti atsinaujinančios energijos išteklių technologijas aprūpinant pastatus energija. Taip pat kuriant nulinės bei beveik nulinės energijos pastatus, akcentuojamos dvi pagrindinės strategijos, tai: energijos efektyvumo priemonės ir atsinaujinančios energijos technologijos [3, 4].

Šiame tyrime pateikiami mažoenergetinio vienabučio pastato poreikių užtikrinimo, naudojant atsinaujinančios energijos transformatorius, modeliavimo rezultatai. Sudarant skaičiuojamąjį techninių sistemų modelį siekiama, kad bus naudojama tik sklaidoje disponuojama atsinaujinanti energija. Nustačius šilumos (patalpas šildyti, vėdinti ir tiekti karštą vandenį) ir elektros poreikius, pasirinktos tokios technologijos: šilumos siurblys, plokštieji saulės kolektoriai ir saulės elementai.

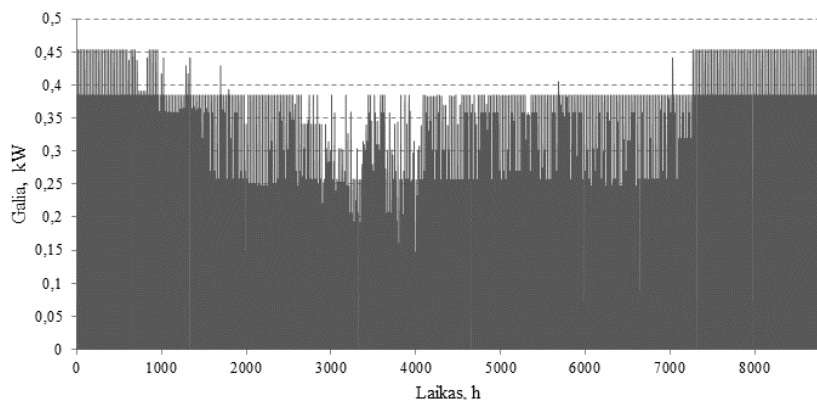
**Tyrimo metodika ir pagrindinės prielaidos.** Vienabučio tipo pastatas sumodeliuotas DesignBuilder programa. Tai yra vieno aukšto pastatas (naudingasis plotas 81 m<sup>2</sup>, jame išdėstytas tambūras, virtuvė su prieškambariu ir svetaine, du miegamieji ir vonios kambarys), kurio konstrukcijos parenkamos vadovaujantis galiojančiais reikalavimais A+ klasės pastatams [5]. Išorinių sienų visuminis šilumos perdavimo koeficientas  $U = 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$ , stogo  $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , grindų ant grunto  $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ , langų stiklo  $U = 0,72 \text{ W/m}^2\text{K}$ , o rėmo  $U = 0,94 \text{ W/m}^2\text{K}$ , išorinių durų  $U = 0,75 \text{ W/m}^2\text{K}$ , pamatų  $U = 0,57 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Kadangi pastatas atitinka A+ klasei keliamus sandarumo reikalavimus, jam numatyta privaloma vėdinimo sistema su šilumos atgavimu. Bendra šviežio oro apykaita pastate 0,6 l/h. Vėdinimo sistema tiekia šviežią orą tada, kai pastate yra žmonių, kitomis valandomis ji veikia recirkuliacijos režimu.

Šio pastato metinis šilumos poreikis yra 17,3 kWh/m<sup>2</sup>, elektros poreikis patalpas apšviesti 11 kWh/m<sup>2</sup>. Turint sumodeliuoto pastato valandinių energijos poreikių kitimo per metus rezultatus (1 pav. pavaizduoti šilumos poreikiai patalpas

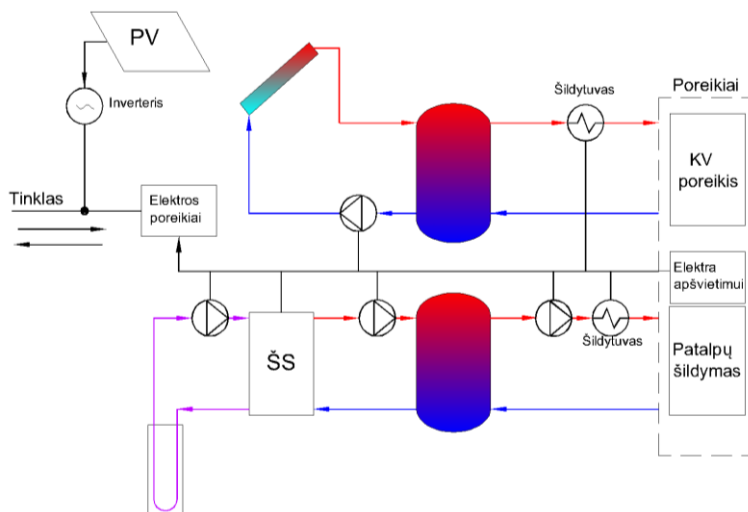
šildyti ir vėdinti, o 2 pav. elektros poreikiai patalpas apšviesti), jie perduodami tolesniam tyrimui – parinkti atsinaujinančios energijos technologijas ir nustatyti koks papildomas energijos poreikis reikalingas šioms sistemoms veikti. Tai atliekama TRNSYS programa [6], kuria galima lanksčiai modeliuoti ir tirti įvairių sistemų (tiek naudojančių atsinaujinančią energiją, tiek ir iškastinį kurą) veikimo parametrus [7–9]. Principinė toliau nagrinėjamų technologijų schema pateikiama 3 paveiksle.



1 pav. Metiniai pastato šilumos poreikiai šildyti ir vėdinti



2 pav. Elektros poreikio patalpas apšviesti kitimas per metus sumodeliuotas DesignBuilder



3 pav. Šilumos siurblio, saulės kolektorių ir saulės elementų nagrinėjama principinė schema

Nagrinėjant šio mažoenergio pastato šilumos poreikius, pastebima tokia pati tendencija kaip ir kitų tokio tipo pastatų, t. y., šilumos poreikiai patalpas šildyti mažėja, tačiau išauga poreikis jas vėdinti. Todėl vėdinimo sistemos mažoenergiuose pastatuose yra vienas pagrindinių energijos naudotojų bei komforto patalpose formuotojų. Karšto vandens ruošimo sistemai bei elektros sistemoms mažoenergiuose pastatuose energijos poreikiai nemažėja, todėl modeliuojant būtina į tai atsižvelgti.

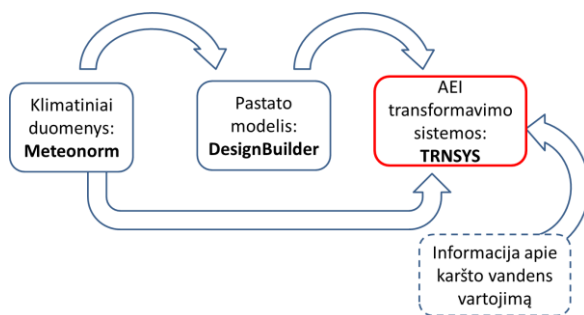
Viena pagrindinių prielaidų šiame modeliavime – tai panaudoti pastato sklype disponuojamą atsinaujinančią energiją. Pasirinktos technologijos tiriamojo vienabučio pastato atveju yra šios: šilumos siurblys (gruntas-vanduo), naudojami du vertikalūs gręžiniai, plokštieji saulės kolektoriai ir saulės elementai gaminti elektrai. Šilumos siurblio technologija taikoma tik padengti pastato šilumos poreikius patalpoms šildyti ir vėdinti, norint užtikrinti reikalingas mikroklimato sąlygas vienabutyje gyvenantiems asmenims. Šiame kontūre numatyta 400 l karšto vandens akumuliacinė talpykla su 2 kW papildomu elektriniu šildytuvu. Saulės kolektoriai modeliuojami ruošti tik buitinį karštą vandenį. Šiame saulės kolektorių kontūre įrengta taip pat karšto vandens akumuliacinė talpykla, kurios tūris 300 l. Numatoma, kad joje bus įmontuotas 5 kW elektrinės galios šildytuvai.

Elektros gamybos saulės elementuose atveju taikoma dvipusės elektros apskaitos sistema. Tokiu atveju, nesant vartotojo elektros poreikio, ji parduodama į elektros tinklą, o neužtenkant elektros gamybos iš saulės elementų, ji yra perkama iš

elektros tinklų. Bendrame metiniame elektros balanse siekiama, kad metinė elektros gamyba saulės elementuose būtų lygi vartotojo poreikiams arba didesnė. Šilumos gamybos atveju, šilumos mainų su išorės tinklais nėra. Šios dvi krašutinės sąlygos elektrai ir šilumai sudaro pagrindinius modelio apribojimus.

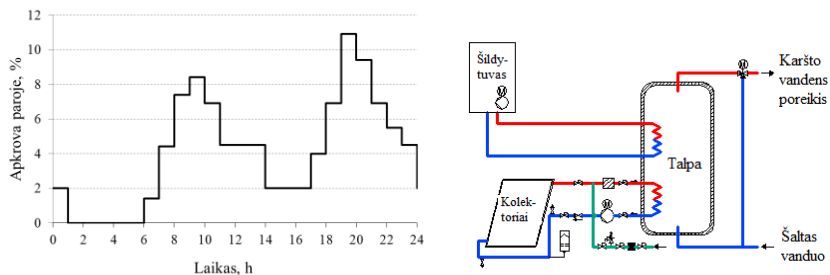
Sudarant pastato modelį DesignBuilder programa ir techninių sistemų modelį TRNSYS modeliavimo priemone, naudojami tie patys klimato duomenys. Jie gaunami Meteororm programa sugeneruojant TMY2 (angl. *Typical Meteorological Year* – tipinių meteorologinių metų) formato bylą TRNSYS modeliui ir \*.EPW formatą DesignBuilder modeliui. Taip perduodama esminė informacija apie pagrindinius klimato parametrus pasirinktoje vietovėje: valandiniai saulės spinduliuotės, išorės oro temperatūros ir drėgmės duomenys, kurie yra svarbūs modeliuojant pastato ir jo sistemų veikimo režimus tiek šiltuoju, tiek šaltuoju metų laiku. Pagrindinio varianto modeliavimo atveju priimama, kad pastatas stovi sklype, esančiame priemiesčio neužstatytoje teritorijoje. Sklypo centro koordinatės (WGS – angl. *World Geodetic System*): 54.7917 ir 25.2775.

Naudojamų kompiuterinių priemonių visuma ir jų informacijos srautai šiam tyrimui pateikti 4 paveiksle.



4 pav. Modeliui sudaryti naudojami informacijos srautai ir kompiuterinės priemonės (santrumpa AEI – atsinaujinantis energijos ištekliai)

Informacija apie karšto vandens vartojimą papildomai integruojama į TRNSYS modeliavimo priemonę. Tyrimui priimama, kad energijos poreikis karštam vandeniui ruošti per metus sudaro 3 820 kWh. Tada vidutinis karšto vandens poreikis per parą, tenkantis vienam asmeniui, sudaro 50 l arba 200 l keturių asmenų šeimai. Paros karšto vandens kitimo kreivė sudaryta taikant plačiai moksliniuose straipsniuose paplitusį pasiskirstymą gyvenamuosiuose pastatuose (5 pav.) [10]. 5 paveiksle pavaizduotas karšto vandens procentinis kitimas pastate bei principinė šios sistemos schema.

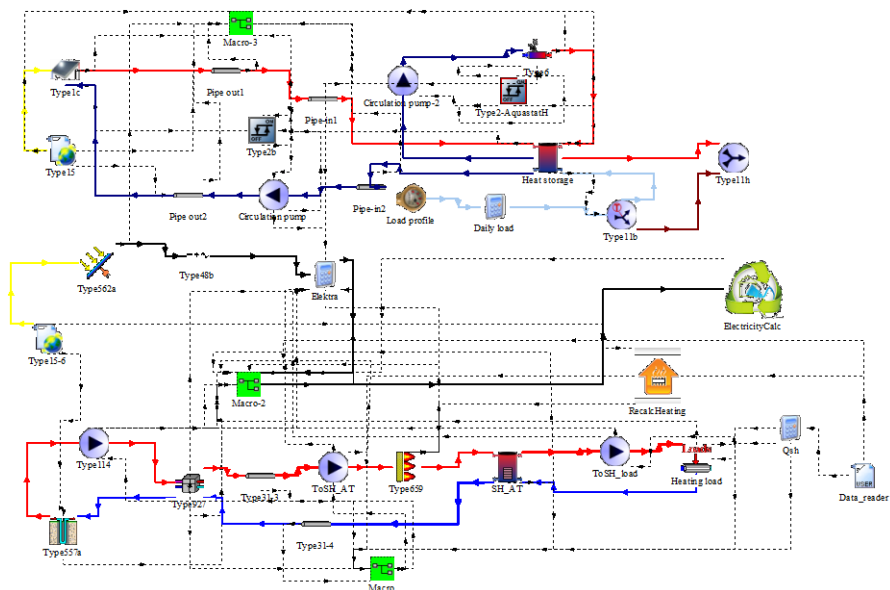


5 pav. Karšto vandens poreikio kitimo grafikas ir karšto vandens ruošimo sistemos principinė schema

Ruošiamo karšto vandens temperatūra priimama, kad yra  $55^{\circ}\text{C}$ , o vidutinė šalto vandens temperatūra –  $10^{\circ}\text{C}$ . Analizuojamą karšto vandens sistemą sudaro plokštieji saulės kolektoriai, cirkuliaciniai siurbliai, akumuliacinė talpykla, papildomas šildytuvas, valdymo vožtuvai bei valdikliai. Plokščiųjų saulės kolektorių pagrindinės charakteristikos taikomos pagal atliktą Fraunhofer instituto ataskaitą [11]. Pagrindinių modeliuose esančių komponentų charakteristikos yra šios: saulės kolektorių plotas –  $7,21 \text{ m}^2$  (absorberio plotas  $6,27 \text{ m}^2$ ), specifinis debitas saulės kolektorių kontūre  $40 \text{ l/h/m}^2$ . Nustatant sistemos vamzdynų nuostolius, priimama, kad patalpose esančių vamzdynų ilgis  $15 \text{ m}$ , lauke –  $15 \text{ m}$ , šiluminės izoliacijos storis  $25 \text{ mm}$  ( $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$ ). Siekiant įvertinti šiluminę akumuliacinės talpyklos stratifikaciją, jos tūris padalijamas į 12 vienodo dydžio sluoksnių.

TRNSYS modeliavimo priemone sudarytas integruotas atsinaujinančių energijos technologijų modelis, apjungiantis skirtingas sistemas, pavaizduotas 6 paveiksle. Baziniu variantu modeliuojamą sistemą sudaro tokie įrenginių dydžiai: šilumos siurblys ( $3,3 \text{ kW}$  šiluminės galios, modeliuojami du vertikalūs gręžiniai, kurių bendras ilgis kinta nuo  $120 \text{ m}$  iki  $180 \text{ m}$ , bazinio varianto atveju –  $6 \text{ m}$  tarp gręžinių), saulės elementų plotas keičiamas  $20\text{--}50 \text{ m}^2$  ribose (bazinio varianto atveju –  $20 \text{ m}^2$ ). Tiek saulės kolektorių, tiek saulės elementų posvyrio kampas  $40^{\circ}$ . Atskiruose hidrauliniuose kontūruose parinkti atitinkamo dydžio cirkuliaciniai siurbliai, kurių elektros poreikis vertinamas skaičiavimuose. Taip pat skaičiuojama ir vertinama, kad dėl cirkuliacinių siurblių veikimo sistemoje tekantis fluidas gauna šilumos. Visa tai padeda sudaryti sistemos energinius balansus (šilumos ir elektros).

**Rezultatai ir jų aptarimas.** Atlikus nagrinėjamos sistemos modeliavimą, nustatyti tokie rodikliai: šilumos siurblys pateikė per metus  $1\,304,7 \text{ kWh}$  šilumos ir savo veikimui sunaudojo  $329,6 \text{ kWh}$  elektros. Papildomo šildytuvo energijos poreikis tik  $1 \text{ kWh}$  per metus. Saulės kolektoriai į sistemą per metus patiekė  $2340,9 \text{ kWh}$  energijos, o papildomo šildytuvo sąnaudos karštam vandeniui –  $2058,5 \text{ kWh}$ .

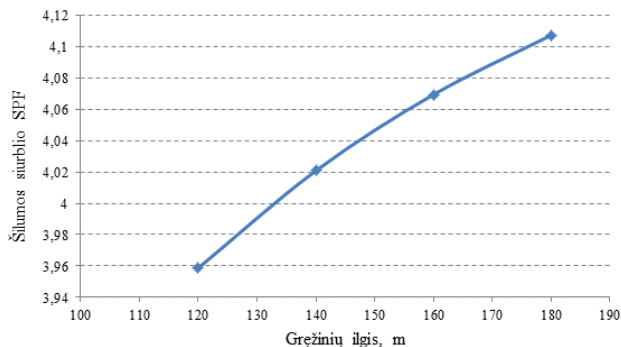


6 pav. Nagrinėjamos sistemos modelis TRNSYS modeliavimo priemone

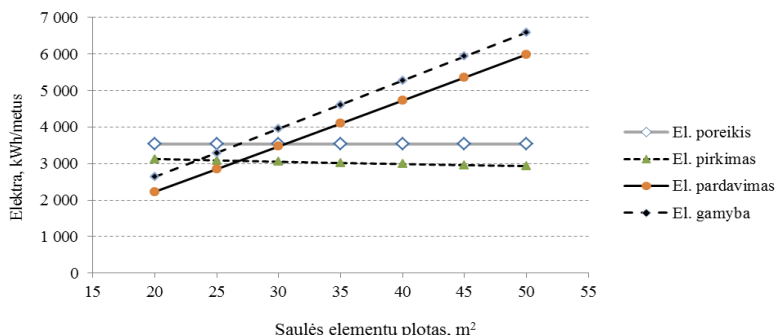
Bendras elektros poreikis apšvietimui ir inžinerinių sistemų veikimui sudaro 3544,0 kWh/metus, iš elektros tinklo nupirkta 3136,2 kWh elektros, o parduota į tinklą – 2228,9 kWh. Elektros gamyba saulės elementuose sudaro 2636,7 kWh/metus.

Vertinant atstumą tarp skirtingo gylio gręžinių, nustatyta, kad šilumos siurblys per metus pagamina daugiausiai šilumos, kai gręžinių ilgis 180 m (apie 1310,4 kWh/metus), o mažiausiai – esant 120 m bendram gręžinių ilgiui – 1304,9 kWh/metus. Atstumas tarp gręžinių nuo 6 m iki 10 m, šiuo atveju įtakos neturėjo. Pagal nagrinėjamo sklypo vietovės bei pastato duomenis atstumas tarp gręžinių nebuvo mažinamas mažiau nei 5 m, kad būtų efektyviai išnaudojama grunto šiluma. Apskaičiuota, kad tos pačios galios šilumos siurbliui veikiant su gilesniais gręžiniais, elektros poreikis sumažėja (3–7 kWh/metus). 7 paveiksle pateiktas šilumos siurblio sezoninio efektyvumo faktorius (SPF – angl. *Seasonal Performance Factor*) priklausomumas nuo gręžinių bendro ilgio. Iš grafiko matyti, kad didžiausias šilumos siurblio SPF buvo pasiektas modeliuojant sistemą su 180 m bendro ilgio gręžiniais.

Atsižvelgiant į galimybes sklype įrengti didesnę saulės elementų plotą, jis buvo padidintas nuo 20 m<sup>2</sup> iki 50 m<sup>2</sup>, keičiamas kas 5 m<sup>2</sup> (8 pav.). Buvo stebima, kada metinis elektros poreikis pastato patalpų apšvietimui ir inžinerinėms sistemoms taps lygus ar viršys metinę elektros saulės elementuose.



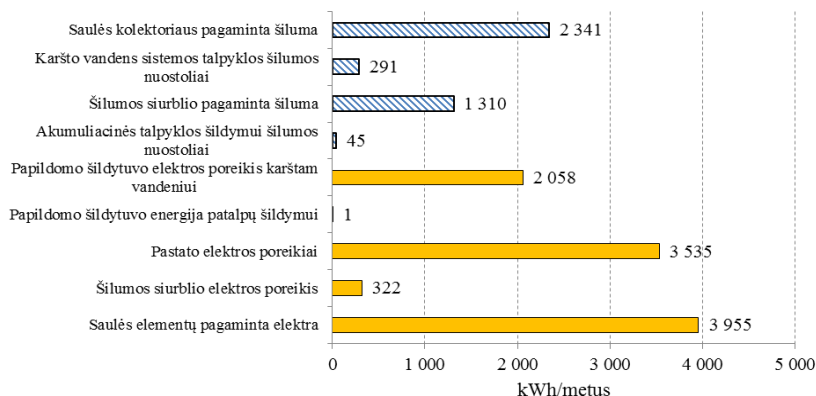
7 pav. Šilumos siurblio SPF priklausomumas nuo gręžinių gylis



8 pav. Elektros poreikis, jos pirkimas, pardavimas bei gamyba saulės elementuose

Nagrinėjamu atveju galima matyti, metinė elektros gamyba sklype bei metinis elektros poreikis tampa lygūs, kai įrengiamas 27 m<sup>2</sup> saulės elementų plotas. Toliau didinant saulės elementų plotą, didėja elektros pardavimas. Atsižvelgiant į tai, kad pastatuose elektros energijos poreikis būtų didesnis papildomai įskaičiuojant buitinių prietaisų elektros sunaudojimą, saulės elementų plotą reikėtų didinti ir ieškoti konkrečiam atvejui sprendinio.

Vienabučio pastato metinis energijos poreikių ir gamybos kiekių pasiskirstymas įrengus nagrinėjamą šilumos siurblio sistemą su dviem 80 m gręžiniais (bendras ilgis 160 m), 7,21 m<sup>2</sup> saulės kolektorių ir 30 m<sup>2</sup> saulės elementų pateiktas 9 paveiksle. Analizuojamu atveju pastato šilumos poreikis šildymo sistemai sudaro 1363,8 kWh/metus, apšvietimui – 668,9 kWh/metus, karštam vandeniui – 3820 kWh/metus.



9 pav. Šilumos ir elektros poreikiai ir gamyba

Matyti, kad šilumos siurblys praktiškai užtikrina šilumos poreikius patalpas šildyti ir vėdinti, papildomai dar 100 kWh/metus šilumos patenka į šildymo sistemą dėl cirkuliacinių siurblių veikimo ir tik 1 kWh/metus iš papildomo elektrinio šildytuvo. Karšto vandens gamybos atveju saulės kolektoriai padengia 53 % poreikio, o likusi dalis – papildomo elektrinio šildytuvo. Visus elektros poreikius (techninių sistemų ir apšvietimo) užtikrina saulės elementai, taikant dvipusės apskaitos sistemą. Išnagrinėjus šilumos siurblio, saulės kolektorių ir saulės elementų integruotą sistemą, matyti, kad TRNSYS aplinkoje galima išsamiai tirti įvairių sistemų veikimo parametrus.

**Sklypo vietovės įtakos vertinimas.** Meteorologinė programa papildomai buvo sugeneruoti duomenys dar dviem sklypams Lietuvos teritorijoje. Šiuo atveju palyginti sistemų veikimo duomenys esant pirmojo sklypo atvejui su kitais galimais sklypais. Pirmojo sklypo, esančio priemiesčio atviroje teritorijoje, centro koordinatės išlieka tokios pačios (WGS 54.7917, 25.2775). Antrasis sklypas yra pajūrio zonoje, miškingoje vietovėje (WGS 55.7486, 21.088), o trečiasis – miesto teritorijoje, mažaaukščių namų vietovėje (WGS 54.6286, 25.2512). Tokie patys klimatiniai duomenys naudojami tiek DesignBuilder, tiek TRNSYS modeliavimo priemonėse. Šilumos siurblio ir saulės kolektorių sistemų parametrai aprašyti anksčiau, o saulės elementų plotas šiame vertinime pasirenkamas 30 m<sup>2</sup>. Tai leidžia metiniame elektros balanse turėti didesnę elektros gamybą saulės elementuose nei reikia elektros apšviesti patalpas ir eksploatuoti inžinerines sistemas, nes papildomai įrengtas elektrinis šildytuvas karšto vandens ruošimo sistemoje sunaudoja nagrinėjamu atveju net 2058 kWh/metus.

Esant vienodos konstrukcijos ir geometrijos pastatams, pastatytiems skirtinguose sklypuose, nustatyta, kad atsinaujinančios energijos didžiausias išnaudojimas gautas pirmojo sklypo atveju, t. y. šilumos siurblys su dviem vertikaliais (80 m) gręžiniais pateikia apie 1310 kWh/metus, antrojo sklypo atveju –

1189 kWh/metus ir trečiojo sklypo atveju – 1267 kWh/metus. Šilumos siurblio sunaudojama elektros energija tarp skirtingų variantų skiriasi 2–7%. Saulės kolektorių pagamintas ir patiektas į sistemą šilumos kiekis tarp skirtingų variantų skiriasi 3–7%.

Pastato esančio pirmajame sklype atveju elektros poreikis (sistemai ir dirbtiniam apšvietimui) mažesnis 3 % negu antrajame sklype ir 2 % negu trečiajame sklype. Tai leido sumažinti perkamos elektros kiekį per metus 4 % pirmajame sklype lyginant su antruoju ir 3 % lyginant su trečiuoju. Taip nutinka, nes pirmajame sklype pagaminamas elektros kiekis esant tokiam pačiam saulės elementų plotui yra beveik 10 % didesnis negu antrojo sklypo ir 5 % didesnis nei trečiojo sklypo.

Pagal gautus TRNSYS ir kitų programų integruoto modeliavimo rezultatus matyti, kad sklypo pasirinkimas gali turėti įtakos atsinaujinančių energijos išteklių panaudojimui taikant tokias pačias energijos transformavimo sistemas.

### Išvados

1. Pastato techninių sistemų modeliavimas apima nuo atsinaujinančių energijos išteklių disponavimo iki energetinės paslaugos pastate. Šioje grandinėje buvo nagrinėjami disponuojami sklype atsinaujinantys energijos ištekliai, jiems taikomos transformavimo technologijos ir gauti energetiniai rodikliai, užtikrinantys pastato poreikius. Nustatyta, kad modeliavimo metu disponuojama gerokai didesniu informacijos kiekiu TRNSYS modeliavimo priemonėje lyginant su atveju, kuris galėtų būti pateikiamas nesudėtingoje analizėje.
2. Vienbučio gyvenamojo namo modelio, sudaryto TRNSYS programa, tyrime nustatyta, kad gruntas-vanduo šilumos siurblys gali praktiškai užtikrinti visus šilumos poreikius šildyti ir vėdinti mažaenergio pastato patalpas. Plokštieji saulės kolektoriai padengia apie 53 % karšto vandens poreikio per metus. O visa reikalinga elektros energija gali būti pasigaminama įrengus saulės elementus taikant dvipusės apskaitos sistemą.

### Literatūra

1. Cabeza, L. F., Rincon L., Vilarino V., Perez G., Castell A. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 29, p. 394–416.
2. Sharma A., Saxena A., Sethi M., Shhree A. Life cycle assessment of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15, Issue 1, p. 871–875.
3. Li D. H. W., Yang L., Lam J. C. Zero energy building and sustainable development implications – A review. *Energy*. 2013. Vol. 54, p. 1–10.

4. Marszal A. J., Heiselberg P., Bourrelle J. S., Musall E., Voss K., Sartoti I., Napolitano A. Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43, Issue 4, p. 971–979.
5. STR 2.01.09:2012 Pastatų emerginis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas. Valstybės žinios. 2012-08-25, Nr. 99–5071.
6. Klein S. A. et al. A Transient System Simulation Program (TRNSYS 17) Manual, Thermal Energy System Specialists. Madison, USA, 2010.
7. Januševičius K., Streckienė G., Misevičiūtė V. Simulation and analysis of small-scale solar adsorption cooling system for cold climate. *International Journal of Environmental Science and Development*. 2015. Vol. 6, No 1, p. 54–60.
8. Januševičius K., Streckienė G. Solar assisted ground source heat pump performance in nearly zero energy building in Baltic countries. *Environmental and Climate Technologies*. 2011. Vol. 11, p. 48–56.
9. Ayompe L. M., Duffy A., McCormack S. J., Conlon M. Validated TRNSYS model for forced circulation solar water heating systems with flat plate and heat pipe evacuated tube collectors. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 31, Issue 8–9, p. 1536–1542.
10. Jordan U., Vajen K. Influence of the DHW Load Profile on the Fractional Energy Savings: a Case Study of a Solar Combi-System with TRNSYS Simulations. *Solar energy*. Vol. 69, p. 197–208.
11. Schäfer A. Efficiency test according to EN 12975-2:2006. Test report: KBT Nr. 2006-30-en. Fraunhofer Institut for Solar energy Systems. 16 p.

### **Simulation of a heat pump, solar collectors and solar PV system**

#### **Summary**

The aim of this paper was to present possibilities to simulate renewable energy technologies using TRNSYS software. The paper analyses an integrated system that consists of a heat pump, flat plate solar collectors and solar PV. The system is simulated for a low-energy residential building. The results show that by utilizing renewable energy, the simulated system could provide needed energy for hot water preparation, heating, ventilation and lighting of the building.

## TURINYS

### 1. PLENARINIS POSĖDIS

#### **Valdas Lukoševičius**

Technologinių ir organizacinių naujovių poreikis Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo ūkyje ..... 3

### 2. ATSINAUJINANTYS ENERGIJOS IŠTEKLIAI IR BIOSFEROS APSAUGA

#### **Gintvilė Žvirblytė**

Sausinto dumblo ir kietojo atgautojo kuro (KAK) panaudojimo galimybės šiluminei energijai gaminti Alytaus regione ..... 13

#### **Marius Praspaliauskas, Nerijus Pedišius**

Nuotekų dumblo Lietuvos vandenvals sistemose savybių tyrimas ..... 19

#### **Nerijus Striūgas, Kęstutis Zakarauskas, Saulius Skačkauskas**

Sausinto vandenvals nuotekų dumblo terminio skaidymo technologija ir jos taikymas energijai gaminti ..... 27

#### **Robertas Poškas, Arūnas Sirvydas**

Elektrostatinio filtro panaudojimo galimybės sintetinėms dujoms išvalyti 33

#### **Vygantas Žėkas, Vytautas Martinaitis**

Pirminė atsinaujinančiųjų energijos išteklių technologijų atranka, integruotai kuriant pastato modelį ..... 37

#### **Giedrius Gecevičius, Antanas Markevičius, Mantas Marčiukaitis**

Darnios raidos principų taikymas naudojant saulės, vėjo ir biokuro energetinius išteklius ..... 46

#### **Juozas Savickas, Vladislovas Katinas, Marijona Tamašauskienė**

Biodegalų panaudojimo Lietuvoje aspektai ir poveikio aplinkai analizė .... 51

#### **Eugenijus Perednis, Vladislovas Katinas, Juozas Savickas**

Biologiškai skaidžių atliekų panaudojimo energetikoje tyrimas ..... 55

#### **Donatas Sankauskas, Vladislovas Katinas**

Vėjo parametrų pasiskirstymo dėsningumų tyrimas ..... 59

#### **Arvydas Galinis, Vidas Lekavičius**

Biokuro tiekimo energetikos sektoriui grandinės modeliavimas ..... 64

|                                                                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Arvydas Galinis, Irena Alėbaitė, Eimantas Neniškis</b><br>Šalies centralizuoto šilumos tiekimo sistemos plėtra .....                                                                                 | 70  |
| <b>Ignas Ambrazevičius, Gediminas Kabišius, Agnė Šliumbaitė</b><br>Avižų lukšto degimo tyrimai .....                                                                                                    | 79  |
| <b>Kristina Romančikaitė, Adolfas Jančauskas, Gediminas Kabišius</b><br>Žlaugto panaudojimo kurui galimybių tyrimai .....                                                                               | 84  |
| <b>Ignas Ambrazevičius, Agnė Aužbikavičiūtė</b><br>Biokuro mineralinės dalies įvertinimas .....                                                                                                         | 89  |
| <b>Egidijus Norvaiša, Arvydas Galinis</b><br>Termofikacinių elektrinių konkurencingumas šilumos ir elektros rinkose ..                                                                                  | 94  |
| <b>Vidas Lekavičius, Peteris Shipkovs, Galina Kashkarova, Kristina Lebedeva, Lana Migla</b><br>The Utilization of Industrial Hemp for Energy Production and Saving .....                                | 103 |
| <b>Titas Sereika, Kęstutis Buinevičius</b><br>Eksperimentiniai užterštos biomasės deginimo tyrimai: CO, CO <sub>2</sub> ir SO <sub>2</sub><br>teršalų koncentracijų įtaka NO <sub>x</sub> kiekiui ..... | 108 |
| <b>3. BRANDUOLINĖ ENERGETIKA</b>                                                                                                                                                                        |     |
| <b>Gintautas Klevinskas, Linas Kilda, Linas Koraliovas</b><br>Naujos branduolinės elektrinės aikštelių vertinimas pagal tarptautinius<br>ir nacionalinius reikalavimus .....                            | 112 |
| <b>Gintautas Poškas</b><br>Sistemų komponentų paviršinio radioaktyviojo užterštumo<br>neapibrėžtumo vertinimo aspektai .....                                                                            | 120 |
| <b>Andrius Slavickas</b><br>Garo reaktyvumo koeficiento tyrimas trimačiame kuro rinklės modelyje ..                                                                                                     | 125 |
| <b>Tadas Kaliatka</b><br>W7-X įrenginio, apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemos<br>modeliavimas .....                                                                                                  | 131 |
| <b>Audrius Graževičius, Arvydas Adomavičius, Linas Paukštaitis</b><br>BWR reaktoriaus panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseino<br>termohidraulinių procesų studija .....                           | 138 |

#### 4. ŠILUMOS IR MASĖS MAINAI

##### **Renoldas Zujus**

Trimatis mišrios konvekcijos modeliavimas vertikaliame plokščiame kanale..... 145

##### **Mindaugas Drūlia**

Unikalių vandens fizinių savybių įtaka kondensacijai tarpfaziniame paviršiuje ..... 152

##### **Monika Maziukienė, Gintautas Miliauskas, Arvydas Adomavičius**

Lašo uždavinio skaitinio eksperimento optimizavimas lašelio terminų parametrų aspektu ..... 156

##### **Adolfas Jančasuskas, Marija Buinevičiūtė**

Aluminio ir aliuminio oksido priedų įtaka autopolimerizacinės polimetilmetakrilato plastmasės šilumos laidžiui ..... 168

##### **Элеонора Хачьян, Александр Пушнов, Андрей Соколов**

Исследование влияния высоты слоя миникольцевой насадки на гидравлическое сопротивление ..... 174

##### **Roman Neilo**

Experimental investigation of heat and mass transfer during natural convection on a horizontal cylinder confined by vertical walls..... 178

#### 5. ŠILDYMAS, ŠILUMOS TIEKIMAS IR TERMOFIKACIJA

##### **Stasys Šinkūnas, Mantas Morkvėnas, Juozas Gudzinskas,**

##### **Romualdas Morkvėnas**

Pastatų šildymo sistemų darbo režimo optimizavimas taikant valdymo matematinius modelius ..... 184

##### **Violeta Motuzienė**

Daugiabučių namų oro kokybės tyrimai ..... 192

##### **Romanas Savickas**

Daugiabučių namų vidaus šildymo ir karšto vandens sistemų modernizavimas 2012/27/ES direktyvos kontekste ..... 199

##### **Giedrė Streckienė**

Šilumos siurblio, saulės kolektorių ir saulės elementų sistemos modeliavimas ..... 209