

**ŠILUMOS
ENERGETIKA
IR TECHNOLOGIJOS – 2016**

Konferencijos pranešimų medžiaga



2016

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

**ŠILUMOS ENERGETIKA
IR TECHNOLOGIJOS – 2016**

Konferencijos pranešimų medžiaga



Kauno technologijos
universitetas
Konferencija, 2016 m.
sausio 28-29 d.

Kaunas * LEI * 2016

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 mokslų akademija (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 Gudzinaskas

dr. Linas Paukštaitis

dr. Rolandas Jonynas

dr. Nerijus Striūgas

dr. Rolandas Urbonas

Leidinio straipsnius recenzavo redakcinė kolegija

ir nepriklausomi recenzantai

© Kauno technologijos universitetas, 2016

© Lietuvos energetikos institutas, 2016

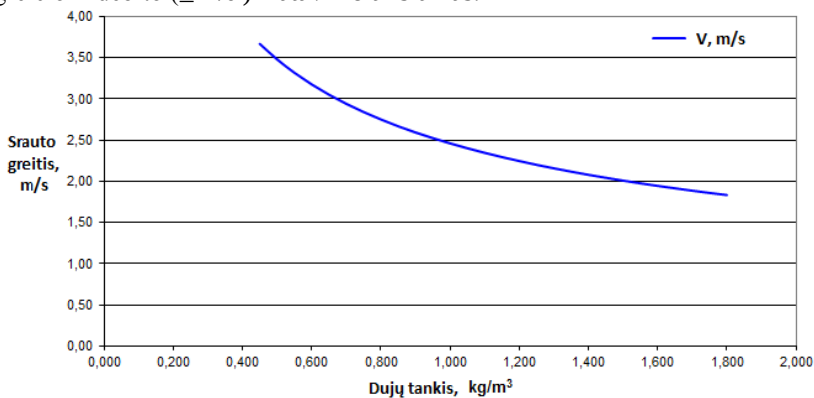
1 ATSINAUJINANTYS ENERGIJOS IŠTEKLIAI IR BIOSFEROS APSAUGA

Kietų dalelių emisijų matavimo gravimetriniu metodu taikymo ypatumai deginant biokurą

Rimvydas Ambrulevičius
UAB AUREGIS

Biomasės panaudojimas kurui – tai vienas būdų mažinti aplinkos taršą ir šiluminio efektą sukeliančių dujų emisiją. Tai nereiškia, jog biomasės panaudojimas automatiškai išsprendžia taršos problemas. Kaip parodė prieš keletą metų atlikti matavimai, taršos emisijų dydžiai labai priklauso ir nuo eksploatuojamų energetinių katilų konstrukcijos, kuro savybių ir palaikomo darbo režimo. Labiausiai jaučiama yra kietų dalelių emisija. Juolab, kad modernizuotos ir pritaikytos biokurui deginti katilinės dažniausiai įrengtos miestų teritorijoje, netoli gyvenamųjų namų.

Kietų dalelių emisijų matavimą reglamentuoja du pagrindiniai standartai – LST-EN 13284-1 ir ISO 9096 [1; 2]. Juose išsamiai aprašyta matavimų atlikimo tvarka, reikalavimai matavimui naudojamiems prietaisams. Gravimetrinis metodas yra referencinis ir taikomas emisijų taršos kontrolei bei kitais principais (optiniu, elektrodinaminiu) veikiančioms prietaisams kalibruoti. Kita vertus, matavimai pasižymi specifinėmis biokuro savybėmis: didelis kuro savybių netolygumas ir didelė jo drėgmė; palyginus su kitomis kuro rūšimis mažas kalingumas, didelis kiekis lakių medžiagų; mažas sieros kiekis ir, tikėtina, didelis chloro kiekis šiauduose. Šio metodo taikymas ribojamas slėgių skirtumu tarp statinio ir dinaminio slėgių dujų transportavimo kanale. Tik jam esant didesniai nei 5 Pa, bus išlaikomas srauto greičio ir debito ($\leq 2\%$) matavimo tikslumas.



1 pav. Gravimetrinio metodo taikymo apribojimas pagal slėgių skirtumą

Srauto matavimas sparneliniais arba termoanemometrais negalimas dėl didelės kietų dalelių koncentracijos degimo dujose. Matavimas grindžiamas repre-

zentatyvaus mėginio paėmimu, aspiruojant dalį pagrindinio srauto per specialų filtrą. Standartas numato mėginio paėmimo trukmę ne mažiau 30 minučių. Taip įvertinamas katilo darbo netolygumas dėl kuro savybių nevienodumo, apkrovos pasikeitimo ir kitų faktorių. Jei energetiniuose objektuose naudojame matavimo įrangą, skirtą ventiliacinių sistemų veikimo kontrolei ar darbo vietų aplinkos taršai matuoti, atlikti matavimai nebus korektiški. Pirmiausia, tokie prietaisai nepritaikyti darbui kanaluose su daug aukštesnėmis temperatūromis ir srautais su keliolika kartų didesne kietų dalelių koncentracija [3]. Juose mažas aspiravimo debitas (iki 25 l/min.), o naudojami plokšti filtrai visiškai užsipildo per kelias minutes. Per tokį trumpą laiką neįmanoma atlikti patikimo mėginio paėmimo net viename matavimo aspiravimo taške arba keliuose taškuose didelio diametro kanaluose, o mažo diametro aspiracinių antgalių panaudojimą riboja standartas – angos diametras turi būti didesnis nei 6 mm. Taip pat aspiratoriai nenaudotini lakių ir aerozolinių teršalų mėginims paimti. Jie pritaikyti darbui su labai mažais debitais (1,5–3 l/min.).

Kitas dažnai pasitaikantis netikslumas, tai emisijų matavimai, esant mažai katilo apkrovai (15–20 %) ir gautų rezultatų ekstrapoliavimas didelėms (60–85 %) katilo apkrovoms. Korektiška yra atlikti du kontrolinius matavimus – vasarą/rudenį prie mažų katilo apkrovų ir žiemą/pavasariį prie didelių katilo apkrovų. Kaimyninėse šalyse (Lenkijoje, Vokietijoje) tai reglamentuota įstatymu. Nemažai problemų sukelia matavimo vietos parinkimas. Standarte numatyta, kad matavimo taškas turi būti per 5 diametrus nuo ortakio alkūnės, kanalo diametro pasikeitimo ar atsišakojimo, o už matavimo taško – 3 diametrų kanalo ilgio tiesi atkarpa. Šiuos reikalavimus ne visada pavyksta išlaikyti rekonstruojamuose objektuose. Geriausias variantas – atlikti matavimus vertikaliuose kanaluose. Šiuo atveju matavimus pakanka atlikti vienoje kanalo ašyje, nes srautas yra simetriškas abiejų ašių atžvilgiu. Viena svarbiausių matavimo sąlygų yra izokinetiškumo užtikrinimas mėginio aspiravimo metu (leistinos koeficiento kitimo ribos 95–115 %). Izokinetiškumui esant mažesniai nei optimalus, mėginyje bus surenkama mažiau mažų kietų dalelių, o esant didesniai – daugiau mažų kietų dalelių nei yra dujų sraute, tai yra frakcinė paimto mėginio sudėtis neatitiks realios kietų dalelių frakcinės sudėties. Problemą apsunkina tai, kad izokinetiškumo sąlyga švarioms dujoms be dulkių nėra tapati dujų ir kietų dalelių mišiniui. Atlikti tyrimai parodė, kad aukštesnis aspiravimo izokinetiškumo lygis dujoms realiai yra artimas kvazikinetiniam dujų-dulkių mišinio aspiravimui [4]. Tai yra, palaikant izokinetiškumą 105–120 % ribose paimtas mėginys geriausiai atitiks faktinę frakcinę dulkių sudėtį. Bet aspiravimas prie izokinetiškumo mažiau nei 95 % yra neleistas. Taip pat neleistas aspiracinių antgalių, kurių diametras mažesnis nei < 6 mm, naudojimas. Paimtų mėginių reprezentatyvumui įtakos turi ir aspiravimo zondo nuokrypis nuo lygiagrečios srautui padėties (leistinas nuokrypis 10°), ir jo vibracija prie didelių srauto greičių, bei lokalių dujų kanalų kanalų nehermetiškumai. Idealiausias variantas, kai naudojami zondai su integ-

ruotu dujų srauto greičio matavimo jutikliu, o aspiratorius turi autmatinio izokinetiškumo palaikymo funkciją.

Nemažai problemų sudaro didelė deginamos biomasės drėgmė. Idealiausias variantas, kai atliekame kanalinę aspiraciją. Filtras yra aukštoje temperatūroje ir nėra pavojaus kondensatui susidaryti. Sudėtingiau tai atlikti už šilumokaičių išmetamų dujų kanaluose ir drėgnų dujų filtrų. Šioje kanalo zonos vietoje vyksta intensyvi kondensacija ir filtras tiesiog užklijuojamas. Šiuo atveju galima rekomenduoti matavimą atlikti galimai kuo toliau nuo šilumokaičio arba kamine. Dalis drėgmės iškrenta dūmų nuvedimo kanale, ir filtro užpylimo kondensatu pavojus bus kur kas mažesnis. Tačiau tokios matavimo vietos įrengimas yra brangus ir būtina užtikrinti saugos reikalavimus dirbant dideliame (> 5 m) aukštyje. Norint sėkmingai atlikti matavimus, reikia naudoti kokybiškus filtrus. Jie neturi reaguoti su degimo produktais, būti stabilūs mechanškai (neprarasti filtravimo elemento pluošto, išlaikyti slėgio perkrovas) ir atsparūs aukštai temperatūrai. Jeigu yra pavojus, kad degimo produktuose gali susidaryti aerozoliai (mediena deginama su kitos rūšies kuro priedais arba mišiniais), filtrų kondicionavimą prieš bandymus ir džiovinimą po matavimų atliekame aukštoje ($180\text{ }^{\circ}\text{C}$) temperatūroje, kad patikimai pašalinti juos iš filtro medžiagos. Taip sumažiname mėginio svėrimo paklaidas. Pratekėjusiose pro kietų dalelių filtrą degimo dujose yra didelis drėgmės kiekis. Aspiratoriui apsaugoti nuo kondensato turi būti naudojami efektyvūs separatoriai, užtikrinantys drėgmės kiekį dujose ne daugiau 10 g/m^3 . Geriausiai šiuo tikslu tinka trijų kamerų separatoriai su silikagelio užpildu. Normaliomis sąlygomis (sausas oras, biomasės drėgmė 20–25 %) galime be problemų atlikti 3–6 aspiravimus. Bet kai didelė aplinkos drėgmė ($> 80\%$) ir šlapia biomasė, po poros aspiravimų separatorius bus pilnas kondensato. Todėl vykdant matavimus, visada reikia turėti parengtus 2–3 drėgmės separatorius. Didelis jų pliusas, kad jų veikimui nenaudojama energija. Kondicionieriai su Peltje aušinančiu elementu naudojami tik prie nedidelių debitų ($1,5\text{--}4\text{ l/min.}$) dujų analizatoriuose.

Išvados

1. Atliekant emisijų matavimus būtina įvertinti specifines biokuro savybes bei katilo darbo režimą.
2. Rekomenduojama taikyti kanalinę mėginių aspiraciją, o aspiratoriaus apsaugai naudoti efektyvius drėgmės separatorius.
3. Mėginiams filtruoti geriausiai naudoti gilzinius filtrus, nes plokštieji filtrai persipildo nepasiekus standarte nurodytos minimalios aspiravimo trukmės,
4. Aspiravimo vietų parinkimas vertikaliuose kanaluose mažina darbų apimtį ir trukmę.
5. Matavimo prietaisai skirti darbo vietų užterštumui matuoti ir vedinimo-kondicionavimo sistemų kontrolei neužtikrina korektiško matavimų atlikimo pagal galiojančių standartų reikalavimus, bei patikimų rezultatų.

Literatūra

1. LST-EN 13284-1:2007 Emisijos iš stacionarių šaltinių. Mažų masės koncentracijų dulkių nustatymas. Rankinis gravimetris metodas.
2. LST ISO 9096+AC1:2008 Stacionarių šaltinių išmetami teršalai. Kietų dalelių masės koncentracijos nustatymas rankiniu būdu.
3. Ambrulevičius R. Biomasės deginimas mažos bei vidutinės galios katilinėse ir emisijų problemos. *Energetika*, 2010, T. 56, Nr. 2, P. 103-109, ISSN 0235-7208.
4. Mazur M., Teisseyre M. Pomiar koncentracji i strumienia masy pyłu węglowego podawanego do palników kotłow energetycznych. Krzepnięcie metali i stopow. PAN-Katowice, 1999 r., Nr. 29, P. 157-164, ISSN 0208-9386.

Summary

When measuring the dust emissions from the biomass boiler necessary specific properties of the fuel has to be considered: high inequality properties and high humidity, a large amount of volatile substances, the relatively low calorific value. To obtain reliable results, you must follow the requirements of the normative documents accurately take into account the generated thermal power of the boiler and, if necessary, additional measurements result in low or optimal power.

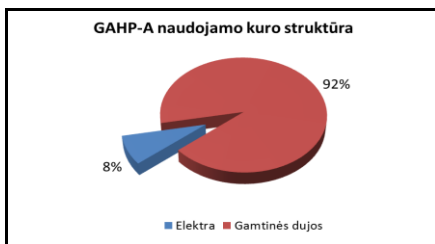
Dalinio šilumos pasigaminimo, savoms reikmėms panaudojant dujinį absorbcinį šilumos siurblių, priešprojektinis ekonominis vertinimas

Valentinas Klevas*, Lina Murauskaitė**

*Kauno technologijos universitetas, **Lietuvos energetikos institutas

Atsinaujinančių išteklių energetikos įstatyme Lietuva yra išsikėlusį uždavinį „namų ūkiuose atsinaujinančių energijos išteklių dalį šildymui sunaudojamų energijos išteklių balanse padidinti ne mažiau kaip iki 80 %“. Šiame įstatyme taip pat numatyta, kad paramos schemomis skatinama naudoti atsinaujinančių išteklių energiją naudojančius šildymo įrenginius, kurie mažina energijos suvartojimą; tarp jų parama gali būti teikiama ir absorbciniams dujiniams šilumos siurbliams [1], atitinkantiems ekologinius kriterijus [2]. Absorbcinių dujinių šilumos siurblių efektyvumas dėl aeroterminės energijos panaudojimo gali viršyti 150 %. Tyrimo tikslas – atlikti priešprojektinį ekonominį vertinimą dalinio šilumos pasigaminimo savoms reikmėms, panaudojant dujinį absorbcinį šilumos siurblių. Efektyviai gamtines dujas naudojanti technologija gali būti traktuojama kaip atsinaujinančius energijos išteklius (toliau AEI) panaudojanti technologija, ir plačiau diegiama namų ūkiuose ir pramonėje, siekiant Lietuvos užsibrėžtų tikslų.

GAHP-A (angl. Gas Absorption Heat Pump – Air source) šilumos siurblių kuras yra gamtinės dujos. Tačiau iki 39 % šilumos paimama iš oro, todėl faktiškai šilumos siurblys traktuotinas kaip AEI panaudojanti technologija.



1 pav. GAHP-A šilumos siurblių kuro struktūra

Atlikus Lietuvos energetikos instituto (toliau LEI) suvartojamos šilumos analizę galima teigti, kad vidutiniškai paskutinio šildymo sezono metu, t. y. 2014–2015 m. spalį–kovą, LEI mokama šilumos kaina buvo 7,4 EURct/kWh. Tačiau nuo balandžio ši kaina krito iki 5 EURct/kWh. Gegužę patvirtinta kaina taip pat 5 EURct/kWh (skaičiai suapvalinti).

Centralizuotai tiekiamos šilumos kainos tendencija ateityje yra esminis veiksnys, lemiantis ekonominius rodiklius ir projekto ekonominį gyvybingumą. Būtina pastebėti, kad ateinantis šildymo sezonas yra biokuro panaudojimo pikas Kaune,

todėl tikėtina mažesnė kaina bent jau iki to laiko, kol biokuro kaina dėl didelės paklausos ims augti.

1 lentelė. GAHP-A HT ir GAHP-A LT šilumos siurblių apibendrintos charakteristikos

Šilumos siurblio modelis		
	GAHP-A HT (aukštesnių temperatūrų)	GAHP-A LT (žemesnių temperatūrų)
Šilumos siurblio kaina		
- Šilumos siurblys (su 50 proc. nuolaida nuo mažmeninės kainos) - Akumuliacinė talpa	6700 EUR 1000 EUR	6700 EUR 1000 EUR
Galutinė kaina su montavimu:	10'000 EUR	10'000 EUR
Užsiduoti temperatūros režimai		
- Tiekiamo vandens temperatūra - Lauko vidutinė temperatūra	50°C -5 °C	45°C -5 °C
Galingumas (pagal užsiduotus temperatūros režimus)	32,71 kW	33,63 kW
Efektyvumas	130 %	133 %
Kuras		
- Gamtinės dujos - Elektra	92 % 8 %	
Patikslinti skaičiavimai pagal realius ir galimus dujų ir elektros tarifus		
Mokami tarifai:		
- Gamtinės dujos (2015 m. sausis) - Elektra (vidutinis 2014 m.)	0,69 EUR/m ³ 0,1274 EUR/kWh	
Šilumos siurblio gaminamos šilumos savikaina (pagal mokamus tarifus)	0,0593 EUR/kWh	0,0577 EUR/kWh
Išlaidos šilumos siurbliui, gaminant 100'000 kWh šilumos (pagal mokamus tarifus)	5932,13 EUR	5769,84 EUR
Taikytini tarifai, jei gamtinių dujų būtų vartojama per 500 m ³ /metus:		
- Gamtinės dujos (2 grupė nebutiniams vartotojams) - Elektra (vidutinis 2014 m.)	0,42 EUR/m ³ 0,1274 EUR/kWh	
Šilumos siurblio gaminamos šilumos savikaina (suvartojant per 500 m ³ /metus)	0,0373 EUR/kWh	0,0363 EUR/kWh
Išlaidos šilumos siurbliui, gaminant 100'000 kWh šilumos (suvartojant per 500 m ³ /metus)	3728,21 EUR	3626,22 EUR

LEI vidutinė mokėta gamtinių dujų kaina 2014 m. buvo 0,74 EURct/m³. Toliau skaičiavimams taikytas 2015 sausio 0,69 EURct/m³ tarifas, nes vėliau gamtinių dujų 2015 m. nebuvo vartota. Atkreipiamė dėmesį, kad nuo 2015 m. sausio pasikeitė mokėjimo skaičiavimo tvarka ir šiuo metu mokama už MWh gamtinių dujų. Atliktas kainos perskaičiavimas už kubinį metrą.

LEI už elektrą atsiskaito pagal keturių laiko zonų tarifus, todėl apskaičiuota vidutinė metinė elektros kaina, kuri 2014 m. sudarė 0,1274 EUR/kWh.

1 lentelėje pateiktos pagrindinės šilumos siurblių GAHP-A charakteristikos, kuriomis vadovautasi atliekant preliminarų ekonominį vertinimą.

Pagrindiniai rodikliai, kurie parodys šilumos siurblio projekto ekonominį gyvybingumą:

- AB „Kauno energija“ centralizuotai tiekiamos šilumos kaina.
- Gamtinių dujų kaina (pagrindinis šilumos siurblio kuras).

AB „Kauno energija“ centralizuotai tiekiamos šilumos kaina 2014–2015 m. šildymo sezonu vidutiniškai sudarė 0,074 EUR/kWh LEI Ūkio padalinio pateiktais duomenimis. AB „Kauno energija“ tiekiamos šilumos kainos nuo 2014 m. smarkiai svyruoja sezoniškai dėl konkurencijos šilumos gamybos srityje. Vasarą šilumos kaina krenta iki 0,05 EUR/kWh. Jei šilumos kainų kritimo tendencija išsilaikytų, šilumos siurblio alternatyva trumpuoju laikotarpiu būtų ekonomiškai nepriimtina.

Gamtinių dujų kainos taip pat pasižymi dideliais svyravimais, daugiausia dėl geopolitinių sprendimų ir energetikos rinkų svyravimų įtakos. Kadangi AB „Kauno energija“ iki 2014 m. kuro balanse vyravo gamtinės dujos, šilumos kainos tendencija atkartojo gamtinių dujų tendenciją. Tačiau 2015 m. biokuro dalis AB „Kauno energija“ tiekiamos šilumos kuro struktūroje jau pasiekė 50 proc., iki 2017 m. prognozuojama, kad 70 proc. šilumos bus pagaminama iš biokuro. Trumpuoju laikotarpiu itin sudėtinga prognozuoti tolesnį tiek centralizuotai tiekiamos šilumos, tiek gamtinių dujų kainų pasikeitimą.

Svarbiausi rodikliai, kurie gali lemti sprendimą, yra galimas pinigų sutaupymas, statinis atsipirkimo laikas ir investicijų efektyvumo rodiklis.

Galima apskaičiuoti ir dinaminį atsipirkimo laiką bei svertinę energijos kainą, bet šio etapo sprendimų priėmimui tai nebūtina.

Apskaičiuojami pagrindiniai ekonominiai rodikliai:

- Paprastasis atsipirkimo laikas
- Grynoji dabartinė vertė (GDV)

$$GDV = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{PS_t}{(1+i)^t} \quad (1)$$

čia: GDV – grynoji dabartinė vertė; I_0 – investicijos; PS – pinigų srautai; i – diskonto norma; t – laikotarpis.

- Vidinė grąžos norma (VGN)

Prielaidos, naudotos skaičiavimuose:

- šilumos siurbliu pagaminamos šilumos kiekis 100'000 kWh;
- centralizuotai tiekiamos šilumos kaina 0,074 EUR/kWh (LEI 2014–2015 m. šildymo sezono vidutinė kaina);
- gamtinių dujų tarifas (0,42 EUR/m³), jei LEI suvartotų per 500 m³/metus;
- metinės eksploatacinės išlaidos šilumos siurblio pagaminamam 100'000 kWh šilumos kiekiui apie 3700 EUR (aukštesnių temperatūrų GAHP-A HT šilumos siurblio).

• metiniai LEI sutaupymai įsirengus GAHP-A HT = (0,074 EUR/kWh * 100'000 kWh) – 3700 EUR = 3700 EUR

Apskaičiuota grynoji dabartinė vertė (GDV), esant 9 % diskonto normai, vidinė grąžos norma (VGN) ir paprastasis atsipirkimo laikas:

GDV – tai grynoji dabartinė vertė eurai, kuri reiškia diskontuotų sutaupymų sumos per numatytą projektui vertinti laikotarpį ir diskontuotų išlaidų (investicijų) skirtumą. Šis skirtumas turi būti daugiau nei 0, kad projektas būtų vertas dėmesio.

$$GDV_1 = 23745 - 10000 = 13744 \text{ EUR (priimtina)}.$$

Vidinė grąžos norma reiškia projekto investicijų pajamingumą, išreiškiamą procentais nuo investuojamo kapitalo. Randama tokia diskonto norma, kuriai esant diskontuoti sutaupymai ir išlaidos susilygina, t. y. jų skirtumas yra lygus nuliui.

$$VGN = 35,2 \% \text{ (mažai rizikinga)}.$$

$$\text{Paprastasis atsipirkimo laikas} = 10'000 \text{ EUR} / 3700 \text{ EUR} = 2,7 \text{ metai (apie 3 m.)}.$$

Tuo pačiu principu atliekami tolesni skaičiavimai ir jautrumo analizė skirtingiems veiksniams (2 lentelė).

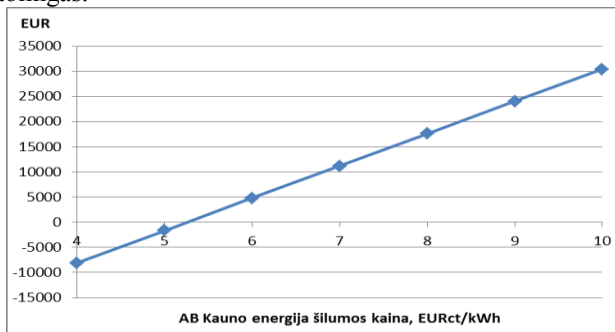
Galima teigti, kad jei šilumos kaina būtų mažesnė nei 5 EURct/kWh, sunku būtų įrodyti šio modulio ekonominį naudingumą net su 50 proc. nuolaida šilumos siurblio kainai.

2 lentelė. Jautrumo analizė pagal veiksnus: diskonto normos dydis, centralizuotai tiekiamos šilumos kaina, gamtinių dujų tarifai (GAHP-A HT šilumos siurbliui)

		LEI vartojant mažiau nei 500 m ³		LEI vartojant per 500 m ³	
		Grynoji dabartinė vertė (EUR)		Grynoji dabartinė vertė (EUR)	
Diskonto norma, kai centralizuotai tiekiamos šilumos kaina 0,074 EUR/kWh	5 %	1583		18570	
	7 %	535		15987	
	9 %	-374 (nuostolinga)		13745	
	12 %	-1525 (nuostolinga)		10906	
	15 %	-2472 (nuostolinga)		8569	
Centralizuotai tiekiamos šilumos kaina (EUR/kWh), kai diskonto norma 9 proc.	0,04	-22194 (nuostolinga)		-8075 (nuostolinga)	
	0,05	-15776 (nuostolinga)		-1657 (nuostolinga)	
	0,06	-9358 (nuostolinga)		4761	
	0,07	-2941 (nuostolinga)		11178	
	0,08	3447		17596	
	0,09	9895		24014	
	0,10	16312		30431	
Gamtinių dujų tarifas (EUR/m ³)	0,30	Šilumos siurblio gamtinamos šilumos savikaina (EUR/kWh)	0,0275	Šilumos siurblio gamtinamos šilumos savikaina (EUR/kWh)	0,0275
	0,40		0,0356		0,0356
	0,50		0,0438		0,0438
	0,60		0,0520		0,0520
	0,70		0,0601		0,0601
	0,80		0,0683		0,0683
	0,90		0,0765		0,0765
	1,00		0,0846		0,0846

Finansinio jautrumo analizė (1 pav.) parodo, kaip LEI gamtinių dujų suvartojimo tarifas ir priklausymas skirtingoms nebutinių vartotojų kategorijoms (jei būtų

vartojama per 500 m³) lemia šilumos siurblio grynąją dabartinę vertę. Gamtinių dujų brangimas tiesiogiai didintų šilumos siurblio gaminamos šilumos savikainą. Centralizuotai tiekiamos šilumos kaina turėtų būti per 5 EURct/kWh, kad projektas nebūtų nuostolingas.



1 pav. Grynoji dabartinė vertė (EUR), kintant centralizuotai tiekiamos šilumos kainai (EURct/kWh)

Centralizuotai tiekiamos šilumos ir gamtinių dujų kainų tendencija ateityje yra esminiai veiksniai, lemiantys ekonominius rodiklius ir projekto ekonominį gyvybingumą.

Galimi rizikos veiksniai:

- Dujų kainos svyravimai ateityje;
- Centralizuotai tiekiamos šilumos kainos svyravimai ateityje;
- Elektros kainos svyravimai ateityje;
- Eksploatacijos kaštai (galimi gedimai, techninė priežiūra);
- Mažesnė šilumos siurblio gamybos apimtis;
- Mažesnė centralizuotai tiekiamos šilumos kaina nei šilumos siurblio gamybos savikaina;
- Nepasiekiamas planuotas šilumos siurblio efektyvumas, ir kt.

Rizikos veiksnių įtakos skaičiavimo reikia priėmus principinį sprendimą dėl investicijų. Pažymėtina, kad kiekvienas rizikos veiksnys pareikalautų atskiros analizės, prielaidų bei dinamikos vertinimo.

Išvados

1. Atlikta priešprojektinė ekonominė analizė, kurios išvada yra ta, kad šis projektas gali būti svarstomas techniniu požiūriu, t. y. verta daryti techninį projektą, kuris leistų konkretizuoti ir ekonominius rodiklius: kiek laiko ir koku mastu galėtų dirbti šilumos siurblys (ar galės pagaminti 100'000 kWh šilumos, kaip bus suderinta sąveika su AB „Kauno energija“ ir su dujų tiekimo įmone dėl taikomo mažesnio dujų tarifo. Be to, gali tekti keisti sutartis ir t. t.).

2. Ekonominis vertinimas apsiriboja ekonominių ribų bei prielaidų nustatymu. Pavyzdžiui, AB „Kauno energijos“ tiekiamos šilumos kaina sumažėjo nuo vidutiniškai 7 iki 5 EURct/kWh, todėl sudėtinga prognozuoti būsimą šilumos kainą ir priimti vienareikšmišką sprendimą dėl investicijų.
3. Pagrindiniai ekonominiai rodikliai pagal jautrumo analizę yra teigiami tik tuo atveju, jei centralizuotai tiekiamos šilumos kaina būtų daugiau 5 EURct/kWh ir LEI suvartotų per 500 m³/metus bei patektų į 2 kategoriją su mažesniu gamtinių dujų tarifu. Šilumos siurblio investicijos (šilumos siurblys su 50 % nuolaida, akumuliacinė talpa ir montavimas) iš sutaupymų „atsipirktų“ apytikriai per 3 metus, jei šilumos kaina išliktų dabartinio lygio, t. y., 7,4 EURct/kWh. Jei centralizuotai tiekiamos šilumos kaina būtų mažiau nei 7,4 EURct/kWh, atsipirkimo laikas pailgėtų. Jei „Kauno energijos“ šilumos kaina būtų mažiau nei 5 EURct/kWh, projektas ekonomiškai nebūtų svarstytinas.
4. Centralizuotai tiekiamos šilumos ir gamtinių dujų kainų tendencija ateityje yra esminiai veiksniai, lemiantys ekonominius rodiklius ir projekto ekonominę gyvybingumą. Dabartinė situacija nepalanki, nes daug subsidijų gauna biokuro jėgainės, o tai dirbtinai sumažina centralizuotai tiekiamos šilumos kainą.
5. Investiciniam sprendimui priimti reikia techninio projekto ir išsamesnės analizės.

Literatūra

1. LR Atsinaujinančių išteklių energetikos įstatymas, 2011 m. gegužės 12 d. Nr. XI-1375. Valstybės žinios, 2011-05-24, Nr. 62-2936.
2. European Commission 2007/742/EC: Commission Decision of 9 November 2007 establishing the ecological criteria for the award of the Community eco-label to electrically driven, gas driven or gas absorption heat pumps. Brussels: European Commission. (OL 2007 L 301)

Economic pre-feasibility evaluation of gas absorption heat pump for the part generation of heat for self-consumption

Summary

The aim of the paper is to perform an economic pre-feasibility evaluation of the part generation of heat for self-consumption by the use of gas absorption heat pump with air source. The results have shown that costs of gas absorption heat pump are not competitive with the low prices of district heating in Kaunas city. However, this technology that effectively uses natural gas can be considered as renewable technology, which might be widely installed in households and industry in order to achieve goals of Lithuania.

Biokuro vandens šildymo katilo korozijos priežasčių tyrimas

Jolita Baranauskienė, Kęstutis Buinevičius
UAB „Enerstena“ Mokslinių tyrimų ir vystymo centras

Šių tyrimų tikslas – išsiaiškinti galimas biokuru kūrenamo vandens šildymo katilo vamzdžių suplonėjimo priežastis, vykstančios korozijos mechanizmus ir pateikti rekomendacijas bei efektyvias prevencines priemones, siekiant išvengti žematemperatūrinės sieros rūgšties inicijuotos korozijos.

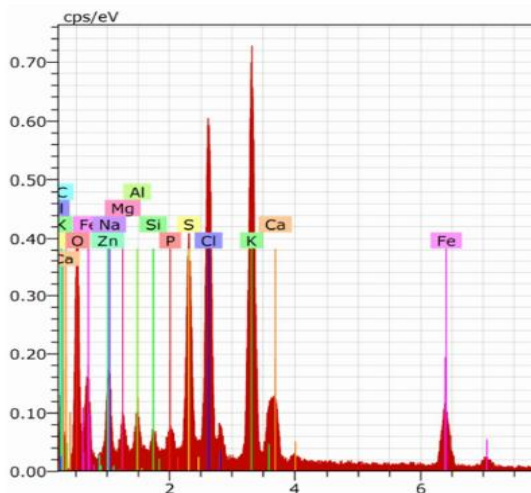
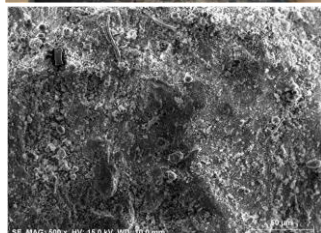
Katilo vamzdžio apnašų analizė

Atlikus daugiau nei dvejus metus eksploatuoto biokuro vandens šildymo katilo apžiūrą nustatyta, kad katilo trečios eigos vamzdžių sienelės yra neleistinai suplonėjusios ir vamzdžiai deformuoti.



Išėmus vieną vamzdį iš katilo ir atlikus sienelės storio matavimus nustatyta, kad vamzdžio apačioje jis tesiekia 0,5 mm, kai pradinis storis buvo 4 mm.

Apnašų nuo vamzdžių sienelės sudėties ir mikro analizės tyrimai atlikti taikant SEM (skenuojantis elektroninis mikroskopas) ir EDS (energijos dispersijos spektroskopas) analizės metodus. Tyrimų rezultatai pateikti 1 pav.



El	AN	Series	Net unnn. C	norm. C	Atom. C
			[wt. %]	[wt. %]	[at. %]
O	8	K-series	9917	24.80	24.23
K	19	K-series	28330	23.00	22.48
Cl	17	K-series	21570	13.92	13.60
C	6	K-series	3166	4.64	4.53
Fe	26	K-series	5674	13.54	13.23
S	16	K-series	12396	6.96	6.80
Ca	20	K-series	4611	4.91	4.80
Zn	30	K-series	859	5.67	5.54
Na	11	K-series	1411	1.38	1.35
Mg	12	K-series	1638	1.20	1.17
Al	13	K-series	1719	1.06	1.04
P	15	K-series	1429	0.81	0.79
Si	14	K-series	802	0.44	0.43
Total:			102.34	100.00	100.00

1 pav. Vamzdžio apnašų elementinė analizė SEM ir EDS metodais

Tyrimai parodė, kad sienelių suplonėjimas įvyko iš degimo produktų pusės. Vamzdžio apnašų tyrimais nustatyta elementinė sudėtis, sienelės paviršiaus struktūra bei morfologija. Apibendrinus tyrimų rezultatus nustatyta, kad apnašų sudėtyje vyrauja padidintos sieros ir chloro koncentracijos, o tai nėra būdinga medienos elementinei sudėčiai.

Ploniausioje vamzdžio dalyje (apie 0,5 mm) vyrauja tik geležies oksido apnašos, o jų didelė koncentracija tik patvirtina korozijos proceso vyksmą.

Tyrimų rezultatai interpretuoti pasitelkus literatūros analizę. Pagal Lietuvos biokuro standartą sudaryta biokuro elementinės sudėties palyginamoji lentelė.

1 lentelė. Lietuvos standartas LST EN ISO 17225-1. Kietasis biokuras

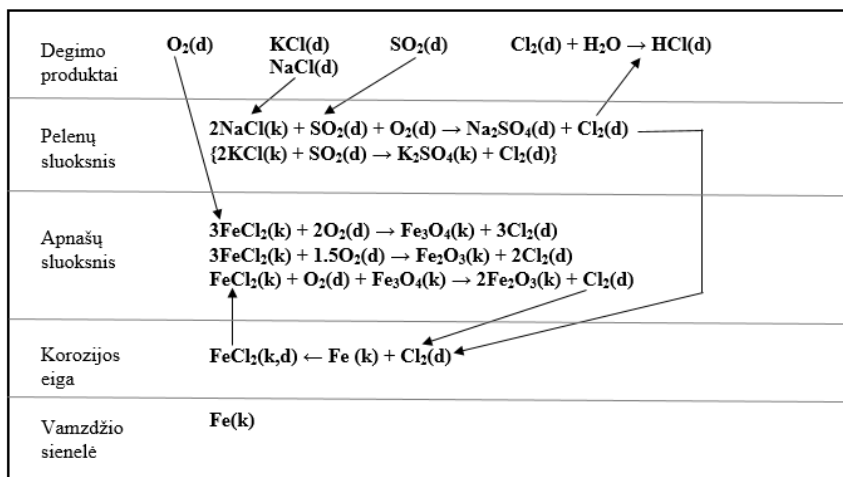
%	Mediena	Žievės	Kirtimo atliekos	Šiaudai	Žolinė biomasa	Durpės	Ligninas
N	0,1-0,5	0,3-0,9	0,3-0,8	0,3-1,6	1,0-2,0	0,8-3,0	0,15-1,5
S	<0,05	<0,05	0,02-0,06	0,05-0,7	0-0,5	0,1-1,5	0,2-8,0
Cl	0,01-0,03	0,01-0,05	0,01-0,04	0,1-1,1	0,02-1,3	0,02-0,06	0,04
Ca	0,05-1,5	0,02-0,08	0,2-0,8	0,8-2,0	0,3-0,6	0,05-0,1	
K	0,02-0,05	0,1-0,4	0,1-0,4	0,2-2,6	0,5-2,4	0,8-5,8	

Iš lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad medienoje S ir Cl koncentracijos yra nykstamai mažos; S koncentracija žymiai padidėja durpėse, lignine, o Cl – šiauduose, žolinėje biomaseje.

Sulfatavimo įtaka korozijos procesui

Biomasės deginimo metu dideli S ir Cl kiekiai, kartu su lakiais šarminiais metalais (K, Na), degimo procese išsiskiria garų būvyje ir kondensuojasi ant metalinių vamzdžių paviršių, proporcingai temperatūriniam gradientui, suformuodami submikronines daleles.

Esant temperatūrai $> 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, kalis egzistuoja kaip dujinis KCl deginant šiaudus ir kaip KOH, deginant medienos skiedras ir žievę, siera – kaip SO_2 , o chloras – kaip dujinis HCl. Žemėjant temperatūrai, dujinis KOH konvertuojasi į kalio sulfatą, o dujinis KCl kondensuojasi į kietą fazę ant vamzdžių sienelių ir toliau reaguoja su dūmuose esančiu SO_2 , ko pasekoje formuojasi sulfatai ir atpalaiduojamas dujinis chloras.



2 pav. Sulfatavimo reakcija – „aktyvuoto chloro“ korozijos mechanizmas [2]

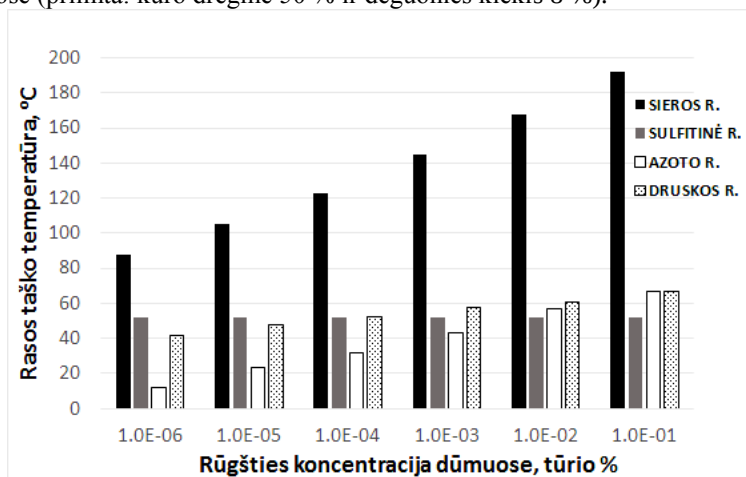
Kadangi ši sulfatavimo reakcija vyksta apnašų sluoksnyje, tai jos metu susidaro didžiulės dujinio chloro koncentracijos prie metalo paviršiaus (žymiai didesnės nei dūmuose), tai sudaro agresyvią korozinę terpę. Dalis chloro gali difunduoti per porėtą apnašų sluoksnį ir padengti vamzdžių paviršius. Susidaręs geležies chloridas yra stabilus tik bedeguonėje aplinkoje. Esant deguonies, chloras tampa aktyvatoriumi ir atlieka katalizatoriaus vaidmenį „išplėšiant“ geležį iš vamzdžių sienelių – vyksta intensyvus korozijos procesas, susidarant ryškiai raudonos spalvos ir porėtos struktūros korozijos produktams, o dujinis chloras, atlikęs „juodą darbą“, pasišalina su išmetamais dūmais.

Esant aktyvintos oksidacijos tikimybei, būtina vidinius vamzdžių paviršius atakingai valyti nuo prilipusio geležies chlorido. Taip pat rekomenduojama vidinius vamzdžių paviršius dengti chlorui atsparia antikorozine danga.

Sieros įtaka korozijos procesui

Siera yra korozijos priežastis dėl liepsnoje besiformuojančių H_2S (aukštatemperatūroje korozija) ir dėl SO_3 (žematemperatūroje korozija). Didžioji dalis sieros oksiduojasi į SO_2 , ir tik nedidelė jos dalis suformuoja SO_3 (literatūros duomenimis SO_3 dalis bendrame SO_x svyruoja nuo 1 iki 5 tūrio %). Šis jungiasi su degimo produktuose esančiais vandens garais, kurių ypač daug deginant drėgną biokurą, ir sudaro sieros rūgštį, kuri yra pagrindinė žematemperatūros korozijos priežastis. Kuo daugiau sieros yra kure, tuo esant aukštesnei temperatūrai (tikėtina ir 160 °C) prasideda šios rūgšties kondensacija ant katilo vamzdžių paviršių, ko pasekoje vyksta intensyvi vamzdžių paviršių korozija.

Deginant biokurą, degimo produktuose gali susidaryti eilė rūgščių, kurios kondensuojasi temperatūrose, žymiai aukštesnėse nei vandens rasos taškas. 3 pav. matome apskaičiuotus įvairių rūgščių rasos taškus, atsižvelgiant į jų koncentracijas dūmuose (priimta: kuro drėgmė 50 % ir deguonies kiekis 8 %).



3 pav. Įvairių rūgščių rasos taškų temperatūros

Kadangi grįžtamosios vandens temperatūros centralizuoto šildymo biokuro katiluose tipiškai siekia 70–80 °C, tokiomis sąlygomis gali kondensuotis tik sieros rūgštis. Iš 3 pav. matyti, kad esant net nedidelei sieros rūgšties koncentracijai dūmuose, gali būti pasiektas rasos taškas gana aukštoje (> nei 100 °C) temperatūroje.

Medienoje sieros kiekis yra nežymus, todėl susidarančių SO_3 koncentracijos yra taip pat mažos. Tačiau kita situacija susidaro, jeigu kurui naudojama ne mediena, o kitos kietojo kuro rūšys (pvz., durpės, ligninas).

Jeigu katilinėje, kurioje deginamas sieringas kuras, yra pasiekiamas vandens garų kondensacija, rekomenduojama su dūmais kontaktuojančius paviršius gaminti iš rūgšties korozijai atsparaus plieno. Kadangi tiek SO_3 , tiek HCl gerai tirpūs van-

denyje, šie junginiai apie 95–99 % pašalinami iš degimo produktų kondensaciniame ekonomaizeryje ir tolesniuose įrenginiuose korozijos nesukelia. Kondensaciniame ekonomaizeryje purškiamas cirkuliuojantis vanduo turi būti neutralizuojamas, tada visiškai užkertamos galimybės korozijai šiame kontūre.

Iš esmės dėl mažų sieros kiekių įprastinėse biokuro rūšyse, pakėlus grįžtamo į katilą vandens temperatūrą ($\geq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), žematemperatūros korozijos katile galima išvengti. Visi šie ir kiti aspektai turėtų būti įvertinti jau katilinių projektavimo ir statybos etapuose, kad būtų išvengta su sieringo kuro deginimu susijusių problemų.

Išvados

Atlikus vandens šildymo katilo vamzdžių sienelių suplonėjimo priežasčių tyrimus, prieita prie tokių išvadų:

1. Labiausiai suplonėjusios vamzdžių sienelės yra vandens šildymo katilo trečiojoje dūmų eigoje, dūmų srauto periferijoje. Korozija pasireiškusi iš vidinės vamzdžių pusės (iš dūmų tekėjimo pusės).
2. Sienelės suplonėjimas yra tolygus, t. y. viršutinėje vamzdžio dalyje yra išlikęs praktiškai pradinis sienelės storis, ir šis storis toliau mažėja iki vamzdžio apačios – dūmų išteklėjimo iš vamzdžių vietos.
3. Atlikus pažeistų vamzdžių apnašų sudėties bei vamzdžių paviršių morfologijos tyrimus, nustatytas didelis S (iki 16 %) ir Cl (iki 12 % pagal masę) kiekis. Tai rodo, kad buvo naudotas kuras, turintis žymiai didesnius šių elementų kiekius, negu medienos kuras.
4. Literatūros analizė rodo, kad sieros ir chloro junginių korozija pasireiškia ypač aktyviai ir tai priklauso nuo paviršių temperatūros. Tai paaiškina, kodėl vamzdžiai apatinėje dalyje yra labiau suplonėję, nes apatinėje dalyje yra žemiausia grįžtamo vandens temperatūra. Vyksta intensyvi vamzdžių vidinių paviršių žematemperatūre korozija.

Literatūra

1. S. Retschitzegger, T. Brunner, I. Obernberger “Low-temperature corrosion in biomass boilers fired with chemically untreated wood chips and bark” 2015.
2. R. Riedl, J. Dahl, I. Obernberger, M. Narodslawsky “Corrosion in fire tube boilers of biomass combustion plants 1999.
3. W. B. A. “Superheater corrosion in biomass boilers: today’s science and technology” 2010.
4. H. Kassman, L. Bäfver, L. E. Åmand “The importance of SO_2 and SO_3 for sulphation of gaseous KCl – an experimental investigation in a biomass fired CFB boiler” 2010.

5. T. Brunner, F. Biedermann, W. Kanzian, N. Evic, I. Obernberger “Advanced biomass fuel characterization based on tests with a specially designed lab-scale reactor” 2013.

Study of biofuel hot water boiler corrosion

Summary

This article offers a short review on study of biofuel hot water fire tube boiler corrosion mechanism. After more than 2 years operation of boiler it was found several tubes with unacceptable thin walls (~0.5 mm from an initial thickness of 4 mm) which causes failures in their shape. In composition of deposits from boiler tubes was obtained high concentration of sulfur and chlorine (SEM and EDS methods). This is not typical for wood elemental composition but can arise from impurities of waste wood, peat, sludge, lignin, etc.

Elevated sulfur and chlorine concentrations in the fuel may result high corrosion risk. The high S-content in the fuels results in high concentrations of sulfuric acid in the flue gas, which is able to condense at temperatures up to 160 °C depending on acid concentration in flue gas. Sulfuric acid condenses preferably on cooled surfaces (cold-end parts fire tubes), where it causes corrosion which is known as low-temperature corrosion.

Finally, design and operation recommendations are given on how to minimize the risk for low-temperature corrosion. The most effective solution should be kept boiler water return temperatures as high as possible (≥ 100 °C) to prevent the condensation of sulfuric acid. In the case of chlorine „active oxidation“ of tubes the inner walls must be thoroughly cleaned to remove all the adhering FeCl_2 . Consequently the inner tube wall should be coated with a corrosion prohibiting layer.

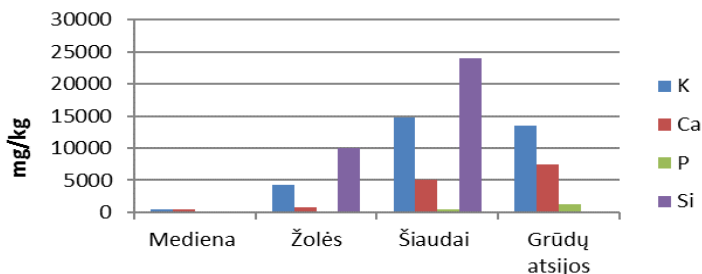
Šiaudų kuro generuojamos katilo paviršių taršos priežasčių tyrimai

Jolita Mockuvienė, Kristina Romančikaitė
UAB „Enerstena“

Pastaraisiais metais, pasauliniu mastu didėjanti energijos paklausa, klimato kaitos neigiami reiškiniai ir nepriklausomumo nuo energijos importo siekis skatina atkreipti dėmesį į alternatyvius energijos išteklius, vienas iš kurių yra biomasė. Panaudojamos biomasės daugiausiai sukaupiama miškų ir žemės ūkio sektoriuose.

Lietuvoje auginamų javų ir susidarantių šiaudų kiekiai kiekvienais metais svyruoja. Pastarųjų 5 metų vidurkis – kasmet susidarantių šiaudų kiekis daugiau 3 mln tonų.

Šiaudų savybės labai priklauso nuo augimo vietos, laiko ir orų sąlygų, nuo dirvožemio kokybės ir tręšimo. Šiaudų šilumingumas nedaug skiriasi nuo medienos. Šiaudų drėgno kuro apatinis šilumingumas didesnis nei medienos skiedrų. Šiaudams būdingas drėgnumas yra mažiau nei 20 %. Anksti nupjautų javų šiauduose chloro yra iki 4 kartų daugiau nei vėliau pjaunamų javų šiauduose. Didžiausias Cl kiekis gali siekti 0,97 %, o tai gali sukelti kurą deginančių įrenginių paviršių koroziją.



1 pav. Skirtingos rūšies kure esančių kalio, kalcio, fosforo ir silicio kiekių palyginimas

Pelenus formuojančios reakcijos

Šiaudų sudėtyje yra nemažai kalio, todėl degimo proceso metu susidaro kalio druskos KCl , K_2SO_4 , K_2CO_3 , kurių žema lydymosi temperatūra ($770^{\circ}C$). Degimo dujų srautas gali išnešti šias druskas ir formuoti nuosėdas ant tolimesnių šilumos mainų paviršių. Taip pat kalis gali reaguoti su kure esančiu Si, sudarydamas binarės K_2O-SiO_2 sistemas, kurių lydymosi temperatūra $600-700^{\circ}C$. Jei kalis reaguoja su kitais kure esančiais elementais, tada gali susidaryti ir trinarės K_2O-SiO_2-CaO ir

$K_2O-SiO_2-Al_2O_3$ sistemos. Esant padidintiems SiO_2 kiekiams, šie junginiai lengvai lydosi, pasiekia skystą būseną prie 600–700°C.

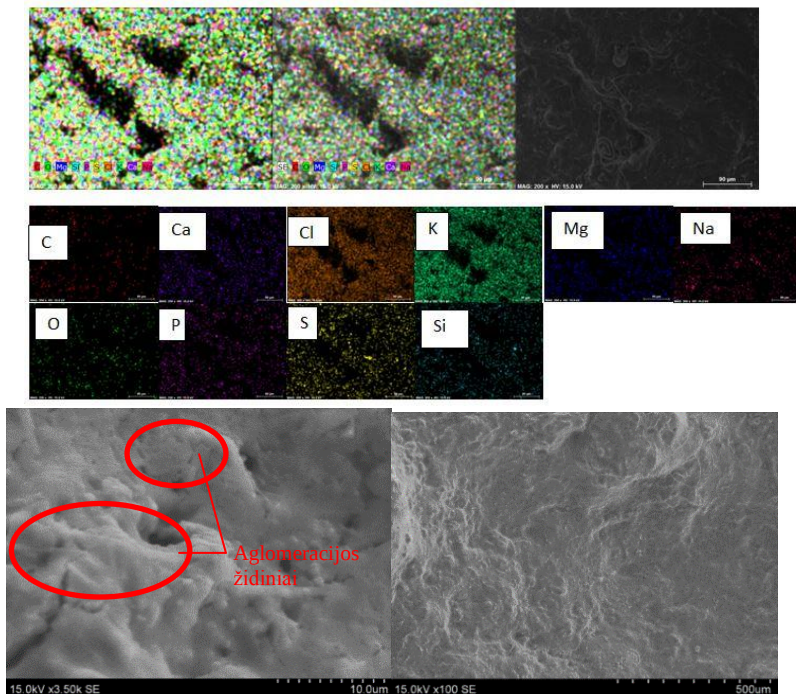
Tuo atveju, kai šiaudų kure yra skirtingos rūšies grūdų atsijų, turinčių padidintą silicio ir fosforo kiekį, degimo metu susidaro kompleksiniai kalio silikatų-fosfatų mišiniai, taip pat besilydantys prie žemų temperatūrų.

Katilo nuosėdos

Buvo atlikta katilo, kelis mėnesius deginusio šiaudų kurą, apžiūra. Nustatyta, kad visas pakuros paviršius padengtas šviesiai pilkos spalvos nuosėdomis. Į dūmų vamzdžius kartu su dūmais patekę lakieji pelenai, nusėdo ant vamzdžių sienelių ir suformavo kietas nuosėdas. Tai padidino sienelės storį ir sumažino vamzdžių pralaidumą, dėl ko pablogėjo šilumos mainai. Pastebėta, kad vamzdžiuose pradėjo formotis koralinės struktūros nuosėdų dariniai. Nuplovus miltelinių apnašų sluoksnį pastebėta, kad pakuros sienos padengtos išsilydžiusiu nuosėdų sluoksniu.

Apnašų iš dūmų vamzdžių analizė. Pagal elementų išsidėstymą mėginiuose (žr. 2 pav.) matyti, kad apnašose vyrauja KCl ir K_2SO_4 . Tai įrodo ir kiekybiniai tyrimai, atlikti laboratorijoje, nes sulfatų ir chloridų junginiai sudaro 7,5–9,3 %. Iš nuotraukų galima daryti prielaidą, kad apnašose yra kalcio ir magnio fosfatų, taip pat yra sulfatų. Atlikus bandinio SEM analizę, nuotraukose matyti lygus paviršius. Tikėtina, kad tai susidarę silicio oksidai, matosi aglomeracijos židiniai. Kadangi dūmų, keliaujančių iš kūryklos į katilą, temperatūra buvo 800–900 °C ir didesnė, todėl nuosėdos pradėjo sukibtį ir lydytis.

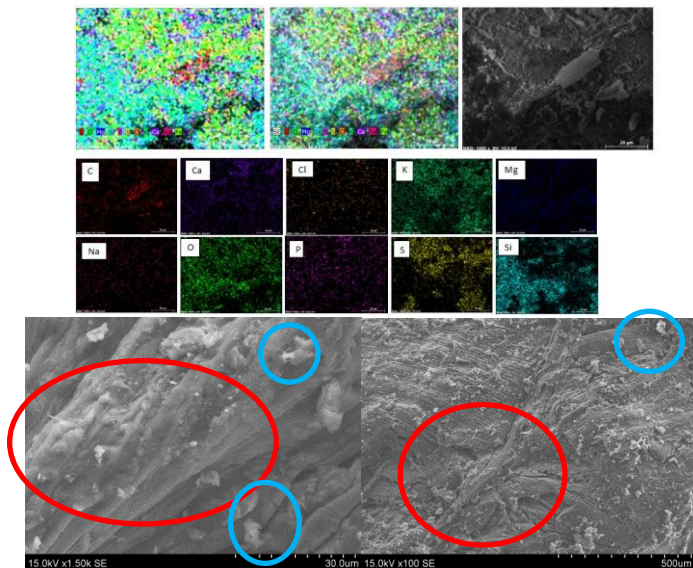
Atlikus EDS analizę (žr. 2 pav.) matyti chaotiškas kristalinių dalelių pasiskirstymas. Gerai apžiūrėjus nuosėdas matyti, kad jos yra koralinės struktūros, atsirančios dėl dalelių, kurios sėda ant paviršių, difuzijos mechanizmų.



2 pav. Nuosėdų SEM/EDS analizė

Pelenų iš pakuros analizė. Agrariniame biokure paprastai yra daug silicio. Silicis grūdinių kultūrų augaluose dažniausiai randamas kaip $\text{Si}(\text{OH})_4$ junginys, kuris suformuoja silikatinio tinklo struktūrą augalo ląstelių sienelėse. Šiauduose silicis sukuria „silicio griaučius“, kuri augalo struktūrai suteikia stiprumo ir apsaugo nuo mikroorganizmų. Tačiau dėl silicio ir dirvožemio patekimo į kurą, atsiranda šlakavimo ir pelenų lydymosi problemų. Atlikus pelenų SEM analizę, didelės pelenų iš pakuros dalelės išlaiko šiaudo „silicio griaučius“. Tokia pelenų struktūra yra, kai temperatūra neviršija $650\text{ }^{\circ}\text{C}$.

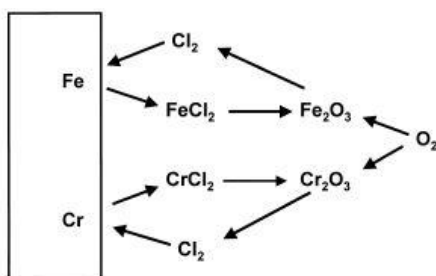
Iš SEM nuotraukų galima daryti prielaidą, kad ant paviršiaus matomi K_2SO_4 druskų kristalai, tai matyti ir iš elementų išsidėstymo (žr. 3 pav.). EDS analizėje matyti, kad pelenuose yra Na_2O , CaO , SiO_2 , K_2CO_3 . Taip pat matyti elementinės anglies pėdsakai. Todėl buvo padaryti pelenų degiosios masės tyrimai, kurie parodė, kad pakuros pelenuose yra apie 3,5 % degiosios masės. Laboratorijoje buvo ištirta šiaudų granulinių pelenų lydymosi temperatūra. Nustatyta, kad pelenų deformacijos pradžia yra $950\text{ }^{\circ}\text{C}$, o lydymasis prie $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$.



3 pav. Pelenų SEM/EDS analizė. Raudonai pažymėta silicio „griaučių“ struktūra, mėlynai pažymėti K_2SO_4 kristalai

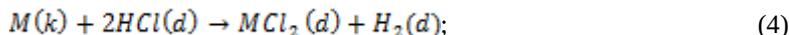
Ardelės nuosėdų tyrimai

Rasti geležies, chromo pėdsakai įrodo, kad chloras pažeidė ardelės apsauginį oksidų sluoksnį. Principinė korozijos schema pateikta 4 paveiksle.



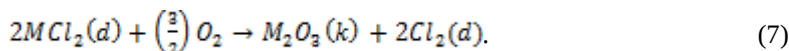
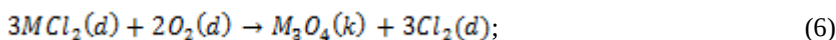
4 pav. Chloro veikiamos metalo korozijos schema

Chloras reaguodamas su metalu, prisijungia geležies arba/ir chromo atomus, susidaro $FeCl_2$ arba/ir $CrCl_2$ junginiai.

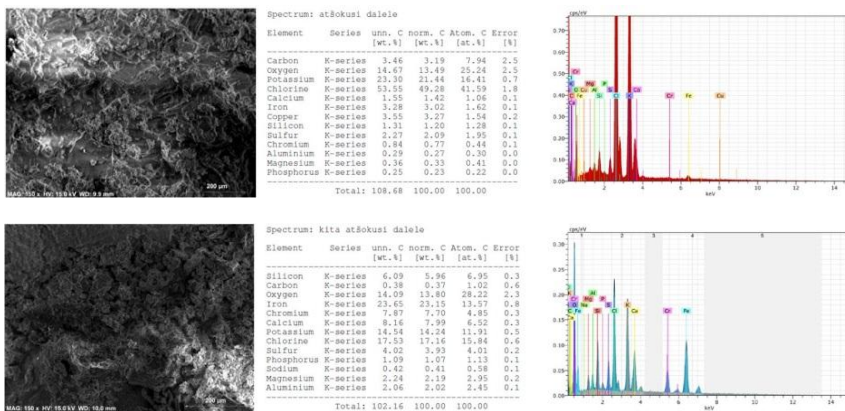


čia $M \in \{Fe, Cr\}$.

Susidarę metalų chloridai išgaruoja į pakūrą, kur toliau jungiasi su deguonimi ir sudaro metalų oksidus (Fe_2O_3 , Cr_2O_3), atpalaiduodami dujinį chlorą, kuris vėl reaguoja su metalu.



SEM/EDS (žr. 5 pav.) analizės rezultatuose nustatyti charakteringų elementų pikai (Cl, Fe, Cr) patvirtina vykusius korozijos procesus ardelės paviršiuje.



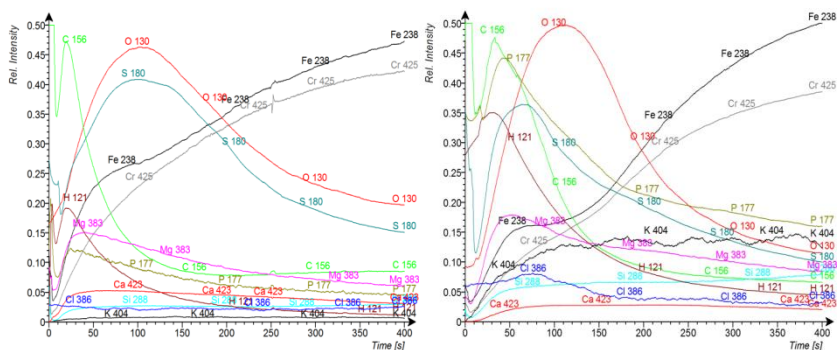
6 pav. Nuosėdų nuo ardelės SEM/EDS analizė

8 paveikslo a ir b dalyse pateikti skirtingų ardelės vietų 1 ir 2 taškų matavimų rezultatai (žr. 7 pav.). Šios analizės metu nustatytas kokybinis elementų pasiskirstymas bandinyje. Rezultatai interpretuojami tik po 20 sekundžių, nes pirmųjų sekundžių duomenys vertinami kaip indikaciniai.



7 pav. Tiriama ardelė

Pagal kreivių išsidėstymą ir intensyvumą galima nustatyti labiausiai išsiskiriančių elementų pokyčių tendencijas. O, S, P kreivės rodo deguonies, sieros ir fosforo pasiskirstymą, t. y. iliustruoja oksidinius, sulfatinus ir fosfatinus darinius. O ir S kreivių profiliai yra panašūs, o arčiau degimo zonos jų lokalizacija jau skiriasi. Tai rodo, kad arčiau degimo zonos paviršiuje yra du sluoksniai: labiau sulfatinis paviršius (tikėtina, išreikštas kaip balsvos apnašos) ir po juo esantis labiau oksidinis pasluoksnis. Geležies ir chromo pasiskirstymas metalo tūryje turėtų būti vienodu santykiu. Tačiau Fe ir Cr kreivių kitimas yra nevienodas. Tai reiškia, kad vienas iš jų nuo paviršiaus yra pašalinamas, dėl paviršiuje vykstančių procesų. Šiuo atveju didesnis ir greitesnis Cr kiekio sumažėjimas patvirtina cheminio Cr išdini- mo proceso buvimą. Tai įrodo Cl signalo intensyvumo padidėjimas paviršiuje, esan- čiam arčiau degimo taško.



8 pav. Ardelės GDS analizė

Išvados

1. Agrarinės kilmės kure esantys nemaži silicio ir kalio kiekiai indikuoja aglomeratų susidarymą, dėl ko pakuroje vyksta prislopintas nevisiškas degimas ir pelenuose lieka dalis degiosios masės.
2. Apnašose aptikta kalio ir chloro junginių, kurie turi įtakos labai žemoms pelenų lydymosi temperatūroms. Katilo dūmų vamzdžiuose apnašos sudarė koralines struktūras, o tai rodo, kad dūmų temperatūra buvo aukštesnė nei 900 °C. Pakuroje temperatūra buvo žemesnė, nes tai liudija pakuros pelenų SEM analizės nuotraukose matomos išsilaikiusios silicio „griaučių“ struktūros, kurios pradeda lydytis prie aukštesnių nei 650 °C temperatūrų.
3. Ištyrus ardele, paaiškėjo, kad ji paveikta chloro sukeltos korozijos. Atlikta EDS/SEM analizė patvirtina apsauginio oksidų sluoksnio suardymo mechanizmą.

Literatūra

1. H.P. Nielsen, F.J. Frandsen, K.Dam-Johansen, L.L. Baxter. The implications of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers. *Progress in Energy and Combustion Science* 26 (2000) 283-298 psl.
2. X. Wei, U. Schnell, K.R.G. Hein. Behaviour of gaseous chlorine and alkali metals during biomass thermal utilisation. *Fuel* 84 (2005) 841-848 psl.
3. J.N.Knudsen, P.A.Jensen, K. Dam-Johansen. Transformation and Release to the Gas Phase of Cl, K, and S during Combustion of Annual Biomass. *Energy and Fuels* 2004, 18 1385-1399 psl.

Deposition investigation in straw fuel boiler

Summary

Straw is one of biomass type, used for energy production. However, it is complicated to use straw for combustion because of depositions on heating surfaces. In this paper detailed analysis of deposits from the heat surfaces is provided, ash and fouling reactions are analysed and corrosion mechanism is explained.

NO_x susidarymo, deginant baldų gamybos atliekas, tyrimai

Ignas Ambrazevičius, Adolfas Jančiauskas, Gediminas Kabišius
 Kauno technologijos universitetas

Baldų gamybos įmonėse gamybos proceso metu susidaro daug atliekų. Baldų gamybos atliekos (1 pav.) pasižymi aukšta šilumine verte (1 lentelė), todėl gali būti panaudojamos kaip kuras kieto kuro katilams. Deginant daug azoto turintį kurą, galimos gamtosauginės ir technologinės problemos, pvz., per dideli teršalų kiekiai išmetamuose dūmuose, pelenų aglomeracija, nestabilus ir sunkiai valdomas degimo procesas. Dėl šių priežasčių, tokių atliekų deginimas yra komplikuotas įprastiniuose kieto kuro deginimo įrenginiuose. Todėl baldų gamybos įmonės ieško alternatyvių būdų šių atliekų efektyviam utilizavimui, gaminant šiluminę energiją.



1 pav. Baldų gamybos atliekų kuro frakcija

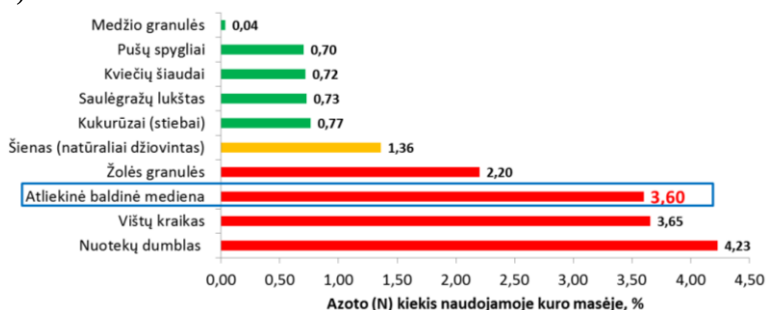
Vadovaujantis daugkartiniais elementinės sudėties nustatymo tyrimais, atliktais Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centro agrocheminių tyrimų laboratorijoje, nustatytas azoto kiekis granulėse buvo apie 3,6 % (1 lentelė).

1 lentelė. Baldų gamybos atliekų kuro charakteristikos

Kuro parametras	Vertė
Bendras azotas (N), %	3,6
Siera (S), %	0,0032
Chloras (Cl), %	0,0043
Visuminės drėgmės kiekis, %	6,3
Pelenų kiekis sausoje kuro masėje, %	1,1
Drėgno kuro apatinis šilumingumas, MJ/kg	17,5

Iš 1 lentelės matome, kad baldų gamybos atliekų granulių apatinis šilumingumas, įvertinus drėgmės įtaką, atitinka medienos šilumingumą (17–18 MJ/kg). Baldų gamybos atliekų granulėse yra mažai drėgmės dėl papildomo džiovinimo baldų plokščių gamybos technologijoje. Nepaisant šių teigiamų kuro charakteristikų, baldų gamybos pramonės atliekose, lyginant su įvairiomis kitomis kuro rūši-

mis, yra daug azoto. Pagal tyrimų rezultatus, atliktus UAB „Enerstena“ kuro tyrimų laboratorijoje, sudarytas įvairiose kuro rūšyse esančio azoto kiekio grafikas (2 pav.).



2 pav. Elementinio azoto kiekis naudojamojoje kuro masėje

Baldų gamybos proceso metu naudojama daug azoto junginių turinti karbami-do formaldehidinė ($\text{NH}_4\text{N}_2\text{O}$) derva. Dėl šios priežasties atliekose esančio bendrojo N kiekis gali viršyti medienoje esančio azoto kiekį daugiau nei šimtą kartų. Taikant įprastas deginimo technologijas, kurios taikomos biokurui deginti, NO_x koncentracijos išmetamuose dūmuose vyrauja 900–1400 mg/Nm^3 ribose (kai O_2 6 %). Leis-tinos koncentracijos, pateiktos 2 lentelėje, yra gerokai mažesnės.

2 lentelė. Su dūmais išmetamų azoto oksidų leistinos vertės [1]

Normatyvinis dokumentas	Kurą deginančio įrenginio nominali šiluminė galia	Išmetamų teršalų ribinė vertė, mg/Nm ³		O ₂ , tūrio %
		NO _x		
		Esami įrenginiai	Nauji įrenginiai	
LAND 43-2013	1 ≤ MW < 50	650 ¹	650 ¹	6
Numatoma nauja 2013/0442 direktyva biokurą deginantiesiems įrenginiams	1 ≤ MW < 50	300	300	6

1 – biokurą deginantiesiems įrenginiams: 750 mg/Nm^3

Siekiant sumažinti arba visai išvengti problemų, kurias gali kelti toks kuras, pirmiausia reikia tiksliai žinoti kokių problemų galima tikėtis. Šis darbas orientuo-tas į azoto oksidų išmetimus ir jų mažinimą. Tam iškeliama tikslai:

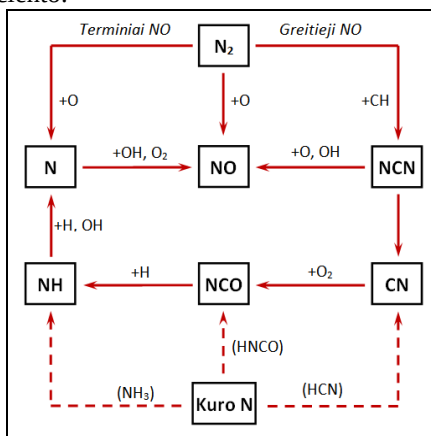
- Naudojant tyrimų stendą baldų gamybos atliekų deginimui nustatyti ar susidarantių azoto oksidų koncentracijos atitinka pramoniniuose įrenginiuose susidarantių NO_x koncentracijas.
- Eksperimentiniu būdu nustatyti NO_x koncentracijų mažinimo galimybę.
- Įvertinti NO_x skaičiavimo metodikos validumą prognozuojant azoto oksidų emisijų koncentracijas.

Azoto oksidai (NO_x) yra įvairūs azoto ir deguonies junginiai: NO , NO_2 , N_2O , N_2O_3 , N_2O_4 , N_2O_5 . Degimo reakcijos metu elementinio azoto šaltiniai yra kuras ir oras. Kure azotas yra surištas įvairiuose junginiuose, kuriems skylančiam degimo reakcijos metu, jis praranda molekulinį ryšį ir jungdamasis su deguonimi formuoja NO_x . Su dūmais išmetamų azoto oksidų susidarymo keliai pavaizduoti 3 pav., pagal kuriuos, jie yra skirstomi į tris pagrindines grupes [2]:

Terminiai azoto oksidai susidaro esant itin aukštoms temperatūroms. Reakcijai vykti reikia daug energijos, todėl azoto oksidų formavimasis yra ypač intensyvus 1800 K ir aukštesnėje temperatūroje.

Greitieji azoto oksidai susidaro reaguojant nevysiško degimo angliavandenilių radikalam (C_mH_n) su azoto atomu.

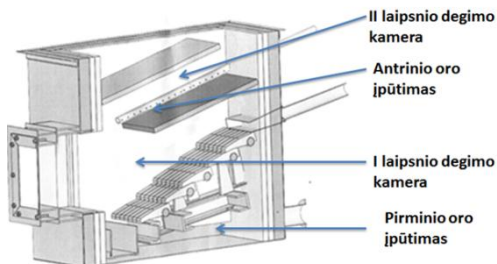
Kuro azoto oksidai priklauso nuo elementinio azoto kiekio kuro sudėtyje bei oro pertekliaus koeficiento.



3 pav. Azoto oksidų susidarymo būdai [3]

Kaip matome pateiktame 3 paveiksle, terminiai, greitieji ir kuro NO_x susidaro esant skirtingoms reakcijoms. Atsižvelgiant į degimo sąlygas ir elementinio azoto šaltinį, reakcijos vyksta skirtingais susidarymo būdais.

Azoto oksidų dūmuose koncentracijos, deginant baldų gamybos atliekas, eksperimentiškai buvo tiriamos 50 kW galios UAB „Enerstena“ vandens šildymo katile, kurio bendras vaizdas ir kūryklos pjūvis pateikti 4 pav.



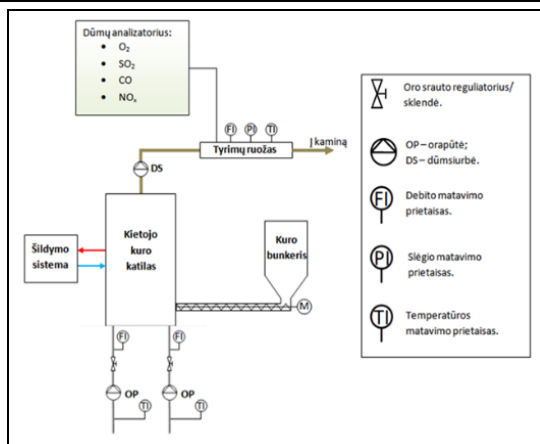
4 pav. 50 kW galios vandens šildymo katilo bendras vaizdas ir kūryklos pjūvis

Šis katilas turi visus technologinius elementus, leidžiančius imituoti kieto kuro pramoninio katilo su judančiu ardynu veikimą: atskirai reguliuojamą I-inio ir II-inio oro tiekiamą, nuolat išlaikomą trauką išmetamajame trakte, galimybę reguliuoti ardyno greitį ir kuro tiekimo kiekį. Vandens katilo šiluma cirkuliaciniu siurbliu tiekiamą į aušinimo sistemą – orinį kaloriferį ir plokštelinį šilumokaitį.

Sraigtiniu transporteriu biokuras tiekiamas į kūryklą, kur jis patenka į degimo zoną, ant laiptuoto, mechaniškai judinamo ardyno. Šioje zonoje vykdomas degimo procesas. Ardynas sudarytas iš judamų ir nejudamų, laiptuotai žemyn sudėtų ardelių eilių. Kas antra ardelių eilė judėdama stumia į priekį kuro sluoksnį. Tarp ardyno ardelių yra ertmės, skirtos pirminio oro tekėjimui. Pirminio oro kiekis nustatytas toks, kad užtektų palaikyti ant ardyno esančio biokuro degimą, ir kad jo metu vyktų kuro gazifikacija.

Biokuras ir jame esanti vandens dalis sušyla. Šilimo metu biokure vanduo garuoja. Dėl ypač didelės vandens specifinės garavimo šilumos sunaudojama dalis šiluminės energijos. Šio etapo metu vyksta intensyvus biokuro džiūvimas. Kito etapo metu vykdoma gazifikacija. Susidariusios lakiosios medžiagos sudeginamos dvejose, horizontalia arka atskirtose kūryklos degimo zonose. Taip iššėsiamas degimo produktų buvimo laikas kūrykloje ir sudaroma galimybė organizuoti laipsninį degimą.

Pirmoje degimo zonoje prasideda lakiųjų medžiagų išsiskyrimas, vyksta degimas. Antroje degimo zonoje galutinai sudeginamos lakiosios medžiagos. Paskutinio etapo metu baigiamas anglies (kokso) degimas. Jos degimas vyksta laiptuotojo ardyno pabaigoje prie pelenų susidarymo zonos. Kai anglis sudega, ardyno pabaigoje lieka neorganinė, nedeGIOji biokuro masė – pelenai. Toliau veikiama ardymo judėjimo, jie slenka į kūryklos apačioje esantį pelenų šalinimo bunkerį. Tyrimų stendo schema pateikta 5 pav.



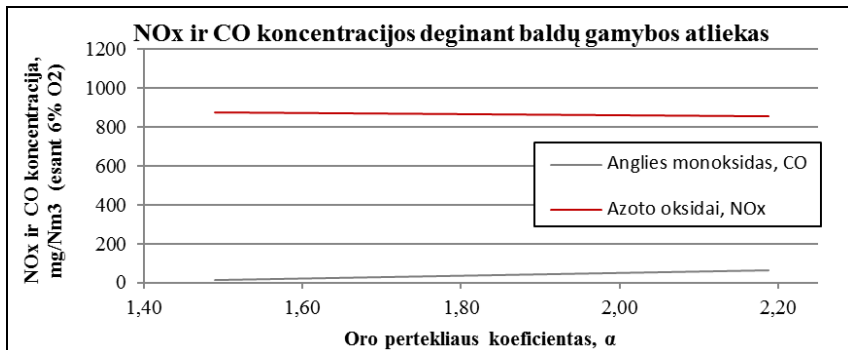
5 pav. Tyrimų stendo schema

Pirminis oras tiekiamas pro ardyno ardelėse esančias skyles, todėl jo tiekimo pozicijos kūrykloje negalime keisti. Antrinis oras į kūryklą tiekiamas virš arkos. Tiekiamo oro kiekiai į abi degimo zonas reguliuojami atskirai. Valdant pirminio/antrinio oro proporciją ir bendrą deguonies kiekį dūmuose išgaunamas skirtingas degimo režimas. Reikiami dūmų parametrai matuojami dūmtakyje už dūmsiurbės. Eksperimento metu nagrinėjami du degimo režimai: 1) CO generacijos režimas 2) visiško sudegimo režimas. Abiejų režimų pagrindiniai rodikliai pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Tirtų degimo režimų parametrai

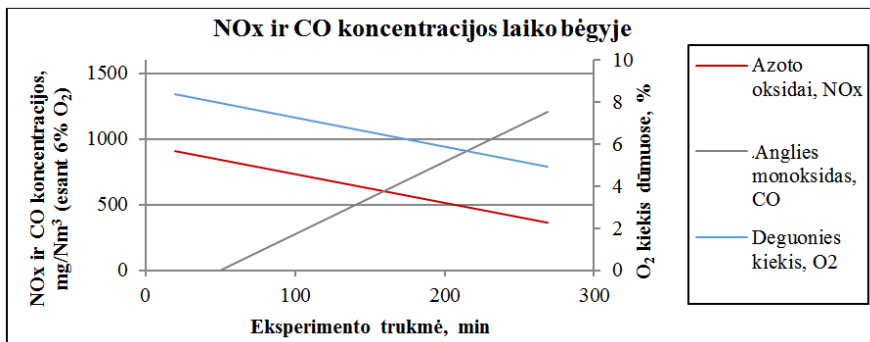
Rodiklis	Vnt.	CO generacijos režimas			Visiško sudegimo režimas		
Antrinio oro dalis nuo bendro oro kiekio	%	0	0	0	34	44	56
Deguonies kiekis dūmuose	%	5,6	4,9	4,4	7,2	6,7	8,5
Anglies monoksidas, CO	Mg/Nm ³	1131	1371	1317	31	68	17

Eksperimento pradžioje buvo tiekiamas pakankamas pirminio ir antrinio oro kiekis visiškam kuro sudeginimui. Tyrimo metu deguonies perteklius α palaipsniui buvo didinamas (6 pav.). Eksperimento metu buvo išlaikoma pastovi katilo galia.



6 pav. NO_x ir CO koncentracijų dūmuose priklausomumas nuo oro pertekliaus koeficiento

Nustatyta, kad keičiant kūrykloje deguonies perteklių α nuo 1,5 iki 2,2, jis neturi žymios įtakos azoto oksidų koncentracijos pasikeitimui. NO_x koncentracija eksperimento metu išliko pastovi – apie 850 mg/m³. Deginant baldų gamybos atliekas, esant visiškai sudegimui, NO_x koncentracijos viršija leistinas vertes, numatytas direktyvose LAND 43-2013 ir 2013/0442. Bandymo metu oro pertekliaus koeficientas buvo 1,5-2,2, kai dažniausiai katilinėse pasitaikantis būna apie 1,4, todėl nuspręsta į kūryklą tiekti mažesnę oro kiekį (7 pav.).



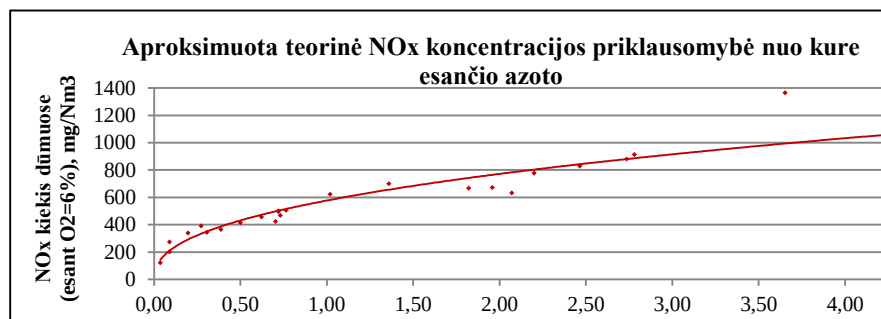
7 pav. NO_x, CO ir O₂ kitimas eksperimento metu

Esant didelei CO koncentracijai dūmuose (apie 1250 mg/m³), pastebimas labai efektyvus NO_x koncentracijų sumažėjimas. Kai anglies monoksido kiekis kūrykloje siekia 1250 mg/m³, azoto oksidų koncentracija dūmuose siekia 350 mg/m³. Palaipsniui didinant deguonies kiekį, kūrykloje pastebimas anglies monoksido mažėjimas. Sumažėjus CO koncentracijai, padidėja NO_x koncentracija. Sumažinus anglies monoksido koncentraciją iki 400 mg/m³, azoto oksidų koncentracija dūmuose padidėja iki 1100 mg/m³.

Lyginant eksperimento metu gautus rezultatus su randamais literatūroje [2–4], pastebimas panašus azoto oksidų koncentracijos dūmuose priklausomumas nuo azoto kiekio kure. Viename literatūros šaltinyje, pagal daugkartinių tyrimų duomenis, pateikiama aproksimuojanti formulė (1) [4].

$$C_{NO_x} = \frac{3468,373 \cdot N_K^{0,418}}{0,000358 \cdot Q_z + 0,985}, [\text{mg}/\text{m}^3] \quad (1)$$

Kaip matome, NO_x koncentracija (C_{NO_x}) tiesiogiai priklauso nuo azoto kiekio kure (N_K) 0,418 laipsniu. Kuo didesnis azoto kiekis kure, tuo didesnės NO_x koncentracijos galima prognozuoti. Pritaikius šią formulę įvairiausių kuro rūšių (medienos, nuotekų dumblo, žalių, kukurūzų ir kt.) NO_x koncentracijoms prognozuoti buvo sudarytas grafikas, parodantis NO_x koncentracijų priklausomumą nuo azoto kiekio naudojamojoje masėje (8 paveikslas).



8 pav. NO_x koncentracijų priklausomumas nuo N kiekio kure

Iš 8 paveiklė pateikto grafiko matyti, kad azoto kiekiui naudojamojoje kuro masėje esant per 3 %, NO_x koncentracija dūmuose viršys $900 \text{ mg}/\text{Nm}^3$. Šis rezultatas sutampa su eksperimento metu gautais azoto oksidų koncentracijos matavimų rezultatais, esant pakankamam deguonies kiekiui.

Išvados

1. Tyrimų stende deginant baldų gamybos atliekas, susidarančių azoto oksidų koncentracijos ($820\text{--}1020 \text{ mg}/\text{Nm}^3$) atitinka pramoniniuose įrenginiuose susidarančias NO_x koncentracijas (nuo 900 iki $1400 \text{ mg}/\text{Nm}^3$).
2. Baldų gamybos atliekas deginant padidintomis CO koncentracijomis ($600\text{--}1500 \text{ mg}/\text{Nm}^3$) vidutinė azoto oksidų koncentracija neviršys LAND 43-2013 normų.

3. Literatūroje pateikta NO_x koncentracijų skaičiavimo metodika gali būti taikoma NO_x koncentracijoms prognozuoti, tačiau ši metodika yra netinkama NO_x susidarymui įvertinti, esant nevysiško degimo produktams.

Literatūra

1. DIRECTIVE (EU) 2015 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants, 2015, 53.
2. GLARBORG, Peter; JENSEN, A. D.; JOHNSON, Jan Erik. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2003, 29.2: 89-113.
3. GLARBORG, Peter. Hidden interactions–Trace species governing combustion and emissions. *Proceedings of the combustion institute*, 2007, 31.1: 77-98.
4. R. Plečkaitienė, K. Buinevičius, E. Puida. Analysis of solid phase nitrogen conversion process to gaseous oxides. 2013, 9: 535 - 536

Investigation of NO_x formation during combustion of furniture manufacturing waste

Summary

Waste of furniture manufacturers can be valuable alternative energy source. But it has relatively high nitrogen concentrations. This fuel was burned in experimental 50 kW hot water boiler and nitrous oxides emission rates in flue gas were measured. With appropriate oxygen levels – average measured concentrations of nitrous oxides was 820–1020 mg/Nm^3 . Although, during staged combustion, nitrous oxides concentrations decreased by 500 mg/Nm^3 as CO concentrations increased to 1500 mg/Nm^3 . These experimental results were analyzed and compared with theoretical predictions of NO_x concentrations in flue gas.

Ciklono skaitinis tyrimas, skirtas kietųjų dalelių valymui dūmuose

Simas Klenauskis*, Gediminas Kabišius**

*UAB „Enerstena“, **Kauno technologijos universitetas

Ivadas. Kietosioms dalelėms valyti dūmuose naudojami keturių tipų įrenginiai: inerciniai separatoriai, audekliniai filtrai, šlapi skruberiai ir elektrostatiniai filtrai.

Šiame darbe buvo tiriamas tangentinio įtekėjimo ciklonas. Šio tipo įrenginiams dėl nejudančių dalių ir paprastos konstrukcijos reikia mažai priežiūros. Pagrindinis neigiamas aspektas – dalelių, kurių aerodinaminis diametras yra mažiau nei 5 μm , separavimas yra neefektyvus [1].

Mokslinėje literatūroje aprašomi skaitiniai tyrimai, kurių metu įvertinamas ciklonų konstrukcijos efektyvumas ir slėgio kritimas. Patikimam skaitinio tyrimo modeliui sukurti atsižvelgiama į šias keturias išlaidų kategorijas: 1) Reikia patyručio modeliavimo specialisto – kurti tinklėlį, parinkti modelio nustatymus ir apdoroti tyrimų rezultatus; 2) Programinės įrangos licencijos kaina; 3) Kompiuterinių resursų reikalavimas, ypač skaičiuojant nenusistovinčius procesus; 4) Skaitiniams tyrimams visada būtina rezultatus palyginti su eksperimentais.

Peržvelgus skaitinių tyrimų straipsnius ciklonų ir hidrociklonų tematika, kai naudojamas nestruktūrinis tinklelis, aptiktas tik vienas [2], paskelbtas 2015 m., kuriame modeliuojami visi ciklone vykstantys procesai ir nesupaprastinamos ciklono kraštinės sąlygos. Ankstesniuose tyrimuose, su nestruktūriniu tinkleliu, buvo naudojami supaprastinimai: mažesni greičiai ir supaprastinama separatoriaus konstrukcija [3-11]. Nestruktūrinis tinklelis yra parankus dėl lengvo ciklono konstrukcijos pakeitimo, kai taikomas automatinis tinklelio generavimas.

Ciklone vyksta intensyvus sukūrinis tekėjimas, ir turbulencijai atkurti nepakanka tik izotropinio turbulentiškumo modelio. Pagal Bousinesq'o hipotezę – ciklone vyrauja anizotropinis turbulentiškumas. $k-\epsilon$, $k-\omega$ ir kituose modeliuose Reynoldsso įtempiai yra izotropiniai – nevysiškai gali atkurti visą ciklono srauto tekėjimą [3,12-14]. Šį tekėjimą galima atkurti su Reynolds Stress Model (RSM) arba Large Eddy Simulation (LES) turbulencijos modeliais [12-15]. Daug skaičiavimo resursų reikalaujantys modeliai šiai dienai yra nepraktiški, juos labiau taiko mokslininkai mokslo įstaigose su galingomis skaičiavimo sistemomis, nei įmonėje dirbantys inžinieriai. Todėl siekiant atlikti skaitinį tyrimą ciklonui, nuspręsta išbandyti paprastesnį variantą – COMSOL programos $k-\omega$ turbulencijos modelį.

Mokslinėje literatūroje yra mažai informacijos apie COMSOL programą ir jos galimybes atkurti aerodinaminius procesus ciklone. Buvo surinkta informacija apie $k-\omega$ modelį ir jo galimybes atkurti srauto tekėjimo procesus separatoriuose. Publikuoti straipsniai gana seni, juose nėra aiškiai suformuluotos taikytų metodikų nei-

giamos savybės ir reikalavimai – panaudojimas praktiniams inžineriniams skaičiavimams.

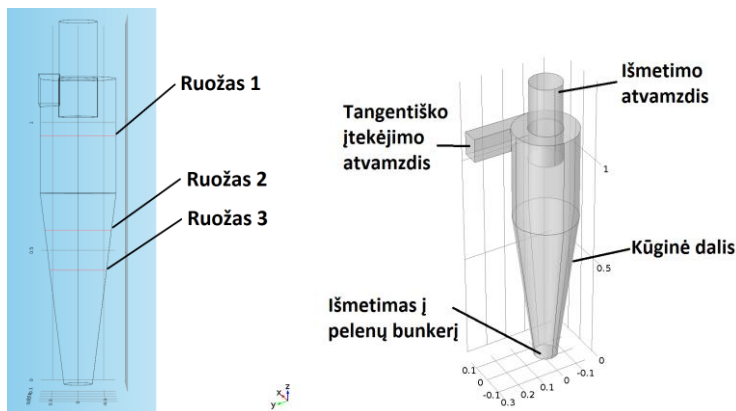
Skaitinio tyrimo metodika. Atliktas stacionarus skaitinis tyrimas su $k-\omega$ [16] turbulencijos modeliu, naudojant COMSOL programą ir rezultatai palyginami su eksperimentų duomenimis.

Palyginti rezultatai su A. J. Hoekstra atliktu eksperimentu tangentiniam įtekėjimo ciklonui (daugiau informacijos yra literatūros šaltinyje) [17]. Šio eksperimento kraštinės sąlygos ir rezultatai yra aiškiai apibrėžti autoriaus publikacijoje, aprašyta ir pateikta pakankamai informacijos, reikalingos atlikti išsamų skaitinį tyrimą. Hoekstra atliko eksperimentą naudodamas lazerinį doplerio anemometrą (LDA). Tyrimo metu atkartojome šio eksperimento kraštinės sąlygas (1 lentelė).

1 lentelė. Skaitinio tyrimo kraštinės sąlygos

Įtekėjimo greitis	16,1 m/s
Slėgis	Atmosferinis, 101325 Pa
Temperatūra	Kambario, 20 °C
Fluidas	Oras

Hoekstra eksperimente buvo matuojamas srauto tangentinis ir ašinis greitis skirtinguose ciklono ruožuose (plokštumose) (1 pav.) Ruožas 1 – žemiau ištekėjimo atvamzdžio; Ruožas 2 ir 3 – kūginėje ciklono dalyje.



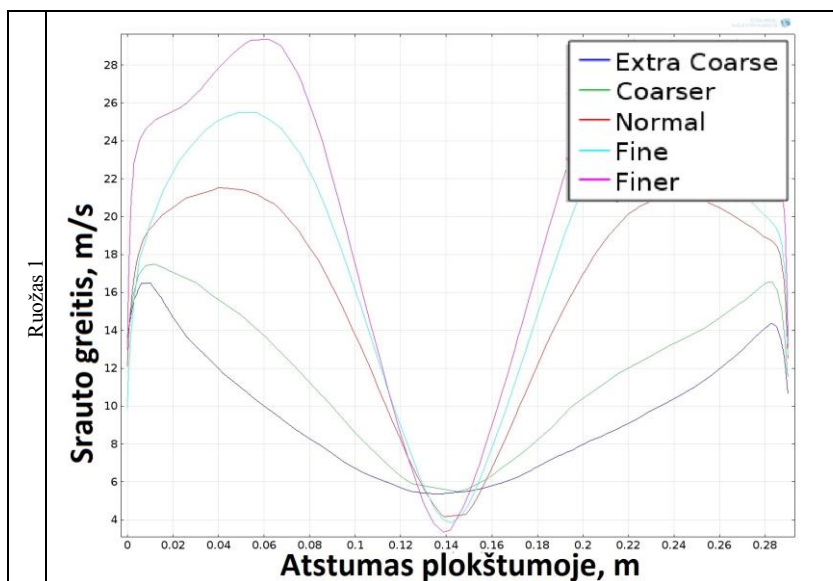
1 pav. Matavimo ruožų išdėstymas ir tangentinio ciklono principinė schema

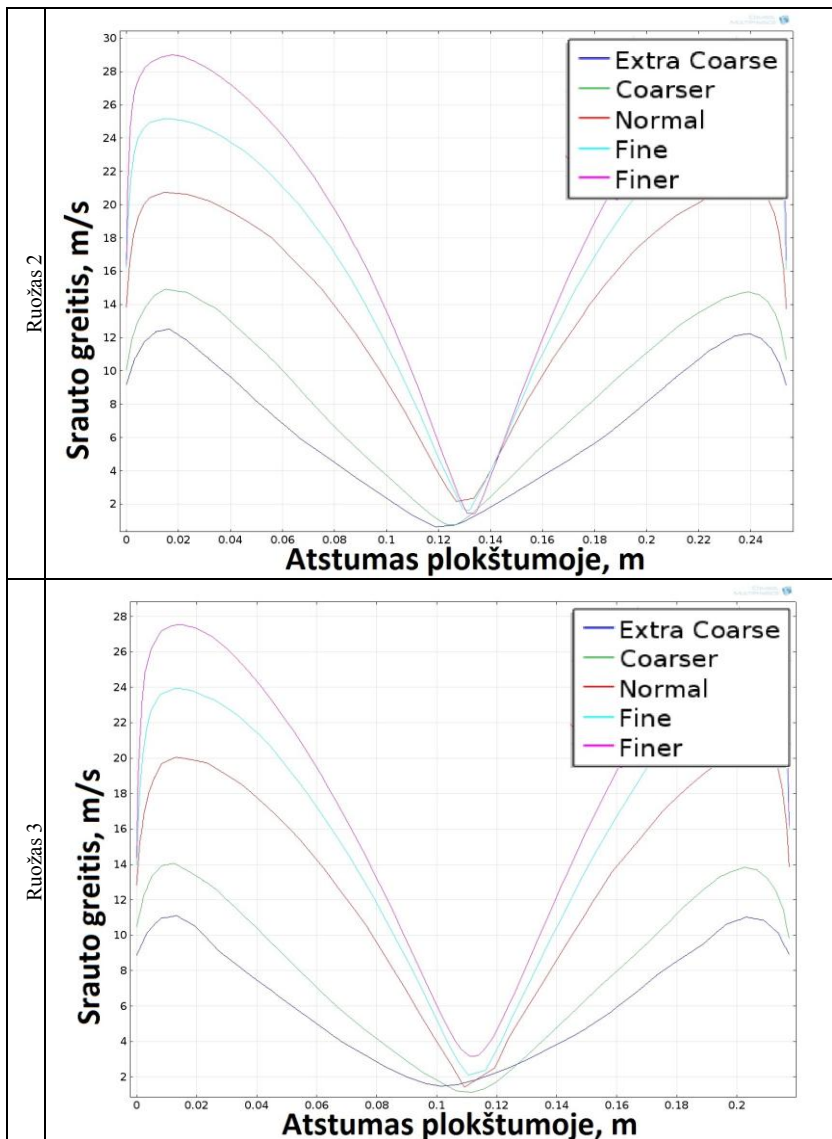
Tinklelis sukurtas COMSOL programoje automatinio būdu. Tinklelis yra nestruktūrinis. Didžiausias tinklelis, kuriam užteko kompiuterio resursų, buvo padarytas su 5,11 mln. elementais. Toliau pateikta 2 lentelė su svarbiausiomis tinklelių charakteristikomis.

2 lentelė. Skirtingo tankumo tinklelio savybės

Tinklelio tipas	Elementų skaičius, mln	Minimali elementų kokybė	Elementų kokybės vidurkis	Vidutinis augimo greitis
Extra Coarse	0,038	4,842E-4	0,4437	2,721
Coarser	0,096	2,272E-4	0,4906	2,16
Normal	0,472	0,001425	0,5733	1,791
Fine	1,36	1,393E-4	0,6006	1,71
Finer	5,11	9,533E-5	0,6365	1,64

Atliktas tinklelio kokybės patikrinimas, didinant tinklelio tankį (2 pav.). Naudojant skirtingo tankio tinklelį tangentinis greitis kisdavo. Tinklelių su aukšta ir aukščiausia kokybe (Fine-Finer) pokytis siekia iki 17 %. Šis pokytis yra per didelis, todėl pagal visas metodikas, šį tinklelį reiktų dar tankinti. Dėl kompiuterio resursų nepakankamumo tikslesnio tinklelio nebuvo galima apdoroti, todėl rezultatus palyginti naudojamas Finer tipo tinklelis.

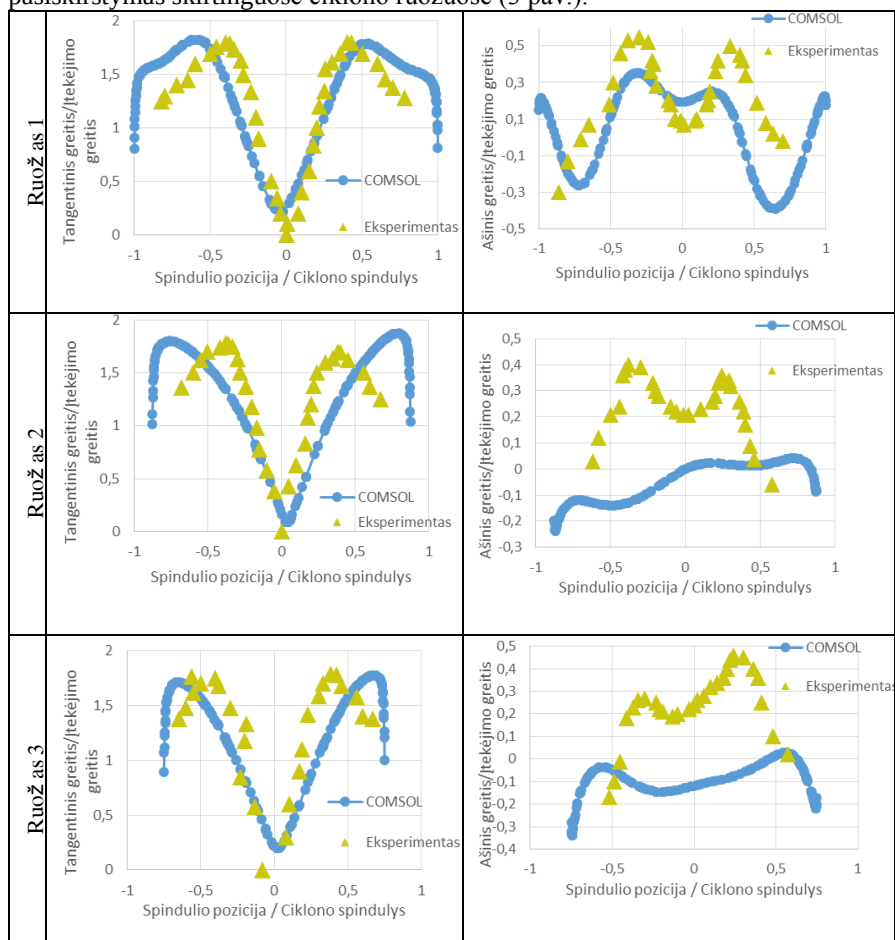




2 pav. Srauto tangentinio greičio priklausomumas nuo tinklelio tankumo

Skaitinių tyrimų rezultatų palyginimas su eksperimentiniais duomenimis (validacija). Tankiausio (Finer) tinklelio skaičiavimo trukmė siekė iki 27 valandų su Intel® Core™ i7-3930K 3,2 GHz procesoriumi. Rezultatai buvo lyginami su

Hoekstra eksperimento rezultatais. Lyginamas srauto tangentinis ir ašinis greičio pasiskirstymas skirtinguose ciklono ruožuose (3 pav.).



3 pav. Tangentinio ir ašinio srauto greičio pasiskirstymas ruožų pjūviuose.
Palyginimas tarp skaitinio tyrimo rezultatų ir eksperimento duomenų

Srauto tangentinio greičio pasiskirstymas ties ciklono centru yra panašus į eksperimento duomenis. Tolstant nuo centro duomenys nebesutampa ir susidaro didesnė paklaida. Maksimali tangentinio greičio pasiskirstymo paklaida siekia iki 38 %, tendencijos yra panašios. Srauto ašinio greičio skirtumas yra didelis, paklaida siekia 51 %. Tendencijos neatitinka eksperimento rezultatų. 1-ame ruože ašinis greitis rodo, jog oro prie sienelės greitis yra teigiamas – kyla aukštyn, o experi-

mente – neigiamas, leidžiasi žemyn. Šioje vietoje neatkuriamas ciklono principinis tekėjimas, kai ties sieniele oras turėtų leistis žemyn.

Dėl kompiuterio resursų trūkumo, nepakankamos operatyviosios atminties (RAM) 32 GB, susidarė du neišspręsti uždaviniai: nebuvo validuotas tinkelio tankumas ir taikytas tik izotropiško turbulentiškumo modelis $k-\omega$.

Išvados ir rekomendacijos

1. Skaitiniame tyrime taikytas $k-\omega$ turbulencijos modelis, nestruktūrinis ir nevaliduotas tinklelis.
2. Srauto tangentinio greičio paklaida nuo eksperimentinių rezultatų siekė iki 38 %, bet tendencijos išliko panašios. Srauto ašinio greičio paklaida nuo eksperimentinių rezultatų siekė iki 51 %, ir kai kur tendencijos išsiskyrė. Šio tyrimo rezultatai nesutapo su eksperimentiniais tyrimo duomenimis. Todėl reikia tobulinti skaitinio tyrimo metodiką.

Literatūra

1. Singh R. and Shukla A. A review on methods of flue gas cleaning from combustion of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 854-864 2014.
2. Kosaki Y., Hirai T., Yamanaka Y., & Takeshima K. Investigation on dust collection and particle classification performance of cyclones by airflow control for design of cyclones. *Powder Technology* 277: 22-35, 2015.
3. Ko J. Numerical modelling of highly swirling flows in a cylindrical through-flow hydrocyclone, 2005.
4. Stephens D. W., & Mohanarangam K. Turbulence model analysis of flow inside a hydrocyclone. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 10(5-6), 366-373, 2010.
5. Zhu, Guofeng, Liow J., and Neely A. Computational study of flow in a micro-sized hydrocyclone. 17th Australasian Fluid Mechanics Conference, Auckland, New Zealand, Paper. Vol. 75, 2010.
6. Davailles A. Effet de la concentration en solide sur les performances de separation d'un hydrocyclone (simulations numériques et experiences de references), 2011.
7. Guo G. D., Deng S. S., & Hua W. X. Comparison of different grid structures for the hydrocyclone flow field simulation. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 353, 2013.
8. AlaaHusaeenAl-Fatlawi. Simulation model to predict velocity and pressure distribution inside the hydrocyclone in water treatment plant, *International journal of civil engineering and technology*. Vol. 5, Issue 5, pp. 51-60, May 2015.

9. Mikulčić H., Vujanović M., & Duić N. Large eddy simulation of a two-phase reacting swirl flow inside a cement cyclone. *Energy* 75: 89-96, 2014.
10. Ropelato K., Fontes C. E., Fusco J. M. On CFD practices for cyclones simulation. 7th International conference on multiphase flow, 2010.
11. Saberi S. Numerical Model and Analysis on Performance of a Straight-Through Swirl Tube Cyclone. Master thesis. Concordia University, 2014.
12. Sevilla E. M. and Branion R. M. R. The fluid dynamics of hydrocyclones. *Journal of pulp and paper science* 23.2, J85-J93, 1997.
13. Witt P. J., et. al. Validation of a CFD model for predicting gas flow in a cyclone. *Chemeca 99: Chemical Engineering: Solutions in a Changing Environment*: 246, 1999.
14. Ma L., Ingham D. B., and Wen X. Numerical modelling of the fluid and particle penetration through small sampling cyclones. *Journal of Aerosol Science* 31.9: 1097-1119, 2000.
15. Khairy E. Analysis and optimization of cyclone separators geometry using RANS and LES methodologies, Doctoral dissertation, Vrije Universiteit Brussel, 2011.
16. COMSOL Multiphysics User's Guide v 4.3, 2012.
17. Hoekstra A. J. Gas flow field and collection efficiency of cyclone separators Doctoral dissertation, TU Delft, Delft University of Technology, 2000.

Numerical simulation and validation of tangential inlet cyclone

Summary

This paper presents numerical simulation of the fluid flow in a tangential inlet cyclone. Study was performed using COMSOL Multiphysics program, unstructured mesh and $k-\omega$ turbulence model. Results were validated using A. J. Hoekstra experiment data. Tangential velocity error reached up to 38%, but trend was similar to experimental results. Axial velocity error reached up to 51% and trend was opposite at some measuring points.

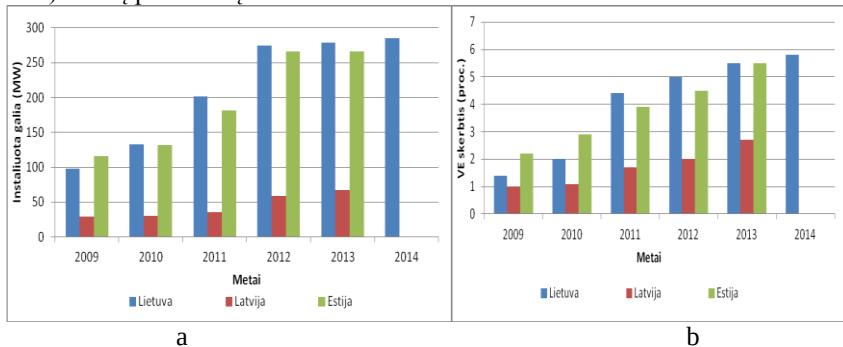
Numerical simulation results were not validated with experimental data and presented methodology requires improvement.

Vėjo elektrinių parkų Baltijos šalyse efektyvumo tyrimas

Giedrius Gecevičius, Antanas Markevičius
Lietuvos energetikos institutas

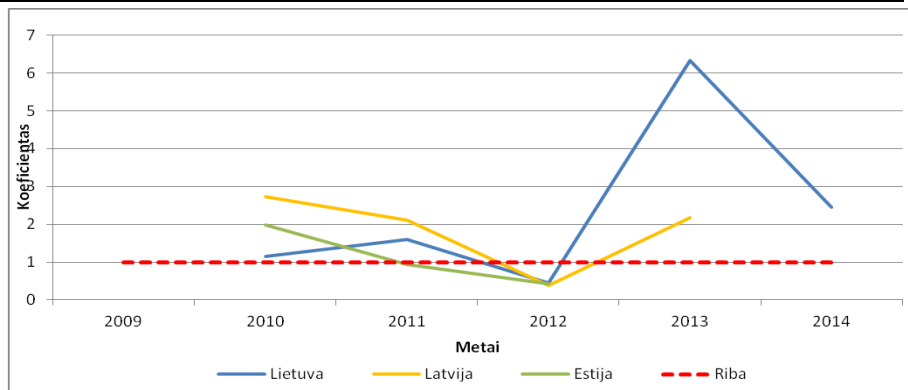
Žvelgiant į vėjo energetikos raidą globaliu mastu, vėjo energetika pirmauja tarp visų atsinaujinančių energijos išteklių pagal instaliuotą galią 318 GW, 2013 m. (REN21, 2014). Tačiau tuo pačiu metu yra stebimas akivaizdus instaliuotų galių augimo ir skverbties į elektros tinklus tempų neatitikimas.

Pavyzdžiui, jeigu nuo 2000 m. iki 2012 m. VE instaliuotoji galia kasmet išaugdavo apie 24 % (IEA, 2014), tai elektros energijos skverbtis į elektros tinklus pradėjo didėti tik nuo 2008 m. po 0,3 % kasmet ir šiuo metu sudaro apie 2 % visos pasaulyje gaminamos elektros energijos, t. y., augimo sparta yra apie 17 %. Šios spartos santykinis dydis, kuris yra apie 0,71, parodo, kad VE gaminamos energijos augimas neatitinka instaliuotų galių augimo. Galima daryti prielaidą, jog toks minėtos augimo spartos neatitikimas susidaro dėl kelių priežasčių. Pirmiausia dėl technologijų neefektyvumo, mažas generuojamų galių išnaudojimo koeficientas (C_F) dėl VE konstrukcinių savybių, prastas VE statybos vietų parinkimas (mažas vėjingumas), dėl vietinės elektros rinkos ypatumų (pasiūlos ir paklausos neatitikimas) ir kitų priežasčių.



1 pav. VE instaliuota galia (a) ir skverbtis į elektros tinklus (b) Baltijos šalyse (Bobinaitė, 2015)

Dėl palankaus politikų ir visuomenės požiūrio vėjo elektrinių suminė įrengtoji galia ir skverbtis į Baltijos šalių elektros tinklus sparčiai didėja (1 pav.). Santykiniai VE skverbties ir instaliuotų galių metiniai padidėjimo dydžiai visose Baltijos šalyse viršija vieną beveik visais tyrinėtų metų periodais (2 pav.). Tai parodo, kad vėjo energetika Baltijos šalyse vystoma gana efektyviai, skverbties prieaugis per metus tolygus instaliuotų galių prieaugiui.



2 pav. Vė skverbties ir instaliuotų galių procentinių pokyčių santykis Baltijos šalyse

Vėjo elektrinių generuojama galia priklauso nuo vietovės vyraujančių vėjo krypčių bei vėjo greičio. Vėjo greičio pasiskirstymo parametrai geriausiai aprašomi Veibulo pasiskirstymo tankio funkcija, jos išraiška parodyta (1) formulėje:

$$p(v) = \frac{k}{v} * \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (1)$$

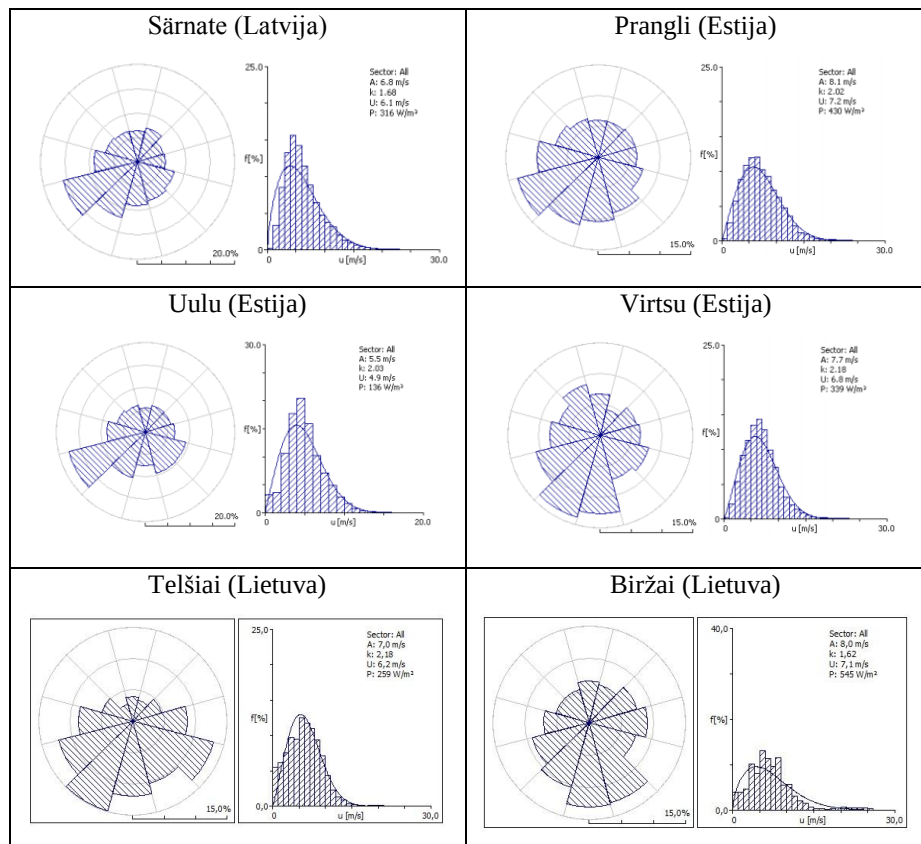
$p(v)$ – vėjo greičio tikimybė;

k – Veibulo skirstinio formos parametras;

A – Veibulo skirstinio skalės parametras.

Kaip matome iš 3 pav. pateiktų Baltijos šalių kai kurių teritorijų vėjingumo parametrų ir vėjo krypčių tyrimo rezultatų, vyraujančių vėjų kryptys yra pietų-pietvakarių. Veibulo skirstinio formos parametras k kinta nuo 1,68 iki 2,18, A – skalės parametras nuo 5,5 iki 8,0 m/s, P – energijos tankis nuo 245 iki 548 W/m², vidutinis greitis U nuo 4,95 iki 7,2 m/s. Visi šie parametrai palankūs vėjo energetikai plėtoti visose Baltijos šalyse, ypač pajūrio zonoje.

Apibendrinti vidutinio vėjo greičio, energijos tankio bei vyraujančios vėjo krypties duomenys pateikti 1 lentelėje.



a

b

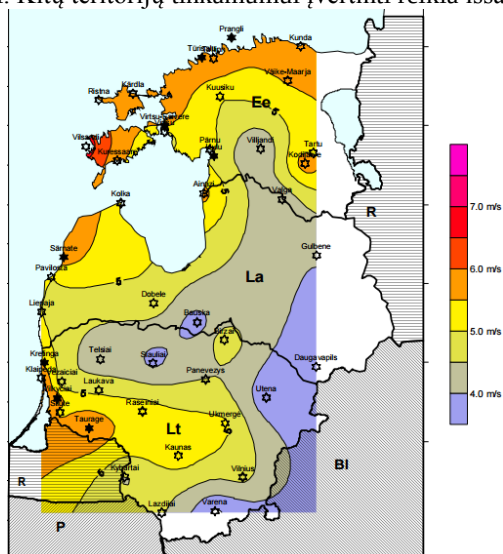
3 pav. Baltijos šalių Vėjų rožė (a) ir Veibulo skirstinys (b)

1 lentelė. Vėjingumo parametrai Baltijos šalyse

Meteorologijos stotis	Vidutinis vėjo greitis 100 m (m/s)	Energijos tankis (W/m ²)	Vyraujanti vėjo kryptis
Telšiai (Lietuva)	6,2	259	Pietų
Biržai (Lietuva)	7,1	545	Pietų
Särnate (Latvija)	6,1	316	Pietvakarių
Prangli (Estija)	7,2	430	Pietvakarių
Uulu (Estija)	4,9	136	Pietvakarių
Virtsu (Estija)	6,8	339	Pietvakarių

Pagal vėjo matavimo duomenis Danijos Risø Nacionalinė laboratorija parengė Baltijos šalių vėjo atlasą (4 pav.). Kaip matome iš šio žemėlapis, vėjingiausias

vietos visose šalių teritorijose yra pajūrio zonose, kurios tęsiasi nuo jūros kranto žemyno link nuo 50 iki 100 km atstumu. Šios vietovės yra tinkamiausios vėjo energetikai plėtoti. Kitų teritorijų tinkamumui įvertinti reikia išsamesnių tyrimų.



4 pav. Baltijos šalių vėjingumo atlasas, Danijos Risø Nacionalinė laboratorija, 2003 m.

VE galios išnaudojimo koeficientas (C_F) yra vienas svarbiausių rodiklių vertinant vėjo elektrinių efektyvumą. Straipsnyje analizuojama vėjo elektrinių parkų Lietuvoje, Latvijoje ir Estijoje C_F koeficientų kaita bei jų priklausomumas nuo vėjo energetinių parametrų.

VE galios išnaudojimo koeficientas skaičiuojamas kaip pagamintas energijos kiekio santykis su teoriškai įmanomu pagaminti energijos kiekiu per metus:

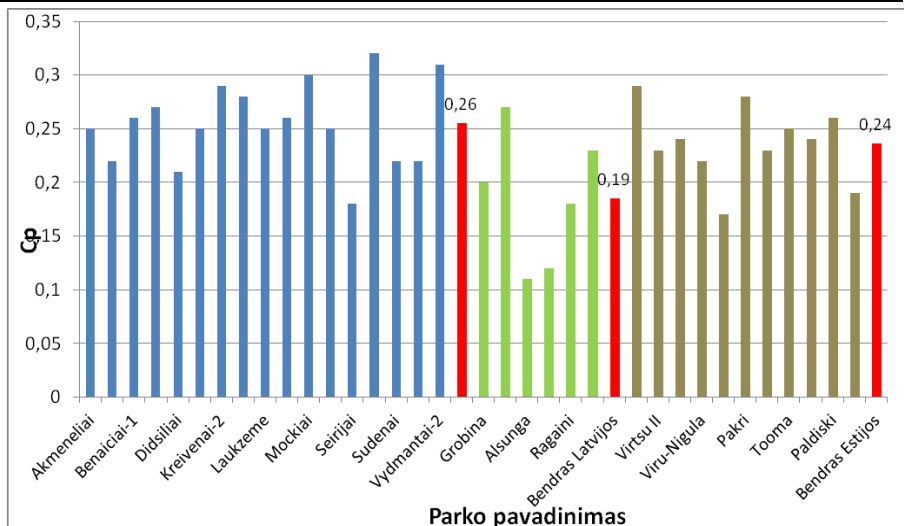
$$C_F = \frac{E_{fact}}{E_{pot}} \quad (2)$$

C_F – galios išnaudojimo koeficientas;

E_{fact} – pagamintas energijos kiekis per metus (GWh);

E_{pot} – teoriškai įmanomas pagaminti energijos kiekis per metus (GWh).

Jis gali būti skaičiuojamas vienai VE atskirai, parkui arba visos šalies parkams bendras. Šiame straipsnyje pateikiami C_F skaičiavimo duomenys VE parkams Baltijos šalyse (4 pav.).



4 pav. VE parkų CF Baltijos šalyse

Kaip matome iš pateiktų skaičiavimo rezultatų, VE parkų C_F koeficientai yra skirtingi visose Baltijos šalyse, ir jų reikšmės varijuoja nuo 0,11 iki 0,32. Tai rodo skirtingą VE parkų darbo efektyvumą. Efektyviausiai dirba Lietuvos ir Estijos elektrinės, prasčiausiai – Latvijos.

Išvados

1. Galios išnaudojimo koeficientas Lietuvoje ir Estijoje yra panašių dydžių (0,26–0,24), Latvijoje gerokai mažesnis (0,19).
2. VE galios išnaudojimo koeficientų analizė parodė, jog C_F atskirais metais kinta nežymiai, 1–2 procentų ribose.
3. VE skverbties ir instaliuotų galių procentinių pokyčių santykio analizė parodė, kad vėjo elektrinių skverbties augimas neatsilieka nuo instaliuotų galių augimo. Tai rodo efektyvų VE darbą.

Literatūra

1. Bobinaite, V. (2015). Financial sustainability of wind electricity sectors in the Baltic States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 794–815.
2. REN21. *Renewables 2014 Global Status Report*, 2014. ISBN 978-3-9815934-2-6.
3. International Energy Association, 2014. *World Energy Outlook 2014*.
4. The UNDP/GEF Baltic Wind Atlas, 2003. ISBN 87-550-3204-4.

Investigation of wind farms efficiency in the Baltic States

Summary

Wind energy is one of the most rapidly growing energy sectors in the Baltic States. Annual wind power production depends on wind direction and average wind speed. To evaluate efficiency of wind turbines or farms one of the main indicators is Capacity factor (C_F). Paper presents dependence wind farms efficiency on wind energy parameters in Lithuania, Latvia and Estonia.

Biodujų ir biodegalų išteklių panaudojimo didinimo galimybių analizė

Juozas Savickas, Vladislovas Katinas, Marijona Tamašauskienė
Lietuvos energetikos institutas

Biodujų ir biodegalų gamybos klausimai užima svarbią vietą šių dienų AEI energetikoje. Straipsnyje pateiktas šių išteklių esamos padėties įvertinimas bei jų plėtros 2020 metams prognozės. Biodegalų (biodujų, biodyzelino ir bioetanolio) gamybos pramonė Lietuvoje buvo sukurta ir išplėtotą pakankamai sparčiai. Tačiau iš dalies kintant ES biodegalų direktyvos nuostatomis, kyla poreikis atlikti įgyvendintų projektų veiklos palankių ir nepalankių priežasčių produkcijos gamybos bei vartojimo efektyvumui vertinimą.

Užsienio šalių patirties šioje srityje pagrindu bei Lietuvoje veikiančių įmonių rezultatais įvertintas biodujų ir biodegalų energetikos indėlis AEI energetikoje. Paliesti principai, kuriais vadovaujantis rekomenduojama tiksliau nustatyti AEI rūšių investicinių projektų prioritetus. Išnagrinėjus teorinius ir praktinius įgyvendintų projektų veiklos aspektus, pateikiamos išvados ir rekomendacijos bei pasiūlymai išskylančioms bei galimoms problemoms spręsti.

Panagrinėti biodujų ir biodegalų gamybos problemas nauju aspektu paskatino Europos Parlamento siekis skatinti naujos kartos biodegalų gamybą, siūlant apriboti pirmos kartos biodegalų gamybą iš žemės ūkio maistui skirtų kultūrų ir paskatinti gaminti antros kartos biodegalus, kurie būtų gaminami iš augalinės kilmės biomasės atliekų ir net iš jūros dumblių [1]. Tai leistų sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją dėl intensyvaus žemės naudojimo aliejingoms kultūroms auginti sumažinimo. Dėl naujų normų nuolat deramasi su ES Taryba, siekiant būtinybės apriboti pirmos kartos biodegalus. Tai svarbus signalas, kad nuo 2020 m. reikia sutelkti paramą pažangiesiems antros kartos biodegalų gamintojams [2]. Be to, siekiant didinti biodegalų gamybos efektyvumą, EK svarstomas žiedinės ekonomikos veiksmų planas, kuriuo numatoma sudaryti uždarą produktų gyvavimo ciklą, kuriame bus perdirbama daugiau atliekų ir jos bus naudojamos pakartotinai, ir todėl naudos tikimasi tiek aplinkai, tiek ekonomikai. Pirmos kartos biodegalų gamybos technologijose naudojamos maistui skirtos žaliavos – grūdinės kultūros, rapsų sėklos – turėjo greičiau neigiamos įtakos ekonomikai nei teigiamos. Todėl pastaruoju metu suaktyvėjo siūlymas diegti antros kartos biodegalų gamybos technologijas. Nepaisant to, kad visos antros kartos biodegalų gamybos technologijos pakankamai gerai žinomos, bet pramonės sukūrimas pareikalaus daug laiko, pastangų ir lėšų. Todėl esamomis sąlygomis, siekiant įgyvendinti antros kartos biodegalų gamybą praktikoje, reikia įvertinti jų gamybos ekonominį efektyvumą bei turimų žaliavų potencialą, nes didžioji dauguma žaliavų, tinkamų antros kartos

biodegalams gaminti, jau plačiai naudojama kitose energetikos srityse šilumai bei elektros energijai gaminti.

Esama padėtis biodujų gamybos pramonėje. Biodujų gamybos apimčių iš atsinaujinančių energijos išteklių prognozavimas iki 2020 m. turi būti vertinamas atsižvelgiant į šios pramonės esamą padėtį pasaulyje bei mūsų šalyje. Tik atlikus išsamią biodujų (ir biodegalų) gamybos analizę, galima daryti ilgalaikes, daugiau ar mažiau realias optimistines prognozes. Pradinės analizės patirtis byloja, kad esamomis sąlygomis sunku tikėtis prognozių išsipildymo, nes jos priklauso nuo daugelio faktorių, ir galimos tik esant stabilioms, verslą reglamentuojančioms teisinėms sąlygoms. O jos ne tik mūsų šalyje, bet ir kai kuriose kitose ES šalyse, dažnai keičiamos bei koreguojamos, kas jau turėjo neigiamos įtakos biodegalų pramonės kūrimo stabilumui mūsų šalyje, bei sukėlė didelių sunkumų ir finansinių nuostolių verslui.

Biodujų gamybos pirmą kartą pritaikymo paskirtis buvo mažinti aplinkos teršimą miestų nuotekomis, vėliau – ir kiaulininkystės kompleksų srutomis, maisto perdirbimo pramonės įmonių technologinėmis atliekomis. O ištobulinus anaerobinio organinių atliekų apdorojimo įrengimus ir technologijoms pasiekus pakankamai aukštą lygį, įvertintas ir jų teigiamas poveikis klimato kaitą skatinančių dujų emisijoms į atmosferą mažinti. Toliau plėtojant anaerobinio organinių atliekų apdorojimo technologijas, jos buvo priskirtos labiau šiluminės bei elektros energijos gamybos sričiai, negu ekologijai. Taip biodujos buvo priskirtos atsinaujinantiems energijos ištekliais. Todėl, be natūraliai susidarantių organinių atliekų, atsirado poreikis ieškoti papildomų žaliavų, tinkamų biodujoms gaminti. Be to, siekiant didesnės biodujų išeigos, pradėti naudoti papildomi priedai – panaudoti augalinės bei gyvulinės kilmės riebalai, žuvų taukai, augalinė biomasė ir kt. Vakaruose tapo populiariu biodujas gaminti ne iš organinių atliekų, o iš specialiai tam auginamos augalinės kilmės biomasės, populiariausia iš kurių – kukurūzų silosas.

Lietuvoje biodujų pramonės pradžia ir plėtra vyko pakankamai sunkiai ir netolygiai. Pirmoji biodujų jėgainė Lietuvoje, kurioje buvo gaminama šilumos ir elektros energija, buvo pastatyta 2003 m. danų specialistų iniciatyva ir su jų organizacine bei finansine parama. Per praėjusius 13 metų, nuo 2003 m., pasiekta pakankamai gerų rezultatų – bendra instaliuota elektrinio pajėgumo galia, naudojant biodujas, nuo 0,185 MW buvusių 2003 m., 2015 m. sudarė daugiau nei 26 MW_{el}. Lietuvos biodujų gamybos pramonei būdinga tai, kad pagrindinė žaliava jų gamybai yra organinės atliekos, kurių didžiausia dalis yra kiaulininkystės kompleksų mėšlas, papildomai pridedant įvairius riebalinius priedus. Manoma, kad prognozuojant biodujų gamybos verslą iki 2020 m. ir toliau, optimistiniu vertinimu galima orientuotis į kiaulininkystės kompleksuose bei paukštynuose susidarantį mėšlo kiekius. Dėl eilės priežasčių, biodujų gamybos tikslams Lietuvoje dar nėra naudojamas galvijų, bei kitų naminių gyvulių mėšlas. Esant poreikiui ir finansinėms galimybėms, šios atliekos gali būti įvertintos kaip papildomas biodujų gamybos

potencialas. Be to, pakankamai dideli skystų organinių atliekų kiekiai susidaro maisto perdirbimo pramonės įmonėse: spirito, alaus, mėsos perdirbimo įmonėse bei skerdyklose, aliejaus bei kitose įmonėse. Tačiau šios žaliavos koncentruotame pavidale biodujoms gaminti nenaudojamos, o paprastai pridedamos kaip priedai biodujų išėgai iš miestų nuotekų bei kiaulių mėšlo padidinti.

Pastaraisiais metais vis dažniau populiarioje spaudoje bei mokslinėse publikacijose pasirodo informacijos, siūlančios biodujas gaminti iš specialiai tam auginamų kukurūzų ar liucernos siloso. Europos šalyse yra veikiančių, šią žaliavą naudojančių, įėgainių. Tačiau, nepaisant santykinai aukštos biodujų išėigos šiose įėgainėse, bendras jų efektyvumas yra ganėtinai žemas, nes jos, skirtingai nuo organines atliekas nukuksminančių biodujų įėgainių, labiau vertinamos vien energetiniu požiūriu, nesprendžiant ekologinės paskirties problemų. Šios įėgainės gali būti vertinamos išimtinai socialinėms problemoms spręsti, dirbtinai sukuriant darbo vietas vietiniuose regionuose, siekiant gyventojų užimtumo.

Siekiant plačiau diegti anaerobinių organinių atliekų apdorojimą Lietuvoje, reikia aktyviau ieškoti papildomų, šių technologijų panaudojimo savikainą mažinančių faktorių, vienas iš kurių galėtų būti ekologiškų organinės kilmės trąšų gamyba iš anaerobiškai apdoroto substrato. Nepaisant atkakliai propaguojamos ir intensyvėjančios ekologiškų daržovių auginimo ūkių plėtros, didesnės paklausos ekologiškoms trąšoms šalyje neatsiranda. Reikia siekti, kad artimiausioje ateityje vystant bioenergetikos pramonę, būtų sukurta palankios sąlygos prie biodujų gamybos įėgainių steigti ekologiškų trąšų gamybos įmones, kurios galimai sumažintų anaerobinio organinių atliekų apdorojimo technologijų savikainą, tuo pačiu padidinant jų efektyvumą. Tačiau siekiant kompleksinio efektyvumo, svarbiausias dėmesys turi būti kreipiamas biodujų gamybos ir vartojimo *aplinkosauginiam, o tik po to ekonominiam* efektyvumui, nes sprendžiamos vienodai svarbios problemos: aplinkos teršimo kenksmingais išmetimais mažinimo, technologijų ir įrengimų savikainos mažinimo bei iš dalies iškastinių importuojamų energijos išteklių naudojimo energijai gaminti pakeitimo vietiniais atsinaujinančiais ištekliais.

Biodegalų gamybos ir vartojimo aspektai. Biodegalų (biodyzelino ir bioetanolio) gamybos pramonė Lietuvoje buvo sukurta ir vystėsi pakankamai sparčiai. Sėkmingai pasinaudojant ES subsidijomis Europos Parlamento ir Tarybos Biodegalų Direktyvos 2003/30/EK bei vėlesnės – 2009/28/EK įpareigojimams vykdyti, verslininkai ėmė milijonines paskolas bankuose, tad per palyginti trumpą laiką šalyje buvo pastatytos kelios modernios įvairaus gamybinio pajėgumo biodegalų gamybos įmonės. Kaip ir tikėtasi, buvo sukurta šimtai papildomų darbo vietų. Šilutėje pradėjo veikti dehidraduoto bioetanolio gamykla „Biofuture“, Mažeikių rajone – biodyzelino gamykla „Rapsoila“. Per kelerius metus biodegalų gamintojai, sėkmingai pasinaudodami ES parama, investuodami milijonus didino biodegalų gamybos pajėgumus. Tikėdami palankiomis ES prognozėmis, Lietuvos verslininkai sparčiai vystė biodegalų gamybos pramonę ir greitai laiku ekologiškesnių dega-

Iš jau galėjo pagaminti dvigubai daugiau negu reikalavo ES Direktyvos. Išnaudami vos apie 60 % gamybinių pajėgumų, vietoj reikalaujamų 5 %, galėjo pagaminti daugiau nei 10 % „žaliųjų“ degalų. Didžiausios šalies biodyzelino gamybos įmonės – UAB „Mestilla“ ir UAB „Vaizga“ kasmet buvo pajėgios pagaminti apie 140 tūkst. tonų biodyzelino, o bioetanolį gaminančių įmonių – „Biofuture“ ir „Kurana“ metinis projektinis pajėgumas siekė apie 60 tūkst. tonų dehidraduoto bioetanolio. Be šių įmonių, Lietuvoje veikė dar 5-6 įmonės, tiekiančios rapsų aliejų biodegalams gaminti. Be to, biodegalų pramonės plėtra turėjo teigiamos reikšmės papildomoms darbo vietoms sukurti ir šalies kaime, nes dirvonuojančių žemės plotų sąskaita buvo išplėsti rapsų ir grūdinių kultūrų, skirtų biodegalams gaminti, pasėlių plotai.

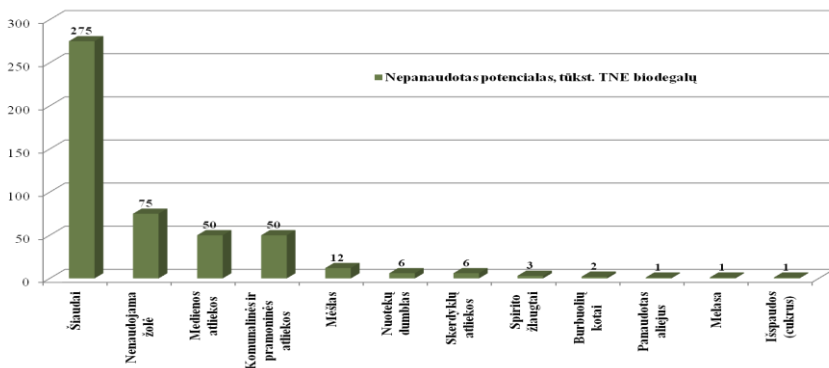
Tačiau nuolat keičiantis ES politikai, šalies biodegalų pramonė, patirdama ženklus finansinius nuostolius, priversta iš dalies keisti veiklos pobūdį arba bankrotuoti. Kadangi vienas svarbiausių biodegalų vartojimo tikslų buvo mažinti klimato kaitą skatinančių dujų emisiją, bet kuriuo atveju tenka ieškoti naujų šią kaitą mažinančių alternatyvių priemonių. Nes ES klimato kaitos politikos strategijoje [3] įsipareigota, jau iki 2020 m. šiltnamio efektą sukuriančių dujų emisiją sumažinti 30 proc., iki 2030 m. – 40 proc. ir iki 2040 m. – 60 procentų. Tad sumažėjus pirmos kartos biodegalų gamybos apimtims, šiems tikslams pasiekti ir siekiant išvengti finansinių nuostolių, reikia patikslinti visų kitų atsinaujinančių energijos išteklių panaudojimą. Esamomis sąlygomis pirmos kartos biodegalų pramonė išsėmė racionalias galimybes ir jos tolesnė plėtra iki 2020 m. neturi aiškių perspektyvų.

ES, skatinusi ir rėmusi šią gamybą, staiga pasuko kitu keliu – biodegalų iš maisto žaliavų gamybą siūlo mažinti iki 5 proc. ir didinti paramą vadinamųjų antros ir trečios kartos biodegalų, gaminamų iš atliekų ir nemaistinių žaliavų, gamintojams. Lietuvos biodyzelino ir bioetanolio gamintojai jau 2013 m. viduryje, išnaudodami tik apie 60 proc. savo gamybinių pajėgumų, galėjo pagaminti daugiau nei 10 proc. „žaliųjų“ degalų [4]. Dvi biodyzelino gamintojos (UAB „Mestilla“ ir UAB „Vaizga“) galėjo pagaminti 140 tūkst. tonų biodegalų, o dviejų bioetanolį gaminančių bendrovių „Biofuture“ ir „Kurana“ gamybos pajėgumai – 60 tūkst. tonų degalų. Tačiau persiorientuojant į antros kartos biodegalų gamybą, šie pajėgumai tampa aiškiai pertekliniais ir nuostolingais ekonominiu požiūriu.

Viena perspektyviausių antrosios kartos biodegalų technologijų – lignoceliuliozės perdirbimas – jau gerokai pažengė į priekį. ES įkurtos trys bandomosios gamyklos – Švedijoje, Ispanijoje ir Danijoje. Kitos technologijos, kuriomis biomasė paverčiama skystais biodegalais (BtL), apima Fischer-Tropsch biodyzeliną ir bio-DME (dimetilo eteris). Parodomosios gamyklos veikia Vokietijoje ir Švedijoje – (<http://www.bioenergybaltic.ee/?id=1578>).

Vakarų šalyse kur kas geriau finansuojama alternatyvių degalų gamyba, todėl ten yra labiausiai išplitusi biodegalų gamyba iš biomasės ir jos atliekų.

Teoriniu požiūriu ir mūsų šalyje pakankamai gerai žinomos technologijos, leidžiančios gaminti *bioetanolį* iš celiuliozės turinčių medžiagų (žemės ūkio, medienos ir net komunalinių atliekų) ir atskirų namų ūkio atliekų. Tačiau esant silpnai šalies ekonomikai, praktikoje antros kartos biodegalų gamyba šalyje neperspektyvi kad ir dėl to, kad tik šiaudų potencialas pilnai nesunaudojamas kitoms energijos rūšims.



1 pav. Antros kartos biodyzelino plėtros potencialas ES transporto sektoriuje (prognozės), mln. l.

(SMART CONTINENT. <http://www.smartcontinent.com>)

Be to, turint ribotus žaliavų išteklius, ekonomiškai neapsimoka ir netikslinga kurti mažo gamybinio pajėgumo antros kartos biodegalų gamybos įmones, ypač tuo laikotarpiu, kuomet mineralinių degalų kainos yra rekordiškai nukritusios.

Išvados

1. Prieš įsipareigojant vykdyti naujose ES Direktyvose svarstomus reikalavimus gaminti antros kartos biodegalų gamybos ir vartojimo srityje, būtina atlikti preliminarą galimybių analizę, įvertinti ekonominį bei ekologinį tikslumą. Tai įgalins išvengti pirmos kartos biodegalų gamybos projektuose padarytų klaidų ir sumažinti investicijas pramonei kurti.
2. Siekiant mažinti šalies biodegalų gamintojų nuostolius, „Mažeikių naftai“ ieško galimybių biodegalų priedus pirkti iš Lietuvos gamintojų, o Lukoil ir Statoil biodegalus pikti ne Norvegijoje, o iš Lietuvoje esančios gamyklos.
3. Analizuojant AEI vystymąsi Lietuvoje nustatyta, kad kai kurių AEI rūšių perteklinis finansavimas iškreipia rinkos sąlygas ir didina energijos kainas šalies vartotojams. Biodegalų gamintojams sudaryti palankesnes sąlygas naudoti Lietuvoje užaugintas žaliavas, taip pagerinant sąlygas šalies žemdirbiams.

4. Vertinant antros (ir trečios) kartos biodegalų gamybos galimybes Lietuvoje, prognozuojama, kad dėl daugelio objektyvių priežasčių, šios rūšies biodegalų perspektyvos labiau rizikingos, nei buvo pirmos kartos degalams – prognozės labai pesimistinės.

Literatūra

1. http://www.greenenergy.com/Environment/perspectives/02-second_generation_summary.pdf / Energy from waste and wood.
2. <http://energyfromwasteandwood.weebly.com/generations-of-biofuels.html>/The potential for production of second generation biofuels.
3. http://www3.lrs.lt/pls/inter3/dokpaieska.showdoc_l?p_id=437284&p_query=&p_tr2=2/Nacionalinė klimato kaitos valdymo politikos strategija Nr. XI – 2375; 2012.XI.06.
4. Biodegalų gamyba Lietuvoje <https://zum.lrv.lt/lt/veiklos-sritys/zemes-ir-maisto-ukis/bioenergetika/biodegalu-gamyba-lietuvoje/biodegalu-gamyba-lietuvoje-2004-2014-m-tukst-t>

Evaluation of increase the resources for Biogas and Biofuels production

Summary

The article provides information on the status of the production and use of biogas and biofuels in Lithuania, considers the possibility of further development of the second generation biofuels. The main activity in the nearest future for sustainable development could be oriented to produce of second generation fuels from biomass. This increasing role of such fuels and similar problems for energy in country in this paper are analyzed. In order to increase the power efficiency of biogas plant it should be use in co-generation units and need to look for opportunities located in bioreactors to increase the biogas yield. There are different actions that can be done on local level to create favorable conditions for biogas development and to increase the social acceptance of biogas projects.

Ekspperimentinių kietojo biokuro deginimo tyrimų analizė

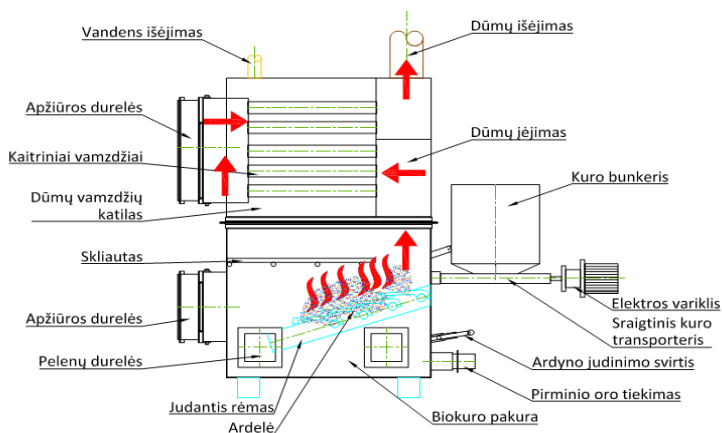
Dominykas Pabarčius*, Titas Sereika*, Kęstutis Buinevičius**

*Kauno technologijos universitetas, ** „Enerstena“ UAB

Atliekant skirtingų kuro sudėčių eksperimentinius deginimo tyrimus bei analizuojant susidarančius degimo produktus, atsirado poreikis gilesnei degimo proceso analizei.

Šio darbo tikslas yra pristatyti atliktus laboratorinės įrangos svarbiausių parametrų nustatymo patobulinimus, kurie leis eksperimentinius tyrimų rezultatus palyginti su teoriniais skaičiavimais bei įvertinti paklaidas, gaunamas dėl realių darbo sąlygų. Darbe taip pat pateikiami pradiniai vykdytų eksperimentinių tyrimų rezultatai.

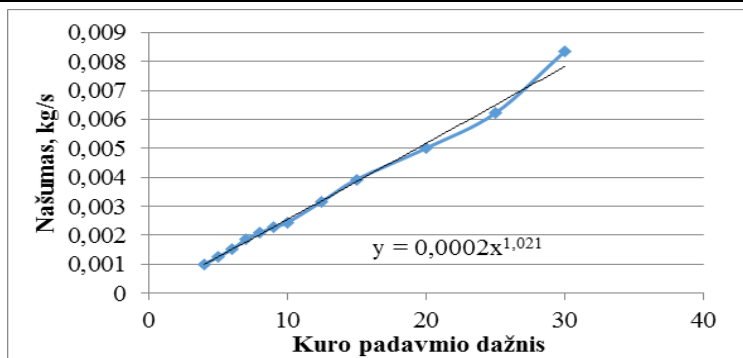
Laboratorinis stendas (1 pav.) – tai pramoninio dūmavamzdžio biokuro katilo, naudojamo šilumos gamyboje, veikiantis modelis. Tyrimo metu dūmų sudėtis dūmtakyje buvo matuojama dūmų analizatoriais Multilyzer NG ir IRM4000.



1 pav. Stendo principinė schema

Visas oras, reikalingas biokuroi sudeginti, suskirstytas į pirminį ir antrinį. Pirminis oras užtikrina oro kiekį, reikalingą kurui ant ardymo sudeginti ir tuo pačiu aušina ardyną. Antrinis oro paskirtis – tinkamai sumaišyti ir sudeginti dujas – lakiuosius komponentus, išsiskyrusius iš biomasės. Kuro deginimui valdyti bei duomenims analizuoti, sudaryti paduodamo kuro masinio debito, pirminio bei antrinio oro tūrinių debitų ir techninių kuro degimo skaičiavimų modeliai.

Kurui tiekti į pakurą naudojamas sraigtinis transporteris, valdomas dažnio keitikliu. Transporteris taruotas medienos 6 mm skersmens granulėmis, nustatant sraigto našumą pagal sraigto pavaros elektros variklio sukimosi dažnį (2 pav.).



2 pav. Kuro sraigo taravimo rezultatai

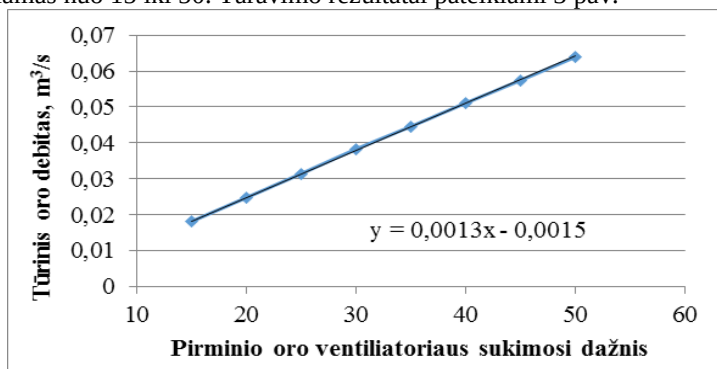
Žinant kuro sraigo pavaros sukimosi dažnį, kuro masinis debitas gali būti randamas iš 2 paveiksle esančio grafiko arba apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$m = 0,0002 f^{1,021} \quad (1)$$

čia: m – našumas, kg/s, f – sraigo pavaros variklio sukimo dažnis.

Oro greičio matavimai atlikti anemometru Mini Air 20. Anemometro vėjaro-dis buvo įmontuotas tiek į pirminio, tiek į antrinio oro padavimo vamzdžius ir atlikti matavimai.

Pirminio oro padavimas reguliuojamas ventiliatoriaus dažnio keitikliu, keičiančiu ventiliatoriaus sukimosi dažnį. Pirminio oro ventiliatoriaus dažnis gali būti keičiamas nuo 15 iki 50. Taravimo rezultatai pateikiami 3 pav.



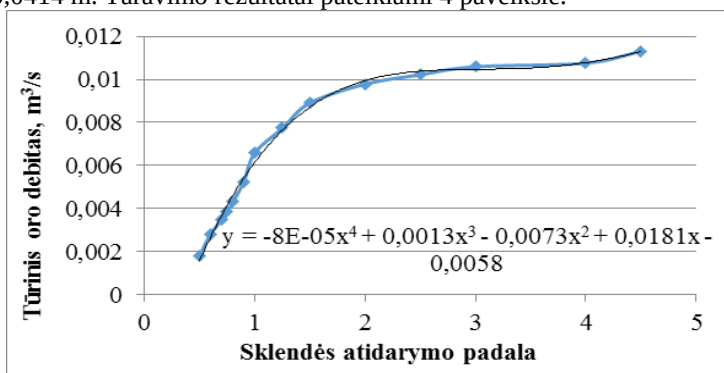
3 pav. Pirminio oro tiekimo sistemos taravimo rezultatai

Žinant pirminio oro ventiliatoriaus sukimosi dažnį, oro tūrinis debitas gali būti randamas pagal grafiką 3 paveiksle arba apskaičiuojamas pagal formulę:

$$m_{t1} = 0,0013 f - 0,0015 \quad (2)$$

čia: m_{t1} – pirminio oro debitas, m^3/s , f – pirminio oro ventiliatoriaus sukimosi dažnis.

Antrinio oro padavimas reguliuojamas sklende, jos atidarymo laipsnis sugraduotas diapazone nuo 0 iki 4,5. Antrinio oro padavimo vamzdžio vidinis skersmuo yra 0,0414 m. Taravimo rezultatai pateikiami 4 paveiksle.



4 pav. Antrinio oro tiekimo sistemos taravimo rezultatai

Žinant antrinio oro sklendės atidarymo padalos vertę, oro tūrinis debitas gali būti randamas iš grafiko 4 paveiksle arba apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$m_{t2} = -8 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 + 0,0013 \cdot x^3 - 0,0073 \cdot x^2 + 0,0181 \cdot x - 0,0058 \quad (3)$$

čia: m_{t2} – antrinio oro tūrinis debitas, m^3/s , x – sklendės atsukimo padalos vertė.

Tiriamąjį darbo metu buvo deginamos įvairios kuro rūšys bei jų mišiniai, kurių cheminė elementinė sudėtis buvo nustatyta. Excel darbo aplinkoje parengtas techninių kuro degimo skaičiavimų modelis. Naudojantis sukurtu modeliu, apskaičiuoti teoriniai degimo produktų (dūmų) ir reikalingo oro kurui sudeginti tūriai. Įvesties duomenų bei rezultatų lentelės pavaizduotos atitinkamai lentelėse 1 ir 2.

1 lentelė. Techninių kuro degimo skaičiavimų įvesties duomenys

Naudojamosios kuro masės sudėtis %							
C^n	H^n	S_d^n	O^n	N^n	A^n	W^n	Oro pertekliaus koef.
30,9	3,2	0,2	17,8	1,3	6,6	40	1,3

2 lentelė. Techninių kuro degimo skaičiavimų rezultatai

REZULTATAI vienam kg kuro		
Dūmų tūris:	4,81	m ³ /kg
Teorinis dūmų tūris:	3,89	
Reikalingo oro tūris:	3,94	
Teoriškai reikalingo oro tūris:	3,03	

Buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai deginant įvairių biokurą. Matuotos NO_x, NO, CO, CO₂, SO₂, O₂ koncentracijos, α – oro pertekliaus koeficientas bei aplinkos ir dūmų temperatūros. Grafikuose taip pat pateiktos leistinos teršalų NO_x ir CO ribos.

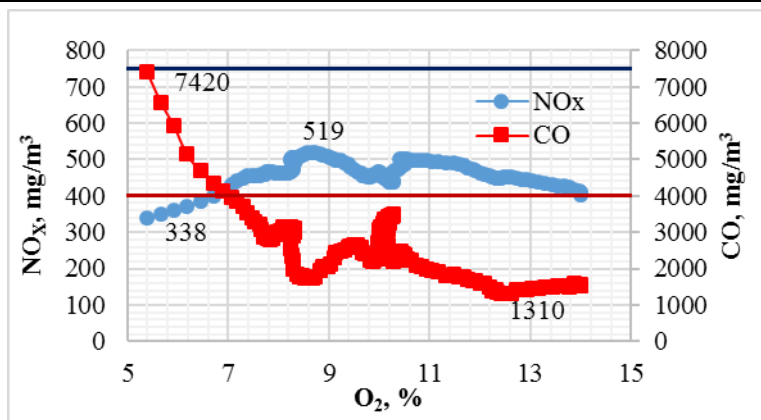
Degintos įvairios sudėties granulės:

1. Durpių granulės;
2. Durpių ir mazutinio dumblo mišinio granulės (80:20 %);
3. Pjuvenų ir mazutinio dumblo mišinio granulės (75:25 %);
4. Pjuvenų ir mazutinio dumblo mišinio granulės (50:50 %);
5. Pjuvenų ir mazutinio dumblo mišinio granulės (70:30 %);
6. Lignino ir mazutinio dumblo mišinio granulės (80:20 %);
7. Lignino ir mazutinio dumblo mišinio granulės (70:30 %);
8. Saulėgrąžų lukštų granulės;
9. Aktyvintoji anglis BAU-A ir kukurūzų stiebų granulės;
10. Nuotekų dumblo granulės.

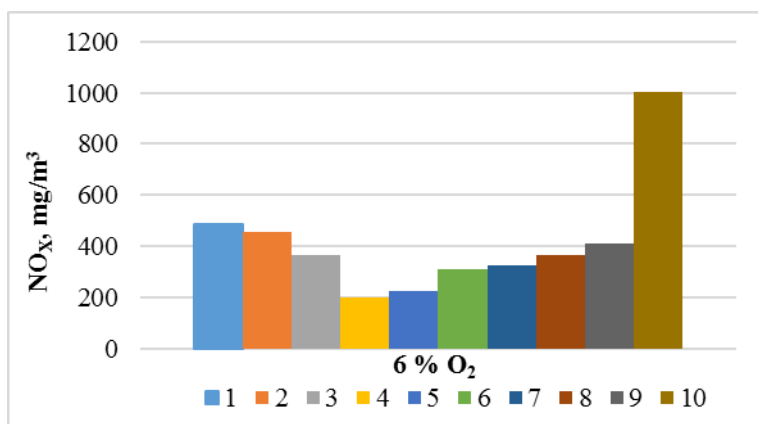
Degimo produktų teršalų koncentracijų priklausomumo nuo deguonies koncentracijos rezultatai pateikiami grafiškai. Kaip pavyzdys – 5 pav. pateikiami saulėgrąžų lukštų granulių deginimo rezultatai.

Deginant saulėgrąžų lukštų granules pastebėta, kad, sumažėjus deguonies koncentracijai žemiau 6 %, CO koncentracija smarkiai padidėja, o didėjant deguonies kiekiui – NO_x didėja, o CO mažėja.

Kietam kurui normatyvinė deguonies koncentracija yra 6 % ($\alpha = 1,4$). Visų įvairios sudėties kurų NO_x koncentracijų grafikas pagal normatyvinę O₂ koncentraciją pateiktas 6 pav. Kaip matome, labai išsiskiria nuotekų dumblo granulės, kuriose azoto kiekis siekia 5,27 %.



5 pav. NO_x ir CO koncentracijų priklausomumas nuo deguonies, deginant saulėgrąžų lukštų granules



6 pav. NO_x koncentracijos (prie 6 % O₂), 1 – durpių granulės, 2 – durpių ir mazutinio dumblo granulių mišinys (80:20 %), 3 – pjuvenų ir mazutinio dumblo granulių mišinys (75:25 %), 4 – pjuvenų ir mazutinio dumblo granulių mišinys (50:50 %), 5 – pjuvenų ir mazutinio dumblo granulių mišinys (70:30 %), 6 – lignino ir mazutinio dumblo granulių mišinys (80:20 %), 7 – lignino ir mazutinio dumblo granulių mišinys (70:30 %), 8 – saulėgrąžų lukštų granulės, 9 – aktyvintoji anglis BAU-A ir kukurūzų stiebų granulės, 10 – nuotekų dumblo granulės

Pagal atliktų tyrimų rezultatus matome, kad azoto kiekio kure įtaka NO_x koncentracijai degimo produktuose labai aiški – didėjant azoto kiekiui kure, didėja ir

azoto oksidų koncentracijos dūmuose. Vis dėlto, siekiant parengti NO_x koncentracijos iš kuro azoto skaičiavimo metodiką, reikia išsamesnių tyrimai.

Kuro azoto perėjimo į NO_x koeficientas – tai iš azoto turinčių kuro junginių į „kuro“ NO_x perėjusio azoto santykis su į degimo kamerą kuru patekusi azotu. Kuro azoto konversijos į azoto oksidus koeficientas K_N nustatomas kaip kure ar kuro prieduose esančio azoto dalis, perėjusi į azoto monoksidą:

$$K_N = \frac{(V_d + (\alpha - 1) \cdot V_o) \cdot C_{\text{NO}_x}}{328.6 \cdot N_K}, \% \quad (4)$$

čia: K_N – kure esančio azoto konversijos koeficientas, %; V_o – teorinis degimui reikalingo oro kiekis, m^3/kg ; V_d – teorinis degimo produktų tūris, m^3/kg ; α – oro pertekliaus koeficientas degimo produktuose; C_{NO_x} – azoto oksidų koncentracija degimo produktuose, mg/m^3 ; N_K – azoto dalis kure, %; 328,6 – perskaičiavimo koeficientas.

Kadangi tyrimų metu buvo deginamos skirtingos kuro rūšys, kurių visa elementinė sudėtis nėra tiksliai žinoma ir dažnai ją būna sunku nustatyti, todėl buvo atliekamas įvairių kuro rūšių V_o ir V_d skaičiavimas pagal lygtis (5) ir (6), naudojant žinomą tiriamų kurų naudojamosios masės apatinį šilumingumą.

$$V_o = 0,00027 \cdot Q_z^n + 0,0234, [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (5)$$

$$V_d = 0,00025 \cdot Q_z^n + 0,9756, [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (6)$$

Pagal (4), (5) ir (6) lygtis apskaičiuojami įvairios sudėties granulių teoriniai oro, degimo produktų tūriai ir kure esančio azoto konversijos į NO_x koeficientas K_N . Sudarytas K_N priklausomumas nuo azoto kiekio kure ir, apibendrinus tyrimų rezultatus, gautas kure esančio azoto konversijos į NO_x priklausomumas:

$$K_N = 5,8139 \cdot N_K^{-0,571}, [\%] \quad (7)$$

Pagal eksperimentinių tyrimų rezultatus parengta NO_x koncentracijos, susidarančios iš kure esančio azoto, skaičiavimo metodika.

Įvertinus, kad biokurui oro pertekliaus koeficientas $\alpha = 1,4$, kai $\text{O}_2 = 6\%$, ir apjungus (4), (5), (6) ir (7) lygtis, gauname bendrą lygtį:

$$C_{\text{NO}_x} = \frac{1910.45 \cdot N_K^{0,429}}{0,000358 \cdot Q_z^n + 0,98496}, [\text{mg}/\text{m}^3] \quad (8)$$

Ši lygtis gali būti naudojama apytikriam azoto oksidų koncentracijų skaičiavimui, kai deginamas įvairaus tipo biokuras, žinant tik azoto kiekį biokure bei jo naudojamosios masės apatinį šilumingumą. Lygties taikymo ribos yra $0,87 < N_K < 5,27 \%$.

Išvados

1. Mažiausia NO_x koncentracija (215 mg/m^3) pasiekta deginant pjuvenų ir mazutinio dumblo granulių mišinį (75:25 %). Didžiausia NO_x koncentracija (950 mg/m^3) gauta deginant nuotekų dumblo granules. Ši NO_x koncentracija viršija biokurui leistinas normas (750 mg/m^3).
2. Biokuro degimo metu susidarančių NO_x koncentracija yra proporcinga kure esančiam azoto kiekiui. Ištyrus azoto oksidų susidarymo iš kure esančio azoto dėsningumus, sudaryta NO_x koncentracijų, susidarančių iš kure esančio azoto, skaičiavimo metodika. Gauta lygtis gali būti taikoma apytikriam azoto oksidų koncentracijų skaičiavimui, kai deginamas įvairaus tipo biokuras, žinant tik azoto kiekį biokure bei jo apatinį naudojamosios masės šilumingumą.

Literatūra

1. „Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems“ S.C. Hill, L. Douglas Smoot, Brigham Young University 2000.
2. „Kure esančio azoto junginių konversija biokuro deginimo procesuose“ Daktaro disertacija Raminta Plečkaitienė, Kauno technologijos universitetas 2014.
3. „Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems“ P. Glarborg, A.D. Jensen, J.E. Johnsson, Technical University of Denmark 2002.

Analysis of experimental biomass combustion research

Summary

The aim of this paper is to investigate patterns of NO_x formation from fuel bound nitrogen when burning various types of biofuel containing nitrogen and find conversion parameters of fuel bound nitrogen into nitrogen oxides during fuel combustion process. The main goal is to prepare calculation methodology for NO_x concentrations resulting from fuel nitrogen. Presented data has been processed and analyzed.

Lowest NO_x concentration (215 mg/m^3) obtained by burning mixture of sawdust and fuel oil sludge pellets (75/25%). Highest NO_x concentration (950 mg/m^3) obtained by burning wastewater sludge pellets. This NO_x concentration exceeds allowable limits of biomass (750 mg/m^3).

Granuliuotos biomasės terminės deformacijos pirolizės aplinkoje mechanizmas

Rolandas Paulauskas, Algis Džiugys, Nerijus Striūgas
Lietuvos energetikos institutas

Ivadas. Dėl griežtėjančių aplinkosaugos reikalavimų, atsinaujinantys kuro išteklių vis plačiau naudojami elektros ir šilumos gamyboje. Išaugus biokuro poreikiui, ieškoma būdų, kaip panaudoti ir prastos kokybės atsinaujinančius kuro išteklius (miško paklotas, spygliai, šiaudai). Vienas tokių būdų yra dujinimo procesas, kurio metu galima gauti aukštesnės kokybės dujinį kurą ir panaudoti pramonėje [1]. Dujinimo procesui naudojant granuliuotą kurą, kartais susidaro sąlygos, kurių metu granulės, judėdamos reaktoriuje iš pirolizės zonos į dujinimo zoną, sulimpa ir sustabdo tolesnę proceso eigą. Viena priežasčių, sąlygojančių granulių sulipimą, yra kuro dalelių dydžių pokyčiai dėl aukštos temperatūros. Siekiant išsiaiškinti granuliuoto kuro terminių deformacijų mechanizmą, atliekami pirolizės procesų eksperimentiniai tyrimai, kuriais tiriami medžio dalelės, medžio ir šiaudų granulių pokyčiai aukštesnėse temperatūrose.

Tyrimų metodika. Eksperimentiniai biomasės pokyčių tyrimai atlikti elektrinėje krosnelėje Notherm RS80/500/13 sukuriant inertinę aplinką 400–1000 °C temperatūroje. Tyrimui naudotos 8 mm diametro ir 20 mm ilgio medžio dalelės, medžio granulės ir šiaudų granulės. Prieš atliekant eksperimentinius tyrimus, buvo atlikta elementinė ir biocheminė analizė. Elementinė sudėtis nustatyta naudojant Flash 2000 CHNS-O analizatorių pagal LST EN 15104 (CHNS-O kiekiui) standartą. Biocheminė sudėtis nustatyta po NDF (neutralaus detergento tirpale netirpios ląstelienos) ir ADF (rūgštaus detergento tirpale netirpios ląstelienos) analizės, naudojant ANKOM įrangą su specialiais maišeliais (PBT) pagal Van Soest (VST) metodiką. Gauti duomenys pateikti 1 lentelėje.

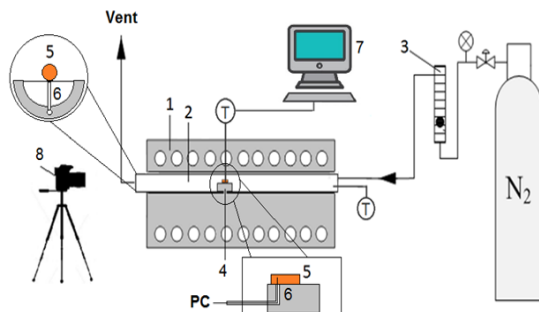
1 lentelė. Bandinių charakteristikos

Parametras	Medžio granulės	Šiaudų granulės	Medžio dalelės
<i>Elementinė sudėtis, masės % (sausos)</i>			
Anglis	51,22	45,84	49,59
Vandenilis	5,56	5,16	5,36
Degūnis (skirt.)	43,20	47,67	45,05
Azotas	0,01	1,12	0,01
Siera	0,01	0,21	0,01
<i>Biocheminė sudėtis, masės % (sausos)</i>			
Hemiceliuliozė	14,2	29,9	19,6
Celiuliozė	51,7	43,5	61,3

Parametras	Medžio granulės	Šiaudų granulės	Medžio dalelės
Ligninas	25,4	6,22	14,4

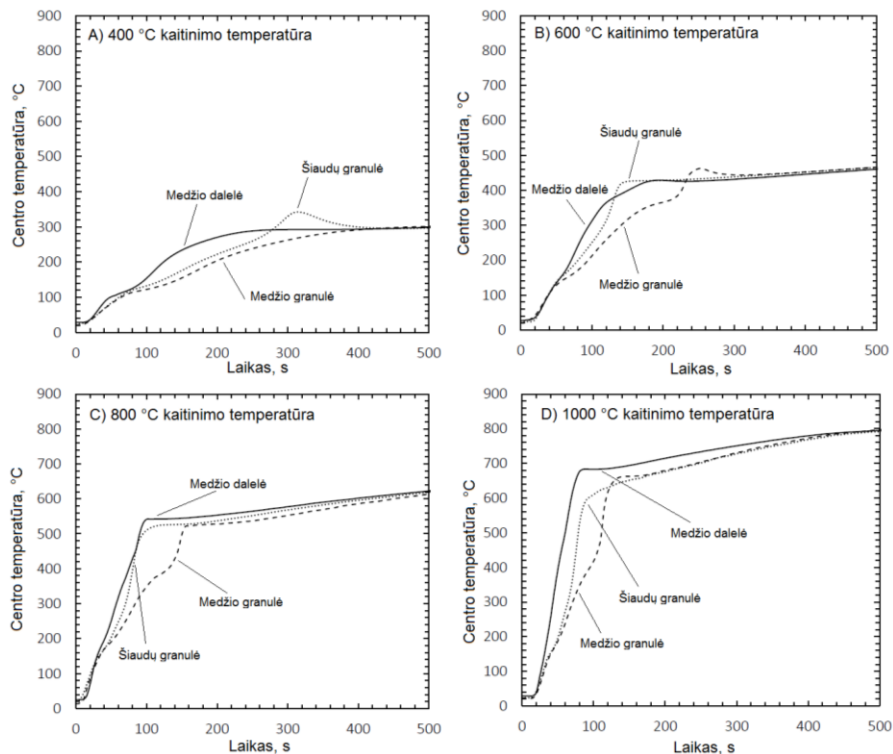
Eksperimentams skirtoje krosnelės viduje sumontuotas 80 mm diametro keraminis vamzdis, kaitinamas iš abiejų pusių. Viename vamzdžio gale sumontuotas azoto tiekimas, valdomas rotametru. Kitas vamzdžio galas paliekamas atviras specialiam padėklui su bandiniu įstatyti ir bandinio šiluminėms deformacijoms filmuoti. Padėkle sumontuota K-tipo termopora bandinio centro temperatūrai matuoti. Elektrinei krosnei pasiekus reikiamą temperatūrą, tiekiamas azotas (8 l/min azoto srautas), bei patalpinama biokuro granulė į krosnelės vidurį. Fotoaparatu Fuji HS25 EXR filmuojami biomasės pokyčiai dėl šiluminės deformacijos, bei matuojama bandinio centro temperatūra. Eksperimento schema pateikta 1 paveiksle.

Prieš ir po eksperimento, bandinio skersmuo išmatuojamas slankmačiu. Gauti aukštos raiškos (1920x1080 taškai) vaizdo rezultatai apdoroti vaizdų koregavimo programa „GIMP“, gauti matavimų rezultatai pateikiami grafikuose.



1 pav. Tyrimo stendo schema: 1 – elektrinė krosnelė RS 80/500/13; 2 – keraminis vamzdis, į kurį įstatomas padėklas su bandiniu; 3 – rotametas; 4 – bandinio padėklas su įmontuota termopora; 5 – bandinys; 6 – K tipo termopora; 7 – kompiuteris duomenims saugoti; 8 – foto kamera Fuji HS25 EXR

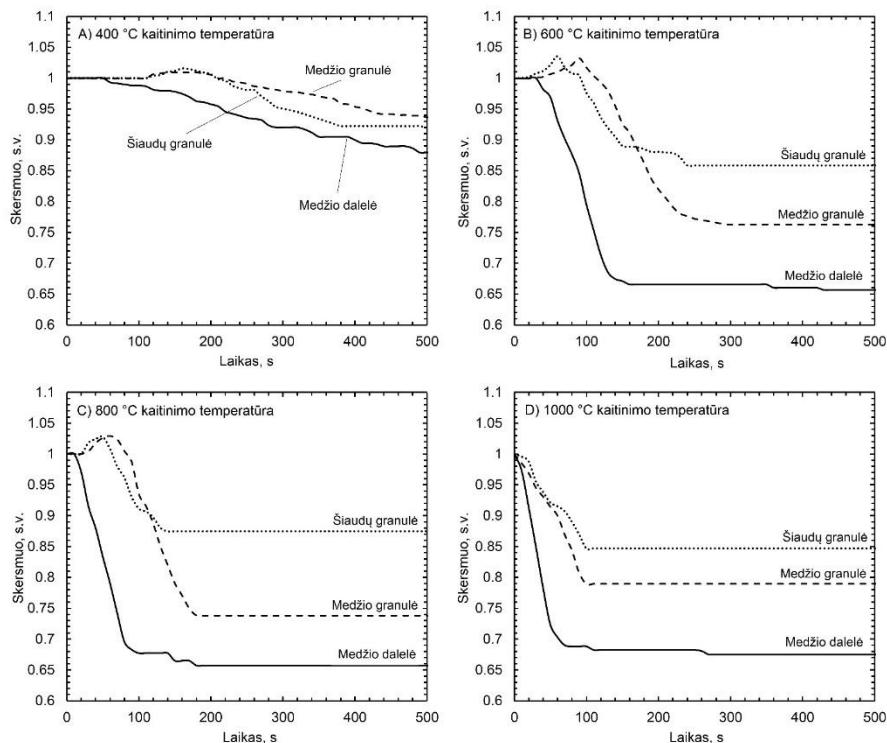
Rezultatai ir jų aptarimas. Tyrimo metu matuotos biokuro granulių centro temperatūros pateiktos grafiškai 2 paveiksle.



2 pav. Medžio dalelės, medžio ir šiaudų granulių centro temperatūros kitimas laike, esant skirtingai kaitinimo temperatūrai

Pateiktame grafike matomi centro temperatūrų kitimo pokyčiai, atsižvelgiant į nustatytą kaitinimo temperatūrą. Temperatūrų kitimo pobūdį apsprendžia bandinio viduje vykstantys cheminiai procesai. Šiuos cheminius procesus galima suskirstyti į kelias pagrindines fazes pagal literatūroje pateikiamas biomasės skilimo temperatūras [2]: pirmoji – vandens pašalinimas iš bandinių, antroji – lignino, hemiceliuliozės ir celiuliozės skaidymas ir trečioji – likutinio lignino skilimas ir anglies formavimasis. Vandens garavimas stebimas nuo 20 °C temperatūros ir tęsiasi apie 120 s, kol bandinių centrai pasiekia 120 °C temperatūrą, esant 400 °C kaitinimo temperatūrai (žr. 2 A pav.). Aukštesnėse kaitinimo temperatūrose (600–1000 °C), dėl intensyvesnių šilumos mainų, padidėja bandinių įkaitimo sparta ir galutinis dehidratacijos procesas pasislenka aukštesnių temperatūrų link atitinkamai iki 130–160 °C granulės centro temperatūros (žr. 2 B-D pav.). Pasibaigus vandens garinimui, medienos granulėje prasideda hemiceliuliozės, celiuliozės ir lignino skaidymas, kuomet vyksta lakiųjų medžiagų išsiskyrimas. Mokslinėje literatūroje [3–5]

nurodoma, kad hemiceliuliozės skaidymas vyksta 150–300 °C temperatūros ruože, celiuliozės nuo 200 °C iki 400 °C ir lignino nuo 150 °C iki 600 °C. Pagal išmatuotas bandinių centro temperatūras (žr. 2 pav.) galima spręsti, kad 400 °C kaitinimo temperatūroje vyksta tik lėti medžio mėginių skaidymo procesai (nėra staigių temperatūrų pokyčių bandinių centre), o šiaudų granulės skaidymas intensyvėja – stebimas centro temperatūros pikas nuo 280 s (žr. 2 A pav.), dėl vykstančio hemiceliuliozės skilimo. Didėjant kaitinimo temperatūrai (600–1000 °C) bandiniuose, dėl suteikto didesnio šilumos kiekio, vyksta intensyvesni skaidymo procesai, kuriuos nusako bandinių centro temperatūros kitimo pokyčiai (žr. 2 B-D pav.).

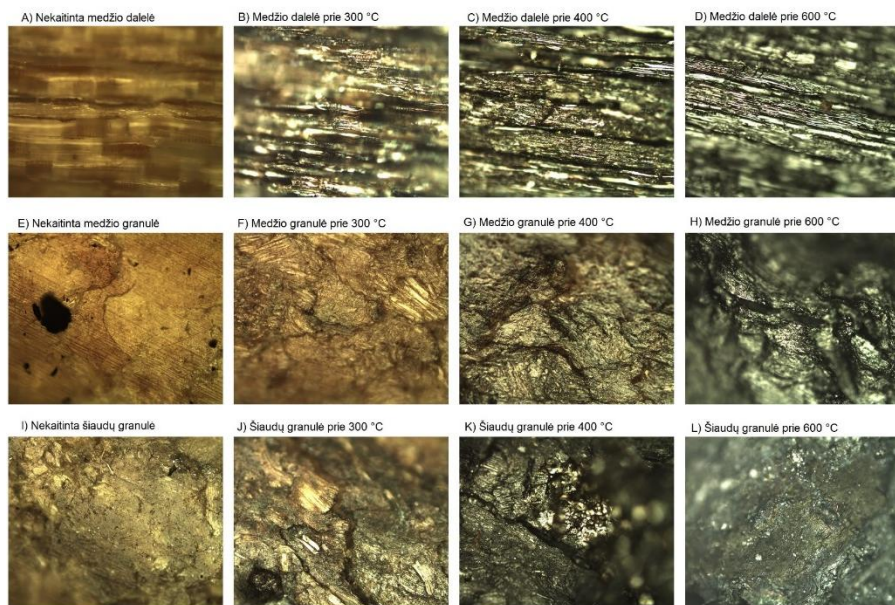


3 pav. Medžio dalelės, medžio ir šiaudų granulės skersmens pokyčiai, esant skirtingoms kaitinimo temperatūroms

Tyrimo metu stebint medžio dalelės, medžio ir šiaudų granulių centro temperatūrų kitimą buvo filmuojami mėginių diametro pokyčiai pirolizės proceso metu 400–1000 °C kaitinimo temperatūroje. Apdorojus ir išanalizavus filmuotą medžiagą, biomasės diametro pokyčių kitimas laike ir palyginimas 400 °C, 600 °C, 800 °C, 1000 °C kaitinimo temperatūroje pateiktas grafiškai 3-iaame paveiksle.

Žemoje kaitinimo temperatūroje ($400\text{ }^{\circ}\text{C}$), dėl spartesnio perkaitimo iš visų bandinių (žr. 3 A pav.), medžio dalelė pradeda trauktis po 60 s nuo eksperimento pradžios, dalelės centrui viršijus $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrą (pasibaigus vandens išgarinimo procesui). Medžio dalelė praranda apie 12 % pradinio skersmens. Tuo tarpu medžio ir šiaudų granulės pradeda plėstis įkaitus centrui virš $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros, o tai reiškia sudėtingesnį vandens išgarinimą. Maksimalus granuliuotų bandinių išsiplėtimas, siekiantis apie 1 % pradinio skersmens (žr. 3 A pav.), vyksta medžio granulės centrui įkaitus $\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$, o šiaudų granulėi $\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2 A pav.). Išsiplėtusios granulės pradeda trauktis ir šiaudų granulė praranda 8 % pradinio skersmens, medžio granulė $\sim 6\text{ }\%$. Didėjant kaitinimo temperatūrai iki $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, bandinių diametro pokyčiai intensyvėja. Medžio dalelės centrui įkaitus iki $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, stebimas intensyvus susitraukimo procesas, kurio metu medžio dalelė praranda 44 % pradinio skersmens. Priešingai nei medžio dalelė, medžio ir šiaudų granulių centrams įkaitus atitinkamai iki $71\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $66\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros, medžio ir šiaudų granulėse prasideda išsiplėtimo reiškinys. Medžio granulė per 60 s išsiplėčia iki 3.25 % pradinio skersmens centrui įkaitus iki $190\text{ }^{\circ}\text{C}$. Šiaudų granulės išsiplėtimas intensyvesnis (per 40 s) ir siekia iki 3.5 % pradinio skersmens pasiekus centro temperatūrai $175\text{ }^{\circ}\text{C}$. Išsiplėtusios medžio ir šiaudų granulės po kelių sekundžių pradeda trauktis. Aukštesnėje kaitinimo temperatūroje ($800\text{ }^{\circ}\text{C}$), biomasės mėginių šiluminio skaidymo tendencija išlieka identiška, kaip ir $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje (žr. 3 B, C pav.), tačiau, šiluminis skaidymas vyksta 1,65 karto greičiau dėl gauto didesnio šilumos kiekio. Medienos dalelė pradeda trauktis po 10 s nuo eksperimento pradžios ir praranda 43 % pradinio skersmens per 160 s (žr. 3 C pav.). Tuo tarpu medžio ir šiaudų granulės išsiplėčia apie 2,8 % pradinio skersmens, kol centro temperatūra pasiekia $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ribą. Pasibaigus išsiplėtimui, granulės pradeda trauktis. Medžio granulė ir šiaudų granulė praranda atitinkamai 15 % ir 27 % pradinio skersmens. Aukštesnėje $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje medžio ir šiaudų granulių išsiplėtimas pirolizės proceso pradžioje nebevyksta, stebimas tik visų biomasės bandinių susitraukimas (3 D pav.). Medžio dalelės susitraukimas intensyviausias iš visų bandinių ir dalelė pradeda trauktis iškart po patalpinimo į pirolizės reaktorių. Granuliuotos biomasės bandiniai traukiasi 1,66 karto lėčiau. Medžio dalelė susitraukia 33 % pradinio skersmens, medžio granulė – 22 %, šiaudų granulė – 16 %.

Iš gautų rezultatų matyti, kad granulės skersmens pokyčiai priklauso nuo pirolizės temperatūros bei šilumos pernašos dalelėse. Didėjant kaitinimo temperatūrai, didėja gaunamas šilumos kiekis, bei tuo pačiu keičiasi medžio skaidymo intensyvumas, kurio metu vyksta intensyvus lakiųjų medžiagų išsiskyrimas. Siekiant įvertinti atsirandančių skersmens pokyčių mechanizmą, pirolizuotų mėginių paviršius buvo analizuojamas optiniu mikroskopu Olympus BX51 su pajungta aukštos raiškos skaitmenine kamera Go-21. Gautos 10 kartų optiškai padidinto paviršiaus nuotraukos pateiktos 6 paveiksle.



4 pav. Medžio dalelės, medžio ir šiaudų granulės paviršiaus mikroskopija, esant skirtingoms kaitinimo temperatūroms

Iš gautų nuotraukų matyti, kad aukštos temperatūros nepaveiktos medžio dalelės paviršiaus struktūra tvarkinga (žr. 4 A pav.), lyginant su kitų bandinių (žr. 4 E, I pav.) – matomos supresuotos dalelės. Iš 4 B paveikslo matyti, kad 300 °C kaitinimo temperatūroje laikytos medžio dalelės paviršius apanglėjęs, kas rodo ankstyvą ir intensyvių dalelės skaidymą. Aukštesnėse temperatūrose šie procesai suintensyvėja, sukeldami paviršiuje įtrūkimų atsiradimą dėl lakiųjų medžiagų išsiskyrimo (žr. 4 C, D pav.). Medžio ir šiaudų granulių paviršiaus struktūra kiek kitokia nei medžio dalelės (žr. 4 F, J pav.) prie 300 °C kaitinimo temperatūros. Pagal bandinių centro temperatūros kreives (žr. 2 pav.), dėl lėtesnių šilumos pernašos procesų, granulių paviršiuje matomas nežymus apsilydimas ir mikro įtrūkimai. Aukštesnėje temperatūroje (400 °C) stebimas paviršiaus intensyvesnis lydymasis (žr. 4 G, K pav.), be to, atsiranda didesni įtrūkimai ir poros ant apsilydžiusių vietų. Pagal literatūroje pateikiamą informaciją [6], paviršiuje formuojasi poros, vykstant apsunkintam lakiųjų medžiagų išsiskyrimo procesui. Taip pat manoma, kad medžio ir šiaudų granulių išsiplėtimas vyksta dėl susikaupusių vandens garų ir lakiųjų junginių granulės viduje, kurios negali išgaruoti dėl dervų, šarmų kondensacijos ant paviršiaus (žr. 4 F,G,J,K pav.), bei sukelia granulių poringumo sumažėjimą. Taigi, vandens garai ir lakiosios medžiagos kaupiasi granulių viduje, sukeldamos vidinio

slėgio didėjimą bei granulės plėtimąsi. Esant kritiniui slėgiui, paviršiaus struktūra suardoma ir sukaupti vandens garai ir lakiosios medžiagos išlaisvinamos – prasideda susitraukimo procesas. Išsiplėtimo reiškinys nebevyksta, kai kaitinimo temperatūra yra didesnė negu 900° C (žr. 4 D pav.). Granulė greitai įkaista, paviršiuje susikondensavusios medžiagos suskaidomos dėl aukštos temperatūros ir taip „atidaro mas kelias“ lakiosioms medžiagoms išsiskirti.

Išvados

1. Nustatyta, kad žemoje kaitinimo temperatūroje (400 °C) vyksta nežymus granuliuotos biomasės išsiplėtimas iki 1 % pradinio skersmens. Granuliuotos biomasės išsiplėtimas intensyvėja iki 600 °C ir didžiausias medžio granulės išsiplėtimas siekia 3,25 % pradinio skersmens, šiaudų granulės – 3,5 %.
2. Nustatyta, kad granuliuota biomasė išsiplėčia dėl viduje susiformavusių vandens garų ir lakiųjų medžiagų, kurių išsiskyrimą apsunkina cheminiai procesai, kaip ant granulių paviršiaus susiformavusios dervos, šarmai.
3. Nustatyta, kad didėjant kaitinimo temperatūrai per 600 °C, granuliuotos biomasės išsiplėtimo reiškinys slopsta ir viršijus 900 °C temperatūrą išnyksta, dėl intensyvių termocheminių procesų, kurių metu vyksta neapsunkintas lakiųjų medžiagų išsiskyrimas ir anglėjimo procesas.
4. Nustatyta, kad medžio dalelė pirolizės aplinkoje tik traukiasi dėl intensyvaus sudėties skaidymo, kurio metu išsiskiria susikaupę vandens garai ir lakiosios medžiagos neišplėsdamos dalelės.
5. Nustatyta, kad medžio dalelės, medžio granulės ir šiaudų granulės pirolizės aplinkoje esant temperatūrai nuo 400 °C iki 1000 °C atitinkamai praranda nuo 3 % iki 33 % savo pradinio diametro, medžio granulė – nuo 1 % iki 22 % ir šiaudų granulė – nuo 6 % iki 16 %.

Literatūra

1. Gurskienė V., Šlančiauskas A. Medienos anglies likučio dujų fiksacijos spartinimas didinant CO₂ dujų generavimą. *Energetika* 58, 213-218 p., 2012.
2. De Wild PJ., Reith H., Heeres E. Biomass pyrolysis for chemicals. *Biofuels* 2, 185-208 p., 2011.
3. Koukios EG. Progress in thermochemical, solid-state refining of biomass – from research to commercialization. *Advances in thermochemical biomass conversion* 2, 1678-92 p., 1993.
4. Park WC., Atreya A., Baum HR. Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis. *Combustion and flame* 157, 481-94 p., 2010.

5. Gašparovič L, Labovský J, Markoš J, Jelemenský L. Calculation of Kinetic Parameters of the Thermal Decomposition of Wood by Distributed Activation Energy Model (DAEM). Chem Biochem Eng Q 26, 45-53 p., 2012.
6. Byrne CE, Nagle DC. Carbonized wood monoliths – characterization. Carbon 1997. Vol. 35, No. 2, p 267–273.

Thermal deformation mechanism of pelletized biomass during pyrolysis

Summary

Gasification of biomass pellets is confronted with the problem of adhesion of fuel in pyrolysis zone due to pellets swelling. In order to investigate the cause and mechanism of fuel expansion, experimental investigation of wood particle, wood and straw pellets thermal deformations were carried out by measuring thermal deformation of biofuel in the electrical pyrolysis reactor from 400 to 1000 ° C temperature in an inert atmosphere.

Žolinių energinių augalų naudojimas naftos angliavandeniliais užterštiems dirvožemiams valyti

Mantas Rubežius*, Kęstutis Venslauskas*, Žygimantas Kidikas**

*Aleksandro Stulginskio universitetas, **Kauno technologijos universitetas

Įvadas

Daugelyje Europos Sąjungos šalių nacionalinėse energetikos strategijose akcentuojama biomasės svarba ir plėtros galimybės. Biomasės, skirtos energetinėms reikmėms, poreikiai sparčiai auga, todėl pastaruosius dešimtmečius vis daugiau dėmesio žemės ūkio mokslo srityje skiriama naujų energinės paskirties augalų biomasės panaudojimui energiniams tikslams (Kryževičienė ir kt., 2005; ASU, 2014). Atsiradus naujoms biomasės paruošimo technologijoms, biokurą, biodegalus ir biodujas pradėta gaminti ir iš įvairių tradicinių ir netradicinių žolinių augalų rūšių (ASU, 2014). Daugelio autorių nuomone, žolinių augalų biomasė yra puiki alternatyva, papildanti tokius biokuro išteklius kaip miško, žemės ūkio produkcija ar durpės (Kryževičienė ir kt., 2005).

Tradiciniai žoliniai augalai, lyginant su trumpos apyvartos medžiais, yra pranašesni, nes jų masę kurui galima panaudoti jau kitamet po sėjos (Kryževičienė ir kt., 2005). Apskritai, žoliniai augalai mažiau reiklūs dirvai, atsparesni nepalankioms klimato sąlygoms bei įvairioms ligoms, gali užauginti didelį biomasės derlių. Be to, daugiamėčiai žoliniai augalai gali derėti ilgai nepersėti, taip apsaugomos kalvotos žemės nuo erozijos ir palaikomas dirvožemio derlingumas bei gerokai sumažinamas šiltnamio efektas (Kryževičienė ir kt., 2005; Sendžikienė ir kt., 2012).

Siekiant išvengti konkurencijos su tradiciniu žemės ūkiu ir kuo efektyviau išnaudoti šalies bioenergijos potencialą, galima žolinius energinius augalus auginti apleistose žemėse, kurių šiuo metu šalyje nestinga. Suderinus įvairias mokslines disciplinas, galime pasiekti ne tik energetinės naudos, bet ir dar labiau sustiprinti aplinkosauginį efektą. Pritaikius fitoremediacinius metodus biomasės inžinerijoje, nesunkiai galime sukurti žaliavos išgavimo energetinėms reikmėms ir antropogeninės taršos pažeistų teritorijų atstatymo sistemą. Tiesioginių tyrimų duomenys rodo, kad tiek grunte, tiek požeminiame vandenyje, dažniausiai taršos ribines koncentracijas viršija naftos produktų angliavandeniliai. Lietuvoje šiais angliavandeniliais užterštų vietų yra apie 5000, kas sudaro apie 40 % visų žinomų vietų, kuriose gali ar galėjo būti teršiama žemė ir požeminis vanduo (Januševičiūtė ir kt., 2015). Tradiciniai grunto valymo metodai reikalauja daug lėšų, didelių darbo jėgos išteklių, energijos bei, kai kuriais atvejais, laiko sąnaudų. Dėl šių priežasčių nuolatos atliekama naujų ekonomiškai patrauklių, efektyvių aplinkos kokybės atkūrimo technologijų paieška (Rubežius ir Venslauskas, 2015).

Viena iš tokių naujų, pigių technologijų yra fitovalymo technologija, kuri, pritaikant unikalias augalų savybes surinkti teršalus, skatinti jų degradaciją ar transformaciją, naudojama grunto galutiniam išvalymui ir dirvožemio struktūrai bei gyvybingumui atstatyti. Valant naftos produktais užterštą gruntą, dažniausiai stimuliuojama fitodegradacija ir rizodegradacija, siekiant teršalus suskaidyti. Šiuo tikslu dažniausiai naudojami žoliniai augalai, pasižymintys gerai išsivysčiusia šaknų sistema, nes išsikerojusios šaknys pagerina aeraciją, praturtina gruntą biologiškai aktyviomis medžiagomis, kas suaktyvina mikroorganizmų veiklą (Januševičiūtė ir kt., 2015). Efektyviausi šios grupės augalai yra: mėlynžiedė liucerna (*Medicago sativa*), baltasis dobilas (*Trifolium repens* L.), raudonasis dobilas (*Trifolium pretense*), rytinis ožiarūtis (*Galego orientalis*), rykštėtoji sora (*Panicum virgatum*), tikrasis eraičinas (*Festuca pratensis*), ir dar daugelis kitų augalų.

Darbo tikslas – įvertinti žolinių energinių augalų pritaikymo naftos angliavandeniliais užterštiems dirvožemiams valyti galimybes.

Tyrimų metodai ir sąlygos

Tyrimas atliktas vadovaujantis „Ekologinių tyrimų reglamente“ (2008), LAND 9-2009 ir „Požeminio vandens monitoringo metodinėse rekomendacijose“ (1999) pateiktais reikalavimais bei rekomendacijomis.

Bandymų objekto geografinė – technogeninė charakteristika.

Bandymų objektas, pagal Lietuvos geologijos tarnybos (toliau LGT) vykdytą projektą „Užterštų teritorijų poveikio vertinimas“ (Grotas, 2010), yra Kauno raj. savivaldybėje, Raudondvario miestelyje, Didvyrių gatvėje. 2010 metais LGT vykdyto tyrimo metu nustatyta, kad bandymų objekte tiek gruntas, tiek gruntinis vanduo yra užterštas naftos produktais. Grunte naftos produktų koncentracija viršijo nustatytas leistinas ribines vertes (200 mg/kg), o maksimali nustatyta naftos produktų koncentracija šią vertę viršijo 72,6 karto. Objekte taip pat buvo nustatyta grunto tarša, kuri viršijo ribines vertes daugiacykliais aromatiniiais angliavandeniliais (chrizenu, benzo (b) fluorescentenu, benzo (a) pirenu).

Vadovaujantis LAND 9-2009 ir „Cheminėmis medžiagomis užterštų teritorijų tvarkymo aplinkos apsaugos reikalavimais“ (2008) pagal jautrumą taršai, buvusi naftos bazė priskiriama jautriom teritorijom (2 kategorija).

Dirvožemio paruošimas.

Bandymų teritorijoje, atsižvelgiant į taršos mastą bei geologines ir hidrologines savybes, išskirti keturi 1 m² ploteliai kiekvienai pasirinktai augalų rūšiai. Visa kita likusi teritorijos dalis liko neliesta taršos kiekio palyginimui užsėtuose ploteliuose ir aplink juos. Dirvožemis įdirbtas rankiniu būdu: išpurentas iki 20–25 cm gylio pašalinant stambias atliekas (plytas, akmenis, žolių grumstus ir kt.). Vėliau dirvožemis homogenizuotas. Pagal efektyvios žemdirbystės rekomendacijas bei atsižvelgiant į mokslininkų tyrimų rezultatus ir teorišką mikroorganizmams reikalingą maistinių medžiagų kiekį, kuris reikalingas užtikrinti efektyvią naftos anglia-

vandenilių konversiją, kiekvienas plotelis patręštas mineralinėmis trąšomis (100 kg/ha). Tyrimų ploteliai pakartotinai patręšti praėjus 38 dienom po sėjos.

Augalų pasirinkimas.

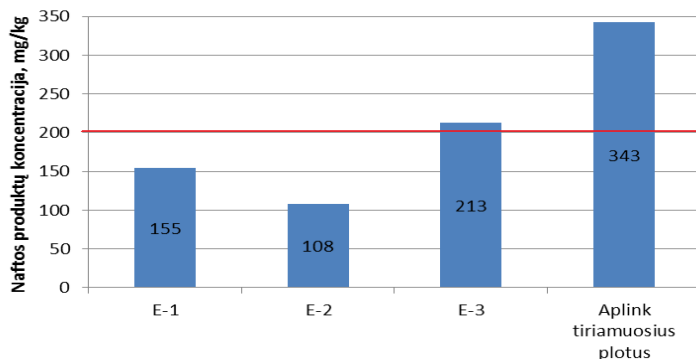
Augalai pasirinkti atsižvelgiant į dirvožemio struktūrą ir tipą, pH, drėgmės kiekį, taršos šaltinį (cheminę sudėtį), sugebėjimą asimiliuoti teršalus, bei jų savybes biodujoms išgauti. Šie augalai yra mažai reiklūs ypatingai priežiūrai ir auginimo sąlygoms. Pasirinktos 4 skirtingos žolinių augalų rūšys: E-1 – miglinių šeimos augalas; E-2 – burnotinių šeimos augalas; E-3 – miglinių šeimos augalas.

Dirvožemio užterštumo tyrimai.

Dirvožemio mėginiai buvo imami po 131 dienos trukusios augalų augimo ekspozicijos. Mėginiai imti voko principu iš 10 taškų tyrimo ploteliuose ir tolygiai paskirstytų 25 taškų apie tiriamuosius plotelius, siekiant tarpusavyje palyginti taršos koncentracijas. Visi dirvožemio tyrimai atlikti pagal LAND 89-2010 standartą.

Rezultatai ir jų aptarimas

Iš pateiktų duomenų matyti, kad visais tirtais atvejais dirvožemio tarša naftos produktais buvo gerokai mažesnė nei dirvožemyje, kuriame nebuvo auginti pasirinkti augalai (1 pav.). Mažiausia dirvožemio tarša naftos produktais, tai yra didžiausias fitovalymo efektyvumas, nustatytas naudojant E-2, kur dirvožemio tarša naftos produktais buvo 3,2 kartus mažesnė, nei kontrolinės-palyginamosios grupės (aplink tiriamuosius plotus). Kiek prastesni, bet taip pat daug žadantys rezultatai buvo gauti naudojant E-1 ir E-3 augalus, kur dirvožemio tarša naftos produktais atitinkamai sumažėjo 2,2 ir 1,6 kartus. Visais aptartais atvejais dirvožemio tarša naftos produktais buvo mažesnė arba nežymiai didesnė už nustatytą ribinę vertę bendram naftos produktų kiekiui – 200 mg/kg.



1 pav. Naftos produktų koncentracijos dirvožemyje (nustatyta ribinė vertė bendram naftos produktų kiekiui yra 200 mg/kg)

Atsižvelgiant į šiuos rezultatus ir ankstesnio išsamaus ekogeologinio tyrimo vertinimo rezultatus, galime teigti, kad pasirinkti augalai puikiai tinka valyti užterštas teritorijas, esant 223–594 mg/kg naftos angliavandenilių taršai. Esant tokiai taršai užtenka tik vieno fitovalymo periodo, siekiant sumažinti taršą žemiau nustatytos ribinės vertės (Grota, 2010).

Išvados

1. Atlikus eksperimentinius lauko tyrimus, rezultatai parodė, kad pasirinkti augalai gali būti naudojami naftos produktais užterštam dirvožemiui valyti esant 223–594 mg/kg naftos angliavandenilių koncentracijoms dirvožemyje. Esant šioms koncentracijoms, augalų ištvermingumo riba (augalų žuvimo riba) nebuvo pasiekta, vizualus naftos angliavandenilių toksiškumo poveikis nepastebėtas.
2. Naudojant E-2, E-1, E-3 augalus dirvožemio tarša naftos produktais atitinkamai sumažėjo 3,2; 2,2 ir 1,6 kartus.

Literatūra

1. ASU – Aleksandro Stulginskio universitetas. 2014. Daugiamečių žolių ir netradicinių žolinių augalų (drambliažolės, sidos, legestų nendrinų žolių) bei jų mišinių panaudojimas presuoto biokuro gamybai. 2014 m. galutinė ataskaita. Akademija: 68 p.
2. Cheminėmis medžiagomis užterštų teritorijų tvarkymo aplinkos apsaugos reikalavimai. *Valstybės žinios*. 2008, Nr. 53-1987
3. Ekogeologinių tyrimų reglamentas. *Valstybės žinios*. 2008, Nr. 71-2759.
4. Januševičiūtė D., Marcinonis A., Janulevičius S., Meištinkas R., Samosionokas J. 2015. Cheminėmis medžiagomis užteršto grunto ir požeminio vandens valymo metodai. Vilnius: UAB „Grota“, 128 p.
5. Kryževičienė A., Navickas K., Župerka V. 2005. Daugiamečių žolių panaudojimas biodujoms gaminti. *Vagos*. Nr. 69 (22), p. 76–82.
6. LAND 9-2009 „Naftos produktais užterštų teritorijų tvarkymo aplinkos apsaugos reikalavimai“. *Valstybės žinios*. 2009, Nr. 140-6174.
7. Požeminio vandens monitoringas. Metodinės rekomendacijos. 1999. Lietuvos geologijos tarnyba. Vilnius: 66 p.
8. Grota, 2010. Užterštų teritorijų poveikio vertinimas. Potencialaus taršos židinio Nr. 10450 (naftos bazė, Kauno r., Raudondvaris, Didvyrių g.) detalaus ekogeologinio tyrimo rezultatai / UAB Grota ir Lietuvos geologijos tarnyba: 34 p.
9. Rubežius M., Venslauskas K. 2015. Užteršto dirvožemio fitovalymo metodų apžvalga. *Agroinžinerija ir energetika*. Nr. 20, P. 62-68.

10. Sendžikienė E., Kalenska S., Makarevičienė V. 2012. Biodujos – alternatyvus kuras transportui. ASU, Kaunas: 48 p.

The application of herbaceous energy plants for remediation of soil contaminated by oil hydrocarbons

Summary

Using phytoremedial methods in biomass engineering, there is a possibility to create a sustainable method of biomass growth in mid-low contaminated sites soil system. Main aim of the research was to assess herbaceous plants abilities of clean the soil contaminated by oil hydrocarbons. Results show, that the proper selection of herbaceous energy plants can reach high level of oil contaminated sites treatment, from 223 to 594 mg/kg, of oil hydrocarbons concentration in soil. By using 3 selected plants, soil pollution with oil products, accordingly declined by 3.2; 2.2 and 1.6 times. In all cases, the test showed that the soil volume of oil products was lower or slightly higher than threshold value of permissible maximum (200 mg/kg) soil pollution, after one cycle of treating by plants. Plants endurance limit has not been reached, visual oil hydrocarbons toxicity effects were not observed.

Kuro, gaminamo iš medienos ir agromasės, pelenų lydumo tyrimas

Deimantė Čepauskienė, Nerijus Pedišius, Mantas Valantinavičius
Lietuvos energetikos institutas

Augantys energijos poreikiai, senkančios iškastinio kuro atsargos ir didėjanti aplinkos tarša skatina ieškoti alternatyvų iškastinio kuro naudojimui. Biokuro naudojimas energetinėms reikmėms yra viena iš jų. Siekiant padidinti biomasės suvartojimą energetikos sektoriuje, kaip alternatyva medienai gali būti naudojama agromasė, t. y. žemės ūkio augalai, jų dalys ir atliekos bei trumpos rotacijos žoliniai augalai. Tačiau iš agromasės pagamintas kuras pasižymi neigiamomis savybėmis: didesniu peleningumu, žemesnėmis pelenų minkštėjimo ir lydymosi temperatūromis, didesniu sieros ir chloro bei šarminių žemės metalų kiekiu.

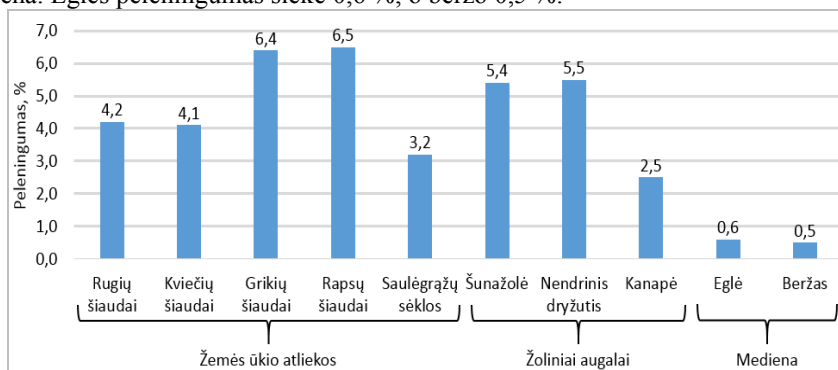
Nuo pelenų cheminės sudėties priklauso pelenų lydymosi temperatūra. Net ir labai nedideli pelenų cheminės sudėties skirtumai gali gerokai pakeisti pelenų lydumo charakteristikas [1]. Degimo metu susidarę lakieji pelenai, esant atitinkamai temperatūrai, ima minkštėti, lydytis ir šlakuotis ant paviršių. Šlakavimasis yra susijęs su lakiųjų pelenų nusėdimu ir kaupimusi ant kūryklos ir šilumokaičio šilumos mainų paviršių, taip sukeliant katilo užsiteršimą, dėl kurio mažėja katilo veikimo efektyvumas [2].

Vienas pagrindinių elementų, darančių daugiausia įtakos pelenų lydymuisi, yra kalis (K). K kartu su siliciu (Si) suformuoja silikatus, kurie lydosi esant žemai temperatūrai – apie 750 °C [3]. Degimo metu esant dideliame K kiekiui gali susidaryti ne tik K silikatai, bet ir kiti K junginiai (chloridai, sulfatai, karbonatai). Šių K junginių lydymosi temperatūra taip pat žema ir siekia vos 770 °C [4]. Natris (Na), taip pat kaip ir K, mažina pelenų lydymosi temperatūrą. Pelenuose K ir Na transformacijos mechanizmai yra panašūs. Kadangi K sukeliami poveikiai yra gerokai didesni, o Na kiekiai labai maži, dažnai Na nėra atskirai išskiriamas ir yra priskiriamas K [5].

Šiame darbe tyrimams pasirinkta dešimt skirtingų biomasės mėginių. Iš žemės ūkio atliekų pasirinkti rugių (*Secale cereale*), kviečių (*Triticum aestivum*) ir grikių (*Fagopyrum esculentum*) šiaudai bei rapsų (*Brassica napus*) šiaudų granulės. Tokį pasirinkimą lėmė tai, kad kiekvienais metais susidarantis šių derliaus atliekų kiekis labai didelis ir ne visos panaudojamos pagal pirminę jų paskirtį (gyvulių kraikas, pašaras). Be šiaudų, taip pat pasirinktos saulėgrąžų (*Helianthus annuus*) sėklos. Iš žolinių augalų pasirinktos paprastosios šunažolės (*Dactylis glomerata*) ir nendrinio dryžučio (*Phalaris arundinacea*) granulės bei sėjamoji kanapė (*Cannabis sativa*). Kanapė pasižymi ypač geromis energetinėmis savybėmis, kurios labai artimos medienos savybėms. Palyginimui pasirinktos dvi medienos (su žieve) rūšys – paprastoji eglė (*Picea abies*) ir karpotasis beržas (*Betula pendula*).

Visi mėginiai buvo išdžiovinoti ir sumalti malūnu iki 1 mm ir mažesnes daleles. Kiekvieno mėginio pelenų kiekis nustatytas pagal LST EN 14775:2010 standarte pateiktą metodiką. Mėginių elementinė sudėtis nustatyta naudojant indukuotos plazmos optinės emisijos spektrometrą (ICP-OES). Mėginiai paruošti taikant standartizuotą metodą, pateiktą LST EN 15290:2011 standarte. Pelenų lydumo tyrimas atliktas naudojant aukštatemperatūrinę krosnį su vaizdo kamera pagal LST CEN/TS 15370-1:2007 standarte pateiktą metodiką.

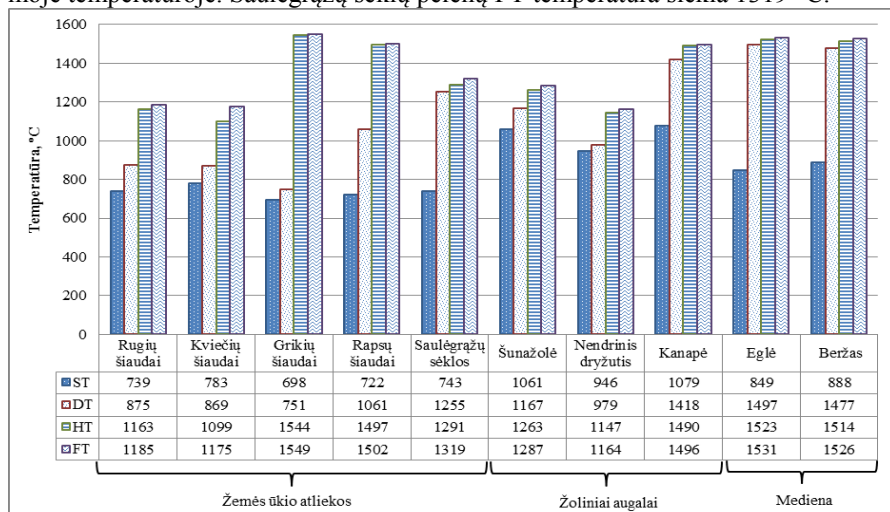
Atlikus medienos ir argomasės mėginių peleningumo tyrimą nustatyta, jog didžiausiu peleningumu pasižymi rapsų ir grikių šiaudai atitinkamai 6,5 % ir 6,4 % (1 pav.). Rugių ir kviečių šiaudų peleningumas siekė 4,2 % ir 4,1 % atitinkamai. Iš žemės ūkio atliekų mažiausias peleningumas nustatytas saulėgrąžų sėklų 3,2 %. Iš žolinių augalų šunažolės ir nendrinio dryžučio peleningumai labai panašūs ir siekia atitinkamai 5,4 % ir 5,5 %. Kanapės peleningumas siekė 2,5 %, t. y. daugiau nei perpus mažesnis, nei kitų žolinių augalų. Mažiausiu peleningumu pasižymėjo mediena. Eglės peleningumas siekė 0,6 %, o beržo 0,5 %.



1 pav. Pelenų kiekis, sudėginus medienos ir agromasės mėginius

Pelenų lydumas yra labai svarbus parametras, kuris turi įtakos įrenginio veikimui ir jo efektyvumui, todėl svarbu žinoti, kaip kinta pelenų struktūra esant įvairioms temperatūroms. Atlikus medienos ir agromasės pelenų lydumo tyrimą paaiškėjo, jog aukščiausia pelenų lydymosi temperatūra (FT) yra grikių šiaudų 1549 °C ir medienos: eglės ir beržo atitinkamai 1531 °C ir 1526 °C (2 pav.). Rapsų šiaudų pelenų lydymosi temperatūra taip pat yra aukštesnė nei 1500 °C, tačiau tiek grikių, tiek rapsų šiaudų pelenų minkštėjimo temperatūros (ST) yra labai žemos ir siekia atitinkamai 698 °C ir 722 °C. Kanapės laikoma vienu perspektyviausiu žoliniu augalu agrokuro gamybai, nes jos pelenų lydymosi savybės labai artimos medienai. Kanapės pelenų ST temperatūra yra aukštesnė už medienos ir siekia net 1079 °C, tačiau pelenų FT temperatūra nedaug mažesnė 1496 °C. Nendrinio dryžučio pelenų ST temperatūra taip pat aukštesnė nei 900 °C, tačiau pelenai ima lydytis 1164 °C temperatūroje. Aukščiausia pelenų ST temperatūra nustatyta šunažolės ir siekia net

1061 °C. Tačiau nepaisant aukštos pelenų ST temperatūros, šunažolės pelenai ima lydėtis 1287 °C temperatūroje. Saulėgrąžų sėklų pelenų ST temperatūra labai panaši į kitų žemės ūkio atliekų pelenų ST temperatūrą ir siekia 743 °C. Tokios agromasės kuro naudojimas abejotinas, nes šlakavimosi procesas prasidės labai žemoje temperatūroje. Saulėgrąžų sėklų pelenų FT temperatūra siekia 1319 °C.



2 pav. Pelenų lydumo analizės rezultatai (ST – pelenų mėginio susitraukimo temperatūra, DT – pelenų mėginio deformacijos temperatūra, HT – pelenų mėginio kupolo formos temperatūra, FT – pelenų mėginio išsilydymo temperatūra)

Tiriant devynių medienos ir agromasės mėginių pelenų elementinę sudėtį nustatyti pagrindiniai pelenuose esantys elementai: Ca, K, Si, P, Mg, Al ir Na. 1 lentelėje pateikti visų tirtų medienos ir agromasės rūšių elementinės sudėties tyrimo rezultatai.

1 lentelė. Medienos ir agromasės elementinė sudėtis, %

	Ca	K	Si	P	Mg	Al	Na
Beržas	0,14	0,05	0,03	0,25	0,02	-	0,22
Eglė	0,14	0,04	0,03	0,24	0,01	-	0,21
Nendrinis dryžutis	0,24	1,89	0,25	0,43	0,10	0,01	0,25
Kanapė	0,70	0,17	0,31	0,31	0,08	0,05	0,24
Grikių šiaudai	0,99	1,93	n/d	0,41	0,08	0,01	0,24
Kviečių šiaudai	0,26	1,27	0,85	0,35	0,09	0,02	0,24
Rapsų šiaudai	1,15	2,08	0,27	0,36	0,14	0,03	0,30
Rugių šiaudai	0,34	0,98	0,90	0,36	0,10	0,04	0,27
Saulėgrąžų sėklos	0,15	1,33	0,17	0,60	0,24	-	0,29

Iš gautų rezultatų matyti, jog didžiausias Ca kiekis yra rapsų ir grikių šiauduose, atitinkamai 1,15 % ir 0,99 %. Tačiau būtina pažymėti ir tai, kad šiuose agromasės mėginiuose nustatyti ir didžiausi K kiekiai: rapsų šiauduose 2,08 %, grikių šiauduose 1,93 %. Dryžučio agromasėje nustatyta K koncentracija taip pat reikšmingai didelė ir siekia 1,89 %. Si daugiausia nustatyta kviečių ir rugių šiauduose atitinkamai 0,85 % ir 0,90 %. Tuo tarpu didžiausios Mg (0,24 %) ir P (0,60 %) koncentracijos rastos saulėgrąžų sėklose. Al koncentracija visuose tirtuose mėginiuose nesiekė 0,1 %. Didžiausia Al koncentracija, kuri siekia 0,05 %, nustatyta kanapės agromasėje. Beržo, eglės medienoje ir saulėgrąžų sėklose Al iš viso nebuvo rasta. Na kiekis mėginiuose kinta nedideliame intervale ir yra kiek didesnis rapsų šiauduose ir saulėgrąžose.

Medienoje nustatyti mažiausi kiekiai visų tirtų elementų. Artimiausia medienai savo elementine sudėtimi yra kanapė, tačiau Ca, Si, Mg ir Al kiekiai yra didesni. Žemės ūkio atliekose yra itin dideli K, P ir Na kiekiai.

2 lentelėje pateikti visų tirtų medienos ir agromasės rūšių pelenų elementinės sudėties tyrimo rezultatai.

2 lentelė. Tirtų pelenų elementinė sudėtis, %

	Ca	K	Si	P	Mg	Al	Na
Beržas	31,21	12,72	0,86	1,62	3,43	0,18	0,53
Eglė	29,43	12,78	1,56	1,35	2,39	0,33	0,55
Nendrinis dryžutis	4,77	45,71	7,89	2,80	1,85	0,17	0,47
Kanapė	22,16	18,31	0,16	0,25	2,56	0,01	0,23
Grikių šiaudai	19,22	41,86	n/d	2,66	1,38	0,16	0,60
Kviečių šiaudai	6,04	35,94	18,14	2,16	1,90	0,41	0,49
Rapsų šiaudai	19,80	37,41	4,55	1,56	2,12	0,52	0,80
Rugių šiaudai	6,54	24,22	20,75	1,73	2,00	0,83	0,52
Saulėgrąžų sėklos	5,02	47,62	0,31	10,26	3,03	0,05	1,11

Kaip matyti iš 2 lentelėje pateiktų rezultatų, visų mėginių pelenuose nustatytos kur kas didesnės elementų koncentracijos, nei medienos mėginių pelenuose. Didžiausia Ca koncentracija nustatyta medienos pelenuose. Beržo (31,21 %) pelenuose nustatytas Ca kiekis didesnis, nei eglės (29,43 %) pelenuose. Didelė K koncentracija nustatyta dryžučio, grikių šiaudų ir saulėgrąžų sėklų pelenuose. Saulėgrąžų sėklose K nustatyta 47,62 %, grikių šiauduose 41,86 %, dryžučio pelenuose 45,71 %. Si didžiausi kiekiai nustatyti rugių ir kviečių šiauduose, atitinkamai 20,75 % ir 18,14 %. Didele P koncentracija iš visų tirtų mėginių išsiskiria saulėgrąžų sėklų pelenai. Juose nustatyta 10,26 % fosforo. Saulėgrąžų sėklų pelenuose taip pat nustatytas ir didelis Mg kiekis 3,03 %, tačiau dar didesnis Mg kiekis nustatytas beržo pelenuose, kuris siekia 3,43 %. Al daugiausia nustatyta rapsų ir rugių šiauduose, atitinkamai 0,52 % ir 0,83 %. Na taip pat gausu rapsų pelenuose 0,80 %, tačiau didesnė koncentracija nustatyta saulėgrąžų sėklų pelenuose 1,11 %. Iš visų

tirtų agromasės pelenų mėginių labiausiai išsiskiria kanapės pelenai. Kanapės pelenų elementinė sudėtis labiau artima medienos pelenų sudėčiai.

Palyginus visus gautus rezultatus matyti, kad labiausiai išsiskiria medienos pelenai, kuriuose vyrauja Ca ir Mg. Žoliniuose augaluose (dryžutyje) daugiausia K, Si ir P. Iš žemės ūkio produktų labiausiai išsiskiria saulėgrąžų sėklų pelenai, kuriuose nustatytos itin didelės K, P, Mg bei Na koncentracijos. Šiaudų pelenuose daugiausia K, Si ir Al.

Atlikta duomenų skaitinė analizė parodė, kad pelenų lydymosi temperatūros priklauso nuo atskirų elementų kiekio. Pelenų lydymosi temperatūros priklausomumas nuo elemento kiekio pateiktas 3 lentelėje.

3 lentelė. Pelenų lydymosi temperatūrų priklausomumas nuo elementų kiekio

	ST	DT	HT	FT
Si	-0,41 ($R^2 = 0,17$)	-0,86 ($R^2 = 0,74$)	-0,79 ($R^2 = 0,62$)	-0,78 ($R^2 = 0,60$)
P	-0,37 ($R^2 = 0,14$)	-0,02 ($R^2 = 0,00$)	-0,25 ($R^2 = 0,06$)	-0,24 ($R^2 = 0,06$)
Ca	-0,24 ($R^2 = 0,06$)	0,36 ($R^2 = 0,13$)	0,65 ($R^2 = 0,43$)	0,66 ($R^2 = 0,44$)
Na	-0,68 ($R^2 = 0,46$)	-0,06 ($R^2 = 0,00$)	-0,01 ($R^2 = 0,00$)	-0,01 ($R^2 = 0,00$)
Mg	-0,45 ($R^2 = 0,20$)	0,21 ($R^2 = 0,04$)	-0,06 ($R^2 = 0,00$)	-0,05 ($R^2 = 0,00$)
K	-0,63 ($R^2 = 0,39$)	-0,67 ($R^2 = 0,45$)	-0,44 ($R^2 = 0,19$)	-0,44 ($R^2 = 0,20$)
Al	-0,50 ($R^2 = 0,25$)	-0,42 ($R^2 = 0,18$)	-0,35 ($R^2 = 0,12$)	-0,36 ($R^2 = 0,13$)

Nustatyta, kad ST temperatūra silpnai neigiamai ($R^2 = 0,17$) koreliuoja su Si kiekiu. Kitų temperatūrų (DT, HT, FT) atveju gauta stipri neigiama koreliacija (atitinkamai $R^2 = 0,74$; $0,62$ ir $0,60$).

Nagrinėjant Ca kiekio ir pelenų lydymosi temperatūrų sąryšį gauta, kad jis yra silpnas ir neigiamas ($R^2 = 0,06$). Panašus rezultatas gaunamas ir su DT temperatūra, tik koreliacija yra silpna ir teigiama ($R^2 = 0,13$). HT ir FT atveju gaunama vidutinio stiprumo teigiama koreliacija (atitinkamai $R^2 = 0,43$ ir $0,44$).

Įvertinus K ir temperatūrų tarpusavio priklausomumą nustatyta, jog K kiekis ir ST bei DT temperatūros koreliuoja vidutiniškai stipriai neigiamai ($R^2 = 0,39$ ir $0,45$). Tuo tarpu koreliacija tarp K ir HT bei FT yra silpnai neigiama (atitinkamai $R^2 = 0,19$ ir $0,20$).

Nustatytas pelenų ST, DT, HT, FT temperatūrų priklausomumas nuo Al kiekio yra silpnai neigiamas ($R^2 = 0,13$ – $0,25$).

Įvertinus P ir temperatūrų savitarpio priklausomumą nustatyta, kad P su ST koreliuoja silpnai neigiamai ($R^2 = 0,14$), o su HT ir FT temperatūromis labai silpnai neigiamai ($R^2 = 0,06$; $0,06$). Ryšio tarp P kiekio ir DT ($R^2 = 0,00$) temperatūros nustatyta nebuvo.

Na kiekis ir ST temperatūra koreliuoja vidutiniškai stipriai neigiamai ($R^2 = 0,46$), tačiau įvertinus koreliaciją su DT, HT ir FT temperatūromis ryšys nebuvo nustatytas ($R^2 = 0,00$).

Mg kiekis koreliuoja silpnai neigiamai su ST temperatūra ($R^2 = 0,20$) ir labai silpnai teigiamai su DT temperatūra ($R^2 = 0,04$). HT ir FT temperatūrų atveju ryšio nėra ($R^2 = 0,00$).

Apibendrinus analizės duomenis galima daryti prielaidą, kad didėjant Si, K ir Al kiekiui, mažėja pelenų FT temperatūra, o esant didesniai Ca kiekiui, pelenų FT temperatūra padidėja. P, Na ir Mg atveju ryšio tarp kintamųjų nėra arba jis labai silpnas.

Išvados

1. Deginant medieną susidaro gerokai mažesni pelenų kiekiai nei deginant agromasę. Rapsų ir grikių šiaudų peleningumas yra didžiausias ir siekia atitinkamai 6,4 ir 6,5 %. Tiek eglės, tiek beržo peleningumas yra daugiau nei dešimt kartų mažesnis ir siekia atitinkamai 0,6 % ir 0,5 %.
2. Šunažolės ir kanapės pelenų ST temperatūros yra didžiausios ir siekia atitinkamai 1061 °C ir 1079 °C, o FT temperatūros atitinkamai 1287 °C ir 1496 °C. Greičiausiai ir žemiausioje temperatūroje ima minkštėti grikių šiaudų pelenai 698 °C, nors jų FT temperatūra siekia net 1549 °C. Šiuo atveju, šlakavimosi procesas pradeda vykti esant palyginti žemai temperatūrai.
3. Medienos pelenuose vyrauja Ca ir Mg, žolinių augalų pelenuose (dryžutyje) – K, Si, P, šiauduose – K, Si, Al. Labiausiai išsiskiria saulėgrąžų sėklų pelenai, kuriuose nustatytos itin didelės K, P, Mg bei Na koncentracijos.
4. Labiausiai deginti tinkamas iš kanapės agromasės pagamintas kuras. Šio kuro pelenų savybės labiausiai artimos medienos kuro pelenų savybėms.

Literatūra

1. Vares V., Kask Ū., Muiste P., Pihu T., Soosaar S. 2007. Biokuro Naudotojo žinynas. Vilnius: Žara. 31 p.
2. Teixeira P., Lopes H., Gulyurtlu I., Lapa N., Abelha P. 2012. Evaluation of slagging and fouling tendency during biomass co-firing with coal in a fluidized bed. Biomass and Bioenergy. 39, p. 192-203.
3. Paulrud S. 2004. Upgraded Biofuels - Effects of quality on Processing, Handling characteristics, Combustion and Ash melting. Doctoral thesis (Unit of Biomass Technology and Chemistry). Umeå: Swedish University of Agricultural Sciences. 53 p.

4. Wang L., Hustad J. E., Skreiberg Ø., Skjevrak G., Grønli M. 2012. A critical review on additives to reduce ash related operation problems in biomass combustion applications. *Energy Procedia*. 20, p. 20-29.
5. Niu Y., Tan H., Hui S. 2015. Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures. *Progress in Energy and Combustion Science*. In Press.

Ash fusion research of fuel made from wood and agromass

Summary

Not only wood biomass can be used as biofuels, but also herbaceous plants, agricultural waste. The main problem using herbaceous plants and agricultural waste as agrofuels is that it is rich in alkali metals such as potassium and sodium, which causes slagging problem.

In this study, chemical composition and melting behaviors of ashes were investigated. Ash melting temperature of samples were determined using a high temperature furnace with a video camera. Ash elemental composition survey was conducted by inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES).

2 BRANDUOLINĖ ENERGETIKA

Kas neįvertinama nagrinėjant branduolinės energetikos perspektyvas Lietuvoje?

Arvydas Galinis, Vidas Lekavičius
Lietuvos energetikos institutas

Energetikos sektorių sudaro aibė įvairių technologijų, skirtų įvairių rūšių energijai išgauti, konvertuoti, transportuoti ir paskirstyti. Visi šie procesai yra glaudžiai tarpusavyje susiję, o atskiros technologijos atlieka tam tikras tik joms būdingas funkcijas, be kurių, taip pat ir iš pirmo žvilgsnio nelabai reikšmingų, energetikos sektoriaus funkcionavimas būtų dar labiau sudėtingas arba iš viso negalimas. Taigi, nagrinėjant atskiros energetikos sektoriaus technologijos ekonominį patrauklumą ir energetinį priimtinumą, reikia atsižvelgti ir įvertinti visą eilę jos sukeliamų ekonominių ir energetinių efektų bei įvairaus pobūdžio ribojimų. Pavyzdžiui, vėjo ar saulės elektrinių gaminama elektros energija pasižymi dideliu nepastovumu dėl vėjų greičio ar žemės paviršių pasiekiančios saulės spinduliuotės kitimo. Siekiant tokias elektrines integruoti į energetikos sektorių, lygiagrečiai reikia vystyti elektros energijos gamybą-vartojimą balansuojančias manevringas elektrines, elektros energijos akumuliacijos technologijas ar energijos vartojimą galinčias keisti išmaniąsias technologijas. Lygiai taip pat, bet kokių vienu, atskirai paėmus net ir labai ekonomiškai efektyvių, bet nemanėvringų technologijų darbas būtų sudėtingas sistemoje, kurioje vartojimas kinta gan greitai arba yra įdiegta daug kintamos gamybos technologijų. Gamybai-vartojimui balansuoti tokiu atveju bus būtinos ir manėvringos technologijos, net jeigu kiti jų rodikliai prastesni.

Svarbu atsižvelgti ir į efektus, kuriuos energetikos sektoriuje sukelia būtinybė rezervuoti laikinai neveikiančias technologijas, energetikos technologijų poveikį aplinkai, visuomenės nuomonę ir kitus aspektus. Dėl šių ir panašių efektų, atskirų technologijų ekonominio patrauklumo palyginimas yra negalimas, jeigu neatsižvelgiama į susijusius efektus, kurie savo ruožtu gali priklausyti tiek nuo vidinių, tiek nuo išorinių sąlygų. Taigi, tradicinis energetikos technologijų tarpusavio palyginimas, atsižvelgiant tik į teorines palyginamąsias elektros energijos gamybos kainas, yra labai ribotas. Šio straipsnio tikslas – branduolinės energetikos pavyzdžiu plačiau aptarti veiksnius, lemiančius energetikos technologijų perspektyvas.

Investicijos. Investicijų dydžio klausimas branduolinių elektrinių atveju yra esminis, kadangi kapitalo dedamoji sudaro labai reikšmingą bendrų energijos gamybos kaštų dalį. Be to, ypač nedidelių šalių atveju, investicijos į atomines elektrines gali turėti reikšmingų išorinių ekonominių efektų, kurie pasireiškia per investicijų sumažėjimą kitose ūkio šakose ir iš to sekantį bendrą aktyvumo lygio sumažėjimą.

1 lentelėje pateikiami kai kuriose Europos šalyse planuojamų ar vykdomų branduolinių elektrinių statybos projektų investicijų rodikliai.

1 lentelė. Europoje vystomų branduolinių elektrinių statybos projektų investicijų rodikliai

Projektas	Reaktoriaus tipas	Šalis	Galia (MW)	Investicijos (mlrd. Eur)	Lyginamosios investicijos* (Eur/kW)	Informacijos šaltinis
Visagino atominė elektrinė	ABWR	Lietuva	1350(1384)	4,6–5.2	3324–3757	VAE (2012)
Horizon Nuclear Power	ABWR	Jungtinė Karalystė	5400 (2×2×1350)	28	5185	Flexman (2015)
Baltarusijos Astravo AE	VVER-1200	Baltarusija	2400 (2×1200)	10,15 (11 mlrd. USD)	4229	Power-technology.com (2015a)
Hinkley Point C	EPR	Jungtinė Karalystė	3260 (3200, 2×1600)	21.03-24.91 (27 mlrd. USD, 16 mlrd. GBP)	6450–7641	Power-technology.com (2015b)

Lyginant planuojamas Visagino atominės elektrinės (VAE) investicijas (angl. *overnight cost*) su kitomis lentelėje pateiktomis investicijomis, pastebimi gana ryškūs skirtumai. Pavyzdžiui, Baltarusijoje statomos Astravo branduolinės elektrinės lyginamosios investicijos (investicijos, tenkančios 1 kW instaliuotos galios) yra 13–27 % didesnės už VAE investicijas, net nevertinant tai, kad, pagal VAE verslo plane pateiktą informaciją, dviejų blokų branduolinės elektrinės lyginamosios investicijos yra apie 20 % mažesnės nei vieno bloko elektrinės. Taigi, korektiškam investicijų palyginimui lyginamosios Astravo AE investicijos turėtų būti padidinamos. Tada Astravo AE investicijos būtų 35 – 53 % didesnės už Visagino AE investicijas. Jungtinėje Karalystėje planuojamo Horizon Nuclear Power projekto, planuojančio plėtoti tokią pačią ABWR technologiją kaip ir Visagine, investicijos yra 38–56 % didesnės, o įvertinus pataisą dėl vieno ar kelių reaktorių, šis skirtumas išaugtų iki 66–87 %. Hinkley Point C elektrinės planuojamos investicijos 72–130 % viršija Visagino AE planuojamas investicijas, net nevertinant pataisų dėl blokų skaičiaus. Panašių pavyzdžių galima būtų pateikti ir daugiau.

Iš to logiškai seka, kad arba dėl objektyvių ar subjektyvių priežasčių kai kurie branduolinės energetikos projektai reikalauja mažesnių investicijų, arba tiesiog esama atveju, kai esminė projektą apibūdinanti informacija pateikiama nepakankamai atsakingai. VAE atveju, verslo plane nurodoma, kad investicijos paskaičiuotos pagal Shimane trečiojo bloko ir JAV „Scana Corporation“ vystomo AP1000 projekto investicijas (VAE, 2012), taigi galima manyti, kad deklaruojamos sąlyginai mažesnės lyginamosios investicijos nėra sąlygotos projekto specifikos. Pažymėtina, kad Shimane trečiasis blokas kol kas nėra baigtas (statybos sustabdytos ir

kol kas nėra atnaujintos), o Scana korporacijos projektai reikšmingai vėluoja ir biudžetas auga (Downey, 2015).

Atsižvelgiant į tai, labai svarbu aptarti ir kitus veiksnius, paprastai nevertinamus skaičiuojant elektros energijos savikainą, tačiau realybėje turinčius esminės įtakos branduolinės energetikos projektų realizavimui.

Nukrypimai nuo projekte numatytų sąlygų. Projektinių investicijų poreikio vykdymas statybos metu bei projektinio statybos laiko užsitęsimas labai stipriai lemia energetikos objektų patrauklumą, o jų įtaka yra tuo didesnė, kuo didesnė yra projektų investicijų dedamoji energijos gamybos savikainoje. 2 lentelėje pateikiama plati statistinė informacija apie atskirų tipų energetikos objektų įgyvendinimo nukrypimus nuo projektinių rodiklių. Šie duomenys rodo, kad daugeliui energetikos objektų yra būdingas investicijų ir statybos laiko viršijimas, tačiau branduolinės elektrinės pakankamai ryškiai išsiskiria iš kitų.

Net 92 % branduolinių projektų būdingas investicijų viršijimas, o vidutinis investicijų prieaugis virš projektinių reikšmių vertinamas net 117 %. Papildant galima paminėti, kad Suomijoje šiuo metu statomo Olkiluoto-3 branduolinio energetinio bloko investicijos pagal 2015 m. gegužės mėn. pranešimus išaugo 2,65 karto (Jim Green, et. all, 2015), o Prancūzijoje statomo Flamanville-3 net 3,2 karto (Flamanville. 2015). Tiesa, tai nauji ir kitokio tipo nei planuota VAE atveju reaktoriai, bet investicijų viršijimas yra įspūdingas. Stambioms hidroelektrinėms taip pat būdingas ženklus investicijų viršijimas. Tokios tendencijos aiškinamos tuo, kad pradėjus didelius projektus, vėliau jau tiesiog „nėra kur trauktis“, o projektų vystytojai yra suinteresuoti pirminėse fazėse pateikti optimistinius duomenis. Tai galima iliustruoti ir Hinkley Point branduolinės elektrinės Jungtinėje Karalystėje pavyzdžiu: 2008 m. pabaigoje buvo teigiama, kad megavatvalandės elektros energijos savikaina sieks 45 svarus sterlingų, tačiau jau 2013 m. patvirtintas susitarimas, kuriame numatyta, kad 35 metus elektros energija bus superkama daugiau nei dvigubai brangiau, po 92,5 svaro sterlingų už megavatvalandę. Nepaisant tokios patrauklios garantuoto supirkimo kainos, galutinis investavimo sprendimas kol kas nepriimtas.

Kitiems nagrinėtiems energetikos objektams vidutinis investicijų prieaugis statybos metu neviršija 13 %. Panaši situacija yra su statybos laiko užsitęsimu, kuris branduolinėms elektrinėms vertinamas vidutiniškai 64 %. Suprantama, kad konkretaus energetikos objekto, taip pat Visagino AE, realizacija gali ir neatitikti šios statistikos, tačiau pateikti duomenys rodo apie didelę tokių efektų pasireiškimo tikimybę ir didelį mastą, o tai stabdo branduolinės energetikos plėtrą visame pasaulyje.

2 lentelė. Energetikos projektų įgyvendinimo statistika (Benjamin K. Sovacool, et al., 2014)

Rodiklis	Hidro-elektros	Branduolinės elektros	Šiluminės elektros	Vėjo elektros	Saulės elektros	Linijos
Projektų skaičius (N)	61	180	36	35	39	50
Projektų skaičius su investicijų viršijimu	47	175	24	20	16	20
Projektų skaičius su investicijų viršijimu, %	77	92.2	66.7	57.1	41	40
Investicijų prieaugis, %	70.6	117.3	12.6	7.7	1.3	8
Statybos laiko viršijimas, %*	63.7	64	10.4	9.5	0.2	7.5

Pastaba: * Taikoma mažesnei imčiai $N = 33$ hidroelektrinės, 175 branduolinės elektrinės, 24 šiluminės elektrinės, 18 vėjo elektrinės, 23 saulės elektrinės, 49 elektros perdavimo linijos.

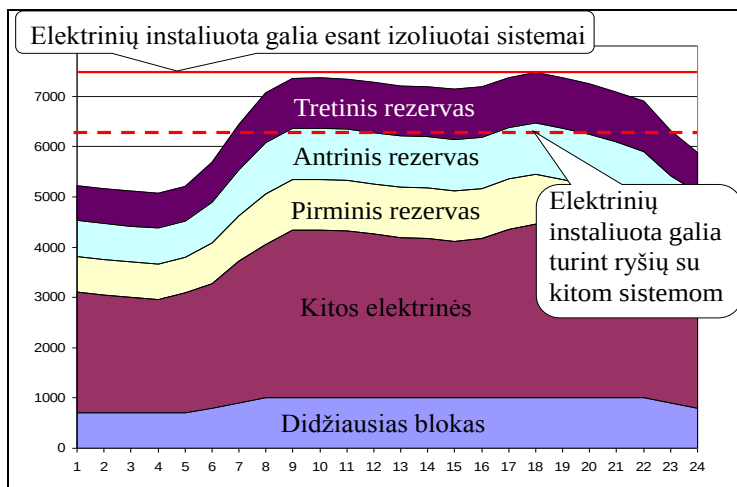
Kitas svarbus momentas, atspindimas ir palyginamųjų elektros gamybos savi kainų skaičiavimuose – vadinamasis galios išnaudojimo koeficientas. Visagino AE verslo plane įrengtos galios išnaudojimo koeficientas prilygintas 90 % – toks ar panašus projektinis rodiklis naudojamas ir kitų atominių elektrinių atveju, tačiau yra kritikuojamas mokslininkų, empiriniais tyrimais parodančių, kad tokių optimistinių charakteristikų priėmimui nėra aiškaus pagrindo (Du, Parsons, 2010).

Praktikoje 90 % galios išnaudojimas reiškia, kad elektrinė pilna galia metų bėgyje turi dirbti 7880 valandų. Apžvelgus pasaulyje eksploatuojamų branduolinių elektrinių su BWR tipo reaktoriais statistinius duomenis matyti, kad vidutinis jų galios išnaudojimo koeficientas yra 70,2 % (Load factors..., 2012), taigi vidutinis elektrinių instaliuotos galios išnaudojimo laikas yra ne 7880 o tik 6150 valandų. Žinoma, esama ir sėkmės šioje srityje pavyzdžių: pastaraisiais metais JAV branduolinės elektrinės rodo itin gerus galios išnaudojimo rezultatus. Nepaisant to, branduolinės elektrinės, kurių viso tarnavimo laikotarpio vidutinis galios išnaudojimo koeficientas siekia 90 % yra retas atvejis, tačiau yra atskirų pavyzdžių, kai šis rodiklis nesiekia ir 50 % (naujausių ABWR reaktorių Shika 2 ir Hamaoka 5 pavyzdžiai). Pažymėtina, kad praktikoje branduolinės elektrinės galios išnaudojimo koeficiento reikšmę taip pat gali mažinti siekis tam tikrą galutinių energijos vartotojų poreikį dalį patenkinti energija, gaunama iš atsinaujinančių energijos išteklių arba bandymas eksploatuoti branduolines jėgaines apkrovą sekančiu (load-following) režimu.

Rezervinės galios. Elektros energetikos sistemoje dirbančios elektrinės kartais sugenda. Tam, kad sistemoje nesutriktų gamybos ir vartojimo balansas ir sistema liktų stabiliai dirbanti, sugedusių agregatų rezervavimui reikia rezervų. Kuo didesnis galimas trikdys sistemoje, tuo daugiau reikia rezervinių galių. Taigi, didelių energetinių blokų įvedimas į eksploataciją neišvengiamai iššaukia daugiau re-

zervavimo problemų. 1 pav. parodytas elektrinių rezervavimo principas ir rezervinių galių poreikis.

Pateiktame paveiksle vartotojų poreikius dengia sistemoje eksploatuojamas „didžiausias blokas“ ir „kitos elektrinės“. Dėl įvairių priežasčių staiga sustojus didžiausiam blokui, jį nedelsiant turi pakeisti pirminį rezervą galintys teikti įrenginiai (čia reikia pastebėti, kad skirtingo rezervų paslaugų teikimui naudojami įrenginiai, besiskiriantys manevrinėmis savybėmis, disponuojamu energijos kiekiu, efektyvumu ir pan.). Tai yra, eksploatuojami įrenginiai, trumpam laikui galintys padidinti į tinklą tiekiamą galią. Pirminio rezervų reikia tiek, kokio dydžio yra sugedęs blokas. Šiuo konkrečiu atveju pirminio rezervų galia lygi didžiausio bloko galiai.

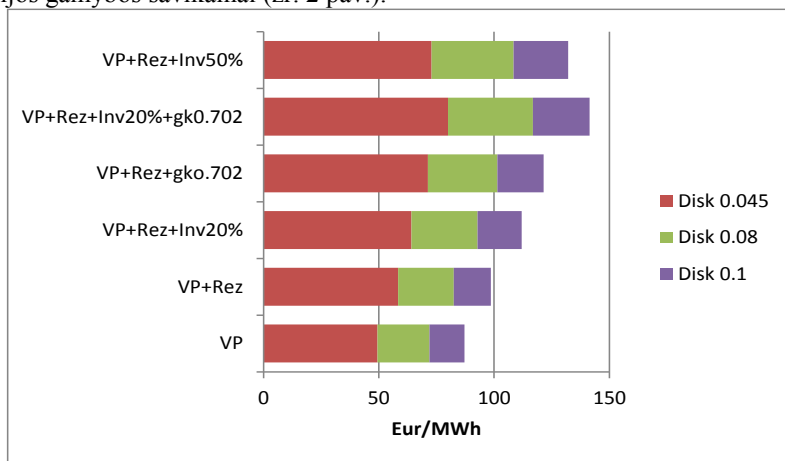


1 pav. Elektrinių rezervavimas ir rezervų poreikiai

Pirminis rezervas keliolikos minučių bėgyje turi būti pakeistas antriniu rezervu, o pirminis atlaisvintas – reagavimui į kitą galimą avariją sistemoje. Taigi, antrinio rezervų dydis taip pat yra lygus didžiausio bloko galiai. Antrinis rezervas per keletą valandų taip pat turi būti pakeistas tretiniu rezervu, eksploatuojamu tol, kol sistemoje pašalinama avarija. Taigi, suminis rezervas sistemoje turi būti apytikriai lygus trigubai didžiausio bloko galiai. Jeigu sistema dirba izoliuotai nuo kitų, visas šis rezervas turi būti dislokuotas tos sistemos viduje. Suminė izoliuota elektrinių galia tokioje sistemoje maksimalią vartotojų pareikalaujamą galią turi viršyti dydžiu, apytikriai lygiu trigubai didžiausio bloko (trikdžio) galiai. Tuo atveju, kai sistema yra sujungta su kaimyninių šalių elektros energetikos sistemomis, rezervines paslaugas (sutarčių pagrindu) galima gauti per ryšio linijas. Suprantama, kad šiuo atveju reikiami rezervai turi egzistuoti kaimyninėse šalyse, o ryšio linijos būtų pajėgios tas reikiamas rezervines galias perduoti.

Baltijos šalių elektros energetikos sistemoje didžiausi rezervinių galių poreikiai būtų reikalingi Visagino AE statybos atveju. Antrasis galimas pagal dydį trikdys būtų Lietuvos-Švedijos jungties atsijungimas. Visagino AE netikėto sustojimo atveju Baltijos šalių elektros energetikos sistema patirtų 684 MW didesnį trikdį, lyginant su galimu linijos Lietuva-Švedija atsijungimu. Šio papildomo trikdžio rezervavimas tiesiogiai siejamas su Visagino AE. Taigi, statant Visagino AE, papildomai reikėtų ~684 MW pirminio rezervo, ~684 MW antrinio rezervo ir tokio pat tretinio rezervo. Atlikti Baltijos šalių elektros energetikos sistemos plėtros ir funkcionavimo tyrimai rodo, kad 1 MW Visagino AE papildomai reikalauja ~0,49 MW rezervinių galių instaliuotų Baltijos regiono viduje ir ~0,99 MW gaunamo per tarpvietines elektros perdavimo linijas. Išaugę rezervinių galių poreikiai sąlygoja papildomas elektrinių eksploatacines išlaidas, papildomas išlaidas rezervinėms galioms įsigyti kaimyninėse elektros energetikos sistemose, taip pat mažina tarpvietinių elektros perdavimo linijų komercinio panaudojimo galimybes ir didina mažiau efektyvių elektrinių eksploataciją regiono viduje.

Korektiškam daugelio minėtų veiksnių sukeltų ekonominių-technologinių efektų įvertinimui galima panaudoti energetikos sektoriaus plėtros ir funkcionavimo matematinius modelius, kuriuose šie aspektai gali būti papildomai detalizuojami specialiomis matematinėmis lygtimis. Šiame straipsnyje apsiribosime tik orientacine atskirų ar grupės veiksnių daroma įtaka skaičiuotinai Visagino AE elektros energijos gamybos savikainai (žr. 2 pav.).



2 pav. Elektros energijos gamybos Visagino AE skaičiuotinų savikainų priklausomumas nuo nagrinėtų veiksnių (VP – pagal VAE verslo plano duomenis; Rez – įvertinant papildomus rezervo poreikius; gk0.702 – galios išnaudojimo koeficientą prilyginus vidutiniam BWR reaktorių rodikliui; Inv20%, Inv50% – investicijas padidinus 20 ir 50 %)

Kaip matyti iš 2 paveikslo, atsižvelgiant į vertinamus veiksnius ir jų dydį, elektros energijos gamybos savikainos gali skirtis gana ryškiai. Viena vertus, tai rodo, kad priimant sprendimus dėl branduolinės energetikos plėtros svarbu vadovautis ne tik projekciniais rodikliais, bet ir kita informacija, ypač susijusia su projektnių rodiklių neapibrėžtumais. Kita vertus, projektnių ir realių rodiklių nesutapimai paaiškina, kodėl teorinėse lyginamųjų sąnaudų studijose gana patraukliai atrodančių branduolinių jėgainių plėtra išsivysčiusiose demokratinėse šalyse nėra tokia sparti, kaip būtų galima tikėtis iš optimistinių projektnių rodiklių ir jais grįstų skaičiavimų.

Įtaka šiltnamio dujų emisijoms. Vienas didžiausių branduolinės energetikos privalumų yra tai, kad tai, bent jau šiltnamio dujų emisijų prasme, yra iš dalies netaršus energijos gamybos būdas. Apibendrinant įvairių tyrimų duomenis galima teigti, kad branduolinių elektrinių šiltnamio dujų emisijos per gyvavimo ciklą yra artimos atsinaujinančius energijos išteklius naudojančioms technologijoms. Vis dėlto, Lietuvos atveju branduolinės elektrinės buvimas ar nebuvimas neturi labiau juntamų skirtumų teršalus išmetant į atmosferą. Tai paaiškinama tuo, kad dėl AEI lygio galutinėje energijoje siekių, tiek elektros energijos, tiek centralizuotai tiekiamos šilumos gamyba turėtų būti orientuojama į netaršių atsinaujinančių išteklių, didele dalimi vėjo ir saulės energijos, panaudojimą. Branduolinės elektrinės buvimas ar nebuvimas taip pat siejamas su pasikeitimais elektros energijos importo/eksporto srautuose. Tačiau, žiūrint iš Lietuvos pozicijų, tiek elektros energijos gamyba iš branduolinio kuro, tiek elektros energijos importas yra netaršūs procesai.

Kiti veiksniai. Esama ir kitų rodiklių, kurie lemia branduolinės energetikos perspektyvas, tačiau yra gana sunkiai išmatuojami. 2 paveiksle pateikti duomenys niekaip nevertina papildomų ekonominių – energetinių efektų, susijusių su generuojančių galių struktūros ir jų panaudojimo pasikeitimais Baltijos šalių elektros energetikos sistemoje atsiradus branduolinei elektrinei, tarp sisteminių elektros perdavimo jungčių darbo režimų ir elektros energijos importo-eksporto srautų pasikeitimais, didelio ir iš dalies nepaslankaus generacijos šaltinio darbo suderinamumo su atsinaujinančius energijos išteklius naudojančiomis elektrinėmis, pasikeitimų centralizuoto šilumos tiekimo sistemose dėl termofikacinių elektrinių instaliuotų galių ir šilumos gamybos apimčių jose pasikeitimų ir kt. Taip pat pažymėtina, kad branduolinės energetikos perspektyvoms kritiškai svarbus veiksnys yra priimtinas visuomenei, kadangi šis elektros energijos gamybos būdas jau ilgą laiką yra vertinamas kontraversiškai tiek dėl galimų avarijų rizikos, tiek ir dėl galimos ekonominės naštos ir neigiamos įtakos visuomenės raidai.

Išvados

1. VAE verslo plane numatytos investicijos į branduolinę elektrinę yra gerokai mažesnės nei kitų Europoje planuojamų ar vystomų branduolinių elektrinių.

Tai yra vienas esminių veiksnių, lemiančių šio projekto patrauklumą, tačiau verslo planas neatskleidžia specifinių veiksnių, mažinančių reikiamas investicijas.

2. Vertinant branduolinės energetikos perspektyvas šalyje, svarbu atsižvelgti ir į tokius faktorius, kaip galimi biudžeto ar statybos trukmės viršijimai, eksploatacijos metu išryškėjantys mažesni nei planuota galios išnaudojimo faktoriai. Net ir gana konservatyvūs nagrinėtų rodiklių nukrypimai nuo verslo plano duomenų, gali sąlygoti ryškius elektros energijos savikainos prieaugius.
3. Visagino AE statyba Baltijos šalių elektros energetikos sistemoje pareikalautų papildomų 2 GW rezervinių galių, kurios turėtų būti dislokuotos regione arba užtikrinamos per tarp sisteminės elektros jungtis. Rezervinių paslaugų teikimas ryšio linijomis keistų jų panaudojimo komerciniams tikslams galimybes.

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

Literatūra

1. Benjamin K. Sovacool, Alex Gilbert, Daniel Nugent. (2014). Risk innovation, electricity infrastructure and cost overruns: Testing six hypotheses. *Energy*. Volume 74, 1 September 2014, p. 906-917. Prieiga internete: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214008925>
2. Downey, John (2015). SCANA tells regulators nuke plant will be delayed, costs will rise. *Charlotte Business Journal*. Prieiga internete: <http://www.bizjournals.com/charlotte/blog/energy/2015/03/scana-tells-regulators-uke-plant-will-be-delayed.html>
3. Du, Y. ir Parsons, J. E. (2010). Capacity Factor Risk at Nuclear Power Plants.
4. Flamanville. (2015). Flamanville EPR timetable and costs revised. World nuclear news. Internetinė prieiga: <http://www.world-nuclear-news.org/NN-Flamanville-EPR-timetable-and-costs-revised-0309154.html>.
5. Flexman, Leon. (2015). Nuclear new build: Socio-economic benefits.
6. Gosden, Emily (2015). Hinkley Point new nuclear power plant: the story so far. *The Telegraph*. Prieiga internete: <http://www.telegraph.co.uk/news/earth/energy/nuclearpower/11404344/Hinkley-Point-new-nuclear-power-plant-the-story-so-far.html>
7. Jim Green & Oliver Tickell. (2015). Finland cancels Olkiluoto 4 nuclear reactor – is the EPR finished? Internetinė prieiga: http://www.theecologist.org/News/news_analysis/2859924/finland_cancels_olkiluoto_4_nuclear_reactor_is_the_epr_finished.html
8. Load factors to end June 2012 (2012). Prieiga internete: <http://www.neimagazine.com/features/featureload-factors-to-end-june-2012/featureload-factors-to-end-june-2012-4.html>.

9. Power-technology.com. (2015a). Belarusian Nuclear Power Plant, Ostrovets, Belarus. Prieiga internete: <http://www.power-technology.com/projects/belarusian-nuclear-power-plant-ostrovets/>
10. Power-technology.com. (2015b). Hinkley Point C Nuclear Power Station, United Kingdom. Prieiga internete: <http://www.power-technology.com/projects/hinkley-point-c-nuclear-power-station/>.
11. VAE. (2012). Visaginas NPP Business Plan.

What is Overlooked in the Considerations on the Prospects of Nuclear Power in Lithuania?

Summary

Current considerations about the prospects of nuclear power in Lithuania are mainly focused on the expected cost of electricity generation which is calculated using project assumptions. However, a wide variety of factors and uncertainties must be addressed in order to create comprehensive background for the decision-making. This paper discusses some of aspects that are usually overlooked in the considerations on the prospects of nuclear power in Lithuania.

Modeling of Station Blackout Accident in ABWR Reactor

Tadas Kaliatka*, Hiroyasu Mochizuki**

*Lithuanian Energy Institute

**Research Institute of Nuclear Engineering, University of Fukui

Introduction

Following the accident at the nuclear power plant Fukushima-Daiichi in Japan, the “stress tests” had to be performed in European countries [1] as well as in Japan. Stress tests required evaluation of the consequences of loss of safety functions from any initiating event (e.g., earthquake or flooding) causing loss of electrical power, including station blackout (SBO), loss of the ultimate heat sink, or both. SBO scenario involves the loss of offsite power, failure of the redundant emergency diesel generators, failure of alternate current power restoration and the eventual degradation of the reactor coolant pump seals resulting in a long-term loss of coolant.

SBO is one of the most challenging severe accidents for a Boiling Water Reactor. After five years since the Fukushima Daiichi accident, many SBO analyses about boiling and pressurized water reactors may be found in the scientific journals. In this article, the SBO accident is analyzed in Advanced Boiling Water Reactor (ABWR). The construction of ABWR type reactor is very similar to other BWR reactors. However, ABWR has some improvements and differences with previous BWRs: the improvement of safety and reliability, improvement of capacity factor, reduction of radiation dosage, to which workers are exposed, improvement of operability. The main improvements in systems and equipment applied to ABWR are as follows: Reactor Internal Pump (RIP), Fine Motion Control Rod Drive, Reinforced Concrete Containment Vessel, Emergency Core Cooling System (ECCS), new control panel in the Main Control Room, Turbine Equipment. Some of these features have to be taken into account for the model development.

The main aim of the work presented in this article is to develop the ABWR model using RELAP5 code and provide SBO accident analysis. Also, to find the maximum time of safety maintaining of ABWR in the case of SBO until water level decreases to the top of active fuel.

1/10 ABWR model for RELAP5 code. ABWR model for RELAP5 code was developed according to the specification data and commissioning document of the Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power plant [2]. The schematic diagram showing the configuration and main systems of the ABWR is presented in Fig. 1 [3]. The most general data are presented in Table 1.

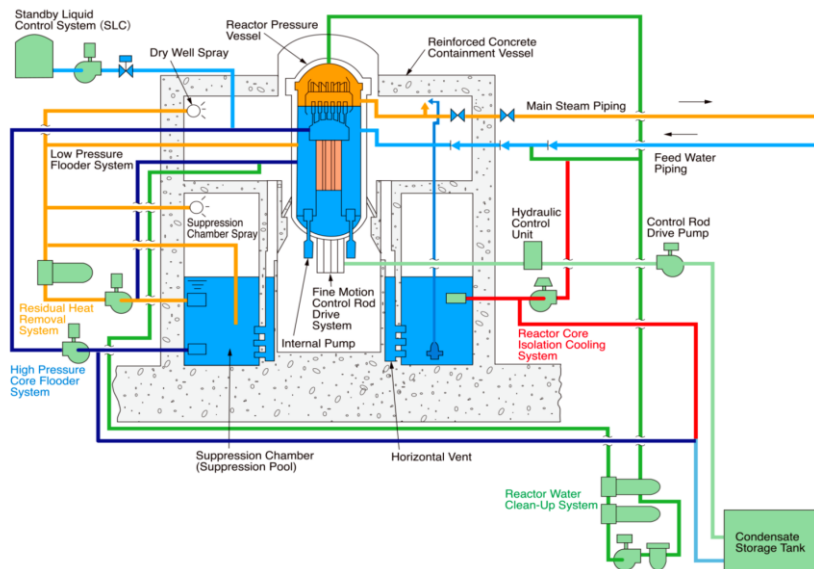


Fig. 1. Schematic diagram showing the configuration and main systems of the ABWR [3]

Table1. Specifications of the primary system of ABWR [2]

Power	3926 MWt; 1356 MWe	Pump rotation speed	1500 rpm
No. of fuel assemblies	872	Fuel effective length	3.71 m
Inlet temperature	275.5 °C	Length of fuel assembly	4.47 m
Outlet temperature	287.4 °C	Fuel matrix	8x8: 62 fuel pins water rods
Pressure	7.17 MPa	Steam flow rate	7640 t/h
No. of internal pumps	10	Feed water flow rate	7640 t/h
Pump flow rate	5200t/h	Feed water temperature	215 °C

In order to simplify the ABWR model, the 1/10 of ABWR model was developed. All volumes, flow rates and other boundary and initial conditions were chosen in order to have 1/10 of ABWR reactor. The schematic view of the model is presented in Fig. 2. As it is 1/10 ABWR model, it has only one RIP pump “PU 14” from 10. 1/10 ABWR model has: one separator component “Sep 7”, which models reactor separator; one single volume component “SV 11” for steam dome; three branch components “Br 3”, “Br 4”, “Br 5”, “Br 6” and “Br 7” for lower head, lower plate, and upper plenum and dryers, respectively; six pipe components “P 8”,

“P 12”, “P 101”, “P 102”, “P 201” and “P 202”. Pipe component “P 8” used to model the small part of steam line. “P 12” models reactor downcomer. The 1/10 ABWR model has two fuel channels. One fuel channel models one maximal power fuel bundle using two pipe components: “P 101” is where fuel bundle is located, and “P 102” is the bypass. Other fuel channel models have in average 86 fuel bundles. This channel also uses two pipe components “P 201” for fuel bundles and “P 202” for bypass. In order to model the heat extracted from the fuel bundles, two heat structures are used. One heat structure is related to pipe component “P 101”, another to pipe component “P 201”. In order to remove the heat from the fuel bundles, heat structure components are also needed. One heat structure component is related to the pipe component “P 101” as a left boundary, and “P 102” as a right boundary. Another heat structure component is related to the pipe component “P 201” as left boundary and “P 202” as right boundary. Feed water injection is modeled using valve component “V 15” and time dependent volume component “TDV 15”. Main Steam Isolation Valves (MSIV) are modeled using valve component “V 20”. The steam lines, turbines and other ABWR components are not modeled; boundary conditions are given using time depended volume “TDV 20”.

Above-mentioned components are needed for the “basic” 1/10 ABWR model, which could be used to model normal operation. However, in order to analyze the SBO accident, it is necessary to make the model of the safety systems (ECCS), which could be activated and used for the safely maintaining of the reactor during the accident. During SBO accident, the Reactor Core Isolation Cooling System (RCIC) could be used; also, Safety Relieve Valves (SRV) and Suppression Pool (S/P) will be needed.

RCIC system is modeled as two water injection lines. First line is the time depended volume component “TDV 88”, pipe components “P 18”, “P 25” and “P 60” and valves components “V 17”, “V 26” and “V 61”. Using “P 18” component, Condensate Storage Pool (CSP) is modeled. The first line is used to inject the water to the reactor until the CSP becomes empty. The second injection line consists of time dependent volume component “TDV 30”, pipe components “P 28” and “P 62” and valve components “V 27”, “V 29” and “V 63”. The second injection line begins operating (injecting water into the reactor) when the CSP is emptied. In RCIC model, “TDV 30” and “TDV 88” are used in order keep stable boundary conditions for injecting water. Components “V 61” and “V 63” are used as flow rate controllers. “V 17”, “V 26”, “V 27” and “V 29” open and close depending on the logic. Open and close logic will be explained in the further sections.

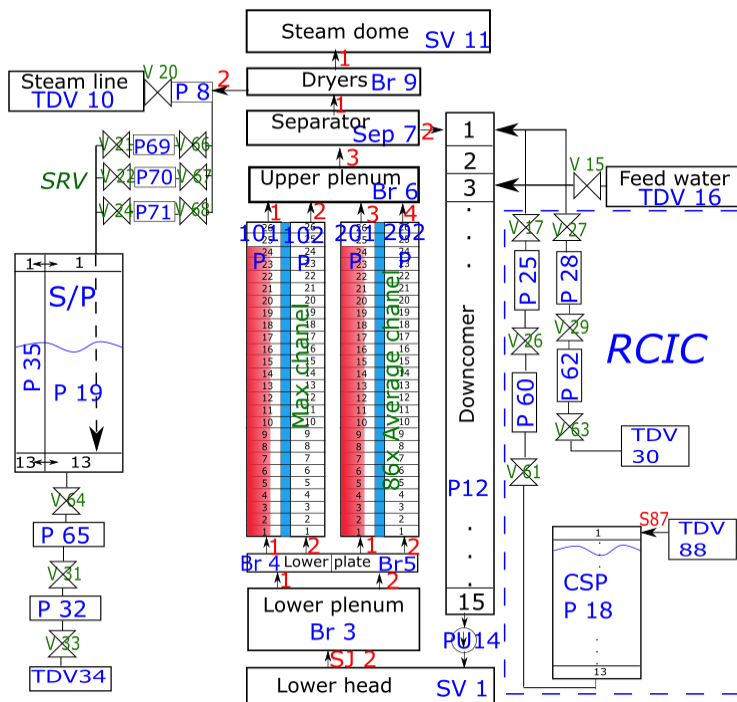


Fig. 2. 1/10 ABWR model for RELAP5 code

18 Safety Relieve Valves were grouped in three groups according to the opening pressures and modeled using three valve components “V21”, “V 22” and “V 24”. “V66”, “V 67” and “V 68” are used as flow rate controllers in order to control flow rate for each of SRV valve groups. Pipe components “P 69”, “P 70” and “P 71” are used just to have a possibility to connect the valves.

S/P was modeled using pipe components “P 19” and “P 35”. Those components are connected radially at each node. The model’s natural water convection and temperature distribute better in S/P when the steam from SRV is injected into the pool. Valve components “V 31”, “V 33”, “V 54”, pipe components “P 32”, “P65” and time dependent volume component are connected to the bottom of S/P. This was done in order to model the water release; then CSP is emptied, and RCIC system uses water from S/P in order to cool down the reactor. “V 54” component is used as flow controller to control the flow from S/P. “V 31”, “V 33” have the logic related to the RCIC system valve logic. Then the second water injection line of RCIC system is activated; the water from S/P is released in order to keep the system balance.

Steady state calculation (ABWR normal operation). Before analyzing SBO accident, it is necessary to achieve the steady state of normal operation situation for ABWR reactor. A sequential startup procedure for ABWR reactor is one of the difficult operations of the reactor exploitation. In this model, the startup operation is not modeled. At the beginning of calculations, the pump starts rotating at the full speed. The power of fuel bundles was increased to the nominal during 1000 s. Because of this situation, in the beginning of the calculation, the water flow rate through the pump was higher than needed for normal operation. Steam quality in the upper plenum “Br 6” was negative. Steam flow rate to the steam line was 0 kg/s; however, because of the high flow rate through the pump, the steam separator “Sep 7” is filled with water, and water flows to the steam line. When the power in the fuel bundles increases to the nominal, the flow rate through the pump starts decreasing. This is because the water in the fuel bundles started boiling (steam quality in the upper plenum becomes positive), steam started going to the separator and dryers. Generated steam increases the form losses of the system. Later, the system intended to achieve normal operation conditions, but oscillations in the flow rate through the pump occurred. However, those oscillations weakened with the time. After 10,000 s from the start of the calculation, all system parameters reached reasonable stable values, and they are compatible to the real ABWR reactor conditions.

Mass flow rate through the pump and from dryers to the steam line is presented in Fig. 3. Steam quality in the upper plenum of the reactor is presented in Fig. 4. The calculated results coincide with the values described in the commissioning document of TEPCO.

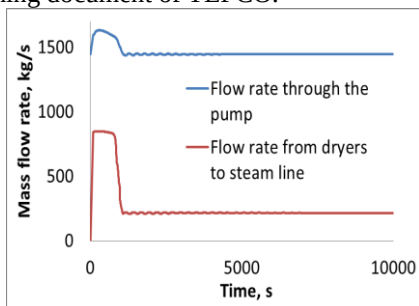


Fig. 3. Mass flow rate through the pump and from dryers to the steam line

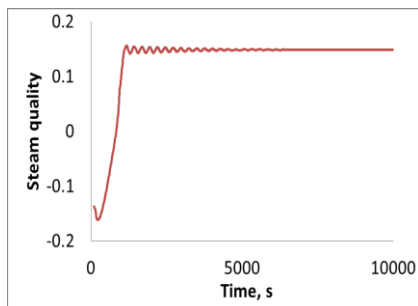


Fig. 4. Steam quality in the upper plenum of the reactor

Calculation of SBO accident. SBO accident was initiated when steady state conditions for the normal operation parameters were achieved (10,000 s after the beginning of calculations).

- The station blackout accident scenario is presented below:

- 10,000 s – start of SBO accident. RIP is tripped. The pump rotation speed starts decreasing.
- 10,002 s – SCRAM occurred. 2 s are necessary in order to achieve the full SCRAM conditions.
- 10,050 s – RIP completely stopped.
- RCIC system starts when water level in downcomer decreases below L-2. L-2 is 2.43 m of water above the Top of Active Fuel (TAF).
- When the water level in downcomer decreases below L-1.5 (0.978 m above TAF), MSIV closes. Pressure in the reactor vessel is controlled by SRV valves. If there is no water in CSP, the RCIC system takes water from S/P.

After SBO accident, the reactor is SCRAMed during 2 s; however, the heat is still extracted from the reactor because of the decay heat. The decay heat in the reactor core versus time is presented in Fig. 5.

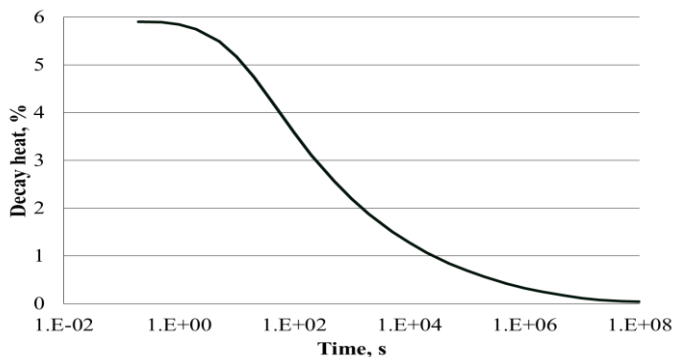


Fig. 5. Decay heat in the reactor core after the SCRAM [4]

Steam generated in reactor core is separated and flows through the steam line. This steam is directed through the turbine bypass line and condensed in the condensation pool near turbines. Water level in the reactor starts decreasing. When the water level decreases below L-2 level, RCIC system is activated. This system injects water into the reactor from CSP. RCIC system stops when the water reaches L-4 water level (4 m above TAF). First RCIC activation occurs in ~2 h after the accident. According to the RCIC system specification, the mission time of RCIC turbine is 24 h (used in Probabilistic Risk Assessment) [5]. However, a similar system in Fukushima Daiichi No. 2 power plant was in operation for ~3 days [6]. In this analysis, the theoretical maximal operating time of RCIC system was analyzed. The boiling temperature in S/P was assumed as the criterion of failure of RCIC system.

RCIC system works continuously until CSP becomes empty (~ 23.9 h after the accident), and water injection is terminated. Later, water in the reactor continuously decreases until L-1.5 level (~ 25.8 h after the accident). After reaching this level, MSIV valves are closed and RCIC system is activated. At this time, RCIC injects water into the reactor from S/P. Water level in downcomer is presented in Fig. 6.

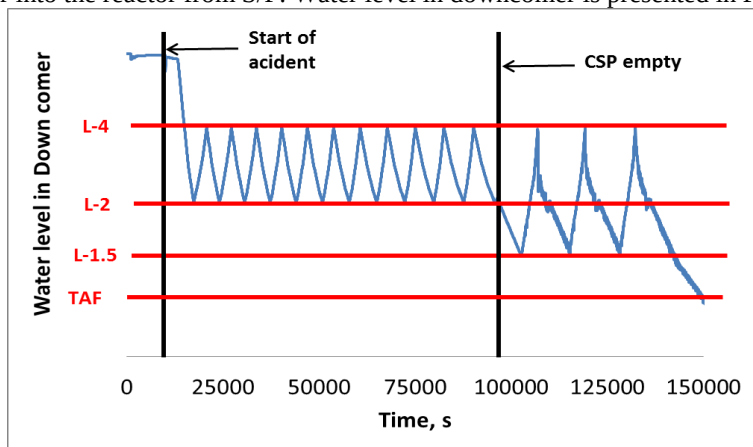


Fig. 6. Water level in downcomer

When the MSIV valves are closed, the pressure in the reactor vessel is increasing. In ABWR reactor, pressure in the reactor vessel is controlled by SRV valves. Steam released from SRV valves is condensed in S/P. Because of that, temperature in S/P starts increasing. When the temperature reaches boiling temperature, RCIC system cannot be operated. RCIC pump will be damaged because of cavitation. The boiling temperature in S/P is reached in ~ 34.7 h after the accident. Water level starts to continuously decrease (RCIC system is lost, no water injection in core). Reactor water level reaches the top of active fuel in ~ 38 h after the accident. After this time, the fuel bundles can be heated up and cause a severe accident. The entire active zone will be uncovered in ~ 45 h after the accident.

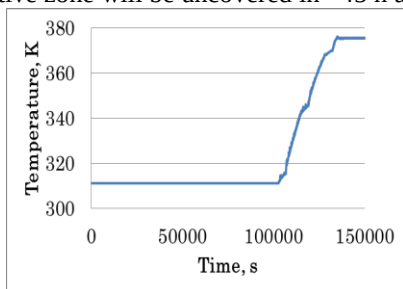


Fig. 7. Temperature increase in S/P

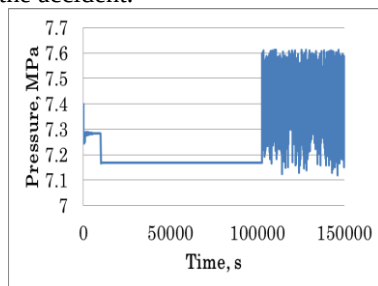


Fig. 8. Pressure in steam dome

Calculation results of this SBO accident scenario shows that ABWR reactor could be safely maintained up to ~38 h. After this time, if immediate counter measures are not taken for injecting water into the reactor, the severe accident may occur.

Conclusions

1. 1/10 ABWR model was developed using RELAP5 code. A steady state condition of the calculation was achieved after 10,000 s from the beginning of the calculation. At this time, SBO accident was initiated.
2. In the considered scenario for SBO accident, the boiling temperature in S/P was assumed for the criterion of failure of RCIC system. Calculation results showed that boiling temperature in S/P is reached in ~34.7 h after the accident. However, a similar system in Fukushima Daiichi No. 2 power plant operated for ~3 days (68 h and 44 min.). So RCIC pump was also working on cavitation conditions, until the fatal system failure.
3. Calculation results of the considered scenario showed that ABWR reactor could be safely maintained up to ~38 h after the SBO accident (until the water level reaches the top of the active fuel). After this time, if will be no immediate counter measures for increasing water level in reactor, the severe accident may occur.

Literature

1. WENRA, "Stress tests" specifications, Proposal by the WENRA Task force, April 2011.
2. Tokyo Electric Power Company (TEPCO), 2010. Nuclear Reactor Installation License Application, 2010, (in Japanese).
3. HITACHI GE, UKABWR Generic Design Assessment, ABWR General Description, GA91-9901-0032-00001, 2014.
4. ANS, 1973. ANS-5.1 1973 Decay Energy Release Rates Following Shutdown of Uranium-Fueled Thermal Reactors, Draft ANS-5.1 / N18.6, October 1973.
5. NRC, 1993. Reliability Study: Reactor Core Isolation Cooling System, 1987-1993, NEREG/CR-5500, Volume 7.
6. Yamazaki, M., 2012. Investigation Report of Fukushima Nuclear Power plant, Tokyo Electric Power Company (TEPCO), (in Japanese).

Acknowledgements

This study has been carried out during the fellowship training supported by Wakasawan Research Energy Center in RINE, University of Fukui. The authors wish to express gratitude to the above organizations. Authors would like to acknowledge Assoc. Prof. W.F.G. van Rooijen in RINE for his considerable advice.

Visiško elektros energijos savo reikmėms netekimo avarijos tyrimas ABWR tipo reaktoriuje

Santrauka

Visiškas elektros energijos savo reikmėms netekimas – tai avarija, kurios metu neapibrėžtą laiko tarpą netenkama reaktoriaus aušinimo šaltinio (netenkama elektros energijos savo reikmėms ir negalimas avarinis elektros tiekimas iš dyzelių generatorių). Tokia avarija yra labai pavojinga verdančio vandens reaktoriams. Visiška elektros energijos savo reikmėms netekimo avarija įvyko Fukushima-Daiichi branduolinėje elektrinėje. Šio straipsnio tikslas išnagrinėti elektros šaltinio netekimo avariją ABWR tipo reaktoriuje. Šiuo tikslu sudarytas ABWR reaktoriaus modelis, skirtas RELAP5 programų paketui. Sudarytas modelis atspindi 1/10 viso reaktoriaus. Taikant sudarytą modelį, buvo sumodeliuoti procesai, vykstantys normalios eksploatacijos metu ABWR reaktoriuje. Nors parametrų reikšmės skaičiavimų pradžioje variavo dėl įvairių modeliavimo ypatumų, tačiau praėjus 10000 s nuo skaičiavimo pradžios, reikšmės nusistovėjo. Tuo metu buvo inicijuota visiška elektros energijos savo reikmėms netekimo avarija.

Skaičiavimo rezultatai parodė, kad esant elektros šaltinio netekimo avarijai, ABWR reaktorių galima saugiai eksploatuoti iki ~38 valandų. Vėliau, jei nebus imtasi skubių ir efektyvių priemonių, kad ataušinti reaktorių, gali būti pažeista reaktoriaus aktyvioji zona ir prasidėti sunki avarija.

Radiologinio užteršimo vertinimas RBMK-1500 reaktoriaus kontrolės ir apsaugos kanaluose

Gintautas Poškas

Kauno technologijos universitetas, Lietuvos energetikos institutas

Ivyadas. Ignalinos atominė elektrinė (IAE) 2009 m. gruodžio 31 dieną visiškai nutraukė elektros energijos gamybą. Tuomet IAE pagrindine veikla tapo jos eksploatacijos nutraukimo procesas. Šio proceso optimaliai eigai užtikrinti būtini bent preliminarūs duomenys apie eksploatacijos nutraukimo metu susidarysiančių radioaktyviųjų atliekų kiekį, radioaktyvumo lygį, nuklidinę sudėtį ir kt. Dėl aušinimui naudojamo vandens cirkuliacijos, reaktoriaus sistemose vyksta radioaktyviųjų dalelių pernaša ir nusėdimas ant sistemų komponentų paviršių. Pats vanduo yra užteršiamas dėl korozijos ir aktyvacijos procesų, taip pat kuro apvalkų defektų.

Šiame straipsnyje pateikiami IAE 1-ojo RBMK-1500 bloko kontrolės ir apsaugos kanalų (KAK) įrangos užterštumo modeliavimo rezultatai. Modeliuota programų paketu LLWAA-DECOM (Tractebel Energy Engineering, Belgija), įvertinant informaciją apie KAK komponentų charakteristikas, kanaluose tekančio vandens parametrus, sistemos darbo režimus ir kt. Modeliavimo metu gauti rezultatai apie KAK komponentų nuosėdų bendrą aktyvumą reaktoriaus galutinio sustabdymo metu, bei labiausiai užteršto komponento nuosėdų aktyvumo, dozės galios ir nuklidinės sudėties kitimą laike.

Metodika. Kontrolės ir apsaugos sistema užtikrina reaktoriaus kontrolę ir galios reguliavimą, bei automatinį reaktoriaus stabdymą, kai reaktoriaus darbo režimo parametrai peržengia numatytas ribas, užtikrinančias reaktoriaus saugų darbą [1]. KAK aušinimas, bei darbinių temperatūrų palaikymas skirtinguose kanaluose užtikrinamas gravitacinių jėgų dėka. Modeliavimui naudotų pagrindinių KAK komponentų sąrašas pateiktas 1 lentelėje.

1 lentelė. Pagrindiniai KAK komponentai

Komponento pavadinimas	Žymėjimas	Komponento pavadinimas	Žymėjimas
Slėginiai vamzdžiai į reflektoriaus aušinimo kanalus	KAK-1	Avarinio stabdymo kanalas reaktoriaus branduolyje	KAK-9
Slėginiai vamzdžiai į avarinio stabdymo kanalus	KAK-2	Avarinio stabdymo kanalas žemiau reaktoriaus branduolio	KAK-10
Slėginiai vamzdžiai į kontrolės ir valdymo kanalus	KAK-3	Vamzdžiai iš reflektoriaus aušinimo kanalų	KAK-11
Reflektoriaus aušinimo kanalas	KAK-4	Nubėgimo vamzdžiai iš kontrolės ir valdymo kanalų	KAK-12
Kontrolės ir valdymo kanalas virš reaktoriaus branduolio	KAK-5	Nubėgimo kolektorius iš kontrolės ir valdymo kanalų	KAK-13
Kontrolės ir valdymo kanalas reaktoriaus branduolyje	KAK-6	Nubėgimo vamzdžiai iš avarinio stabdymo kanalų	KAK-14

Komponento pavadinimas	Žymėjimas	Komponento pavadinimas	Žymėjimas
Kontrolės ir valdymo kanalas žemiau reaktoriaus branduolio	KAK-7	Nubėgimo kolektorius iš avarinio stabdymo kanalų	KAK-15
Avarinio stabdymo kanalas virš reaktoriaus branduolio	KAK-8		

Modeliuojant reaktoriaus sistemų radioaktyvųjį užterštumą, reikia įvertinti nemažai sudėtingų taršos dalelių susiformavimo, jų pernešimo bei atpalaidavimo procesų ir atsižvelgti į jų tarpusavio sąveiką. Fundamentiniu pernašos uždavinių formulavimo atveju susiduriama su sudėtingais matematiniais modeliais ir daug skaičiavimo resursų reikalaujančiais jų skaitinio sprendimo algoritmais. Todėl vertinant radioaktyvųjį užterštumą reaktorių sistemose, yra daromi supaprastinimai, t. y. naudojami empiriniai ir pusiau empiriniai modeliai ir programos (PACTOLE [2], CRUDTRAN [3], ACE-II [4] ir kt.). Paprastai šie ir panašūs modeliai ir programos yra specialiai pritaikomi konkrečiam reaktoriaus tipui [5].

Modeliuojant KAK įrangos radioaktyvųjį užterštumą buvo naudojamas programų paketas LLWAA-DECOM (Tractebel Energy Engineering, Belgija). LLWAA-DECOM verifikavimo rezultatai pateikti [6]. Modeliavimui reikalingi įvesties duomenys apie:

- Sistemos darbo charakteristikas (darbo ciklų skaičių, darbo ciklo trukmę);
- Cirkuliuojančio vandens parametrus (vandens pH, temperatūrą, vidutinį greitį, tūrinį aktyvumą).
- Taršos dalelių charakteristikas (tankį, skersmenį, tirpumą);
- Sistemos komponentų konstrukcinius parametrus (konstrukcines medžiagas, komponento geometrinius matmenis, sienučių šiurkštumą) ir kt.

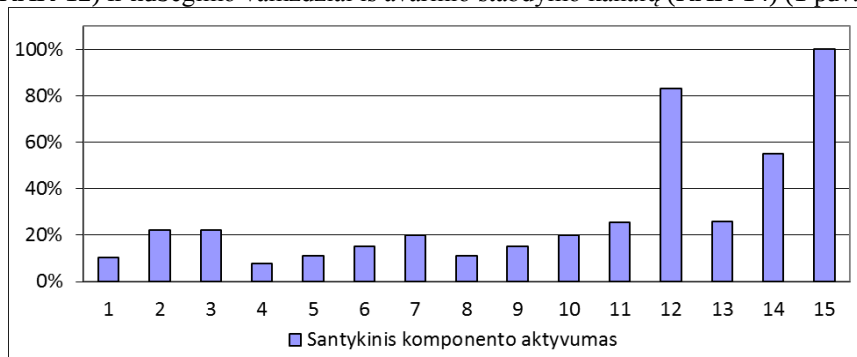
Ant sistemos komponento sienutės esančių nuklidų aktyvumo kitimas aprašomas lygtimi (1) [6]:

$$\frac{dW_i}{dt} = K_d * C_{v_i} * (1 - frspr_i) - W_i * (K_r + \lambda_i) \quad (1)$$

čia: W_i – i-tojo nuklido, esančio ant sienutės, paviršinis aktyvumas, Bq/m²; K_d – dalelių nusėdimo greitis, m/s; C_{v_i} – tūrinis i-tojo nuklido aktyvumas sraute, Bq/m³; $frspr_i$ – i-tojo nuklido tirpioji dalis cirkuliuojančiame agente; K_r – dalelių atpalaidavimo koeficientas, s⁻¹; λ_i – i-tojo nuklido skilimo konstanta, s⁻¹; t – laikas, s. Nusėdimo ir atpalaidavimo koeficientai (K_d , K_r) priklauso nuo srauto charakteristikų (tekėjimo greičio, temperatūros, Reinoldso skaičiaus ir kt.), sistemos įrangos charakteristikų (geometrijos, vidinių sienučių šiurkštumo, trinties koeficiento) bei radioaktyviųjų dalelių charakteristikų (dalelių tankio sraute, skersmens).

Rezultatai. KAK komponentų užterštumo modeliavimo rezultatų analizė parodė, kad labiausiai užteršti komponentai yra: nubėgimo kolektorius iš avarinio

stabdymo kanalų (KAK-15), nubėgimo vamzdžiai iš kontrolės ir valdymo kanalų (KAK-12) ir nubėgimo vamzdžiai iš avarinio stabdymo kanalų (KAK-14) (1 pav.)



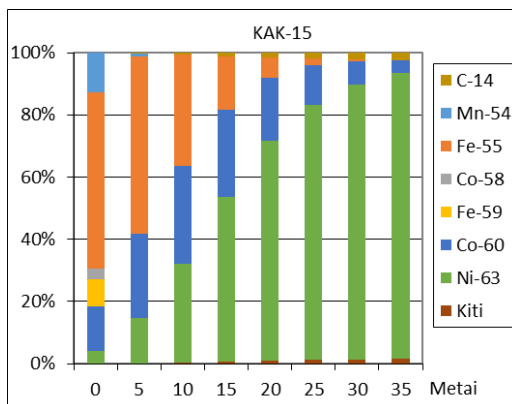
1 pav. KAK komponentų santykinis aktyvumas (KAK-1:15/KAK-15)

Dėl skirtingų sąlygų KAK komponentų užterštumas yra labai nevienodai pasiskirstęs tarp KAK-15, KAK-12, KAK-14 ir kitų KAK komponentų (1 pav.). Šių komponentų užterštumui daugiausiai įtakos turi didesnės vidutinio srauto greičio ir temperatūros vertės (palyginus su kitais KAK komponentais), kadangi šioje sistemoje nėra vandens valymo įrenginių ir tūrinis aktyvumas yra vienodas visiems komponentams. Mažiausiai užteršto komponento (KAK-4) užterštumas yra 7,6 %, palyginus su labiausiai užterštu komponentu (KAK-15).

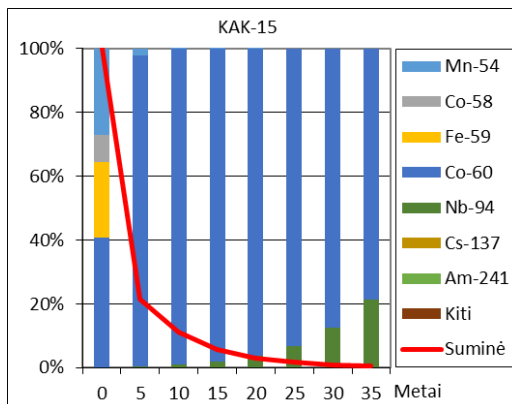
Laikui bėgant, dėl savaiminio skilimo, užterštų komponentų (t. y. ant paviršiaus esančių nuosėdų) nuklidinė sudėtis kinta. Paveiksle 2 pavaizduota labiausiai užteršto KAK komponento (KAK-15) ant sienučių esančių nuosėdų nuklidinės sudėties kitimas laike. Kaip matyti, korozijos produktų radionuklidai labiausiai prisideda prie komponento užterštumo. Iškart po galutinio reaktoriaus sustabdymo, Fe-55, Co-60 ir Mn-54 nuklidai labiausiai lemia KAK-15 užterštumą. Po 35 metų laikotarpio KAK-15 komponentų užterštumą labiausiai lemia ilgaaamžis nuklidas Ni-63, nes per trumpą laiką suskyla trumpaaamžiai nuklidai (Fe-55, Fe-59, Co-58, Co-60, Mn-54). Kitų ilgaaamžių nuklidų įtaka bendram užterštumui taip pat išauga, nes jų aktyvumai praktiškai nepakinta per tokį laiką.

Vykdam užterštos įrangos išmontavimo darbus svarbiausi yra nuklidai, lemiantys užterštų komponentų skleidžiamą γ spinduliuotę. KAK-15 komponento nuosėdų nuklidų įtakos skleidžiamai suminei dozės galiai kitimas laike pavaizduotas 3 pav. Iškart po galutinio reaktoriaus sustabdymo, γ spinduliuote labiausiai lemia Co-60, Fe-59, Mn-54 ir Co-58 radionuklidai, bet praėjus 5 metams po sustabdymo – daugiausia Co-60. Praėjus kelioms dešimtims metų nuo reaktoriaus eksploatacijos nutraukimo tampa ryški nuklido Nb-94 įtaka skleidžiamai γ spinduliuotei, o Co-60 indėlis į bendrą skleidžiamą γ spinduliuotę ilgainiui mažėja. Nors ilgainiui Ni-63 nuosėdų aktyvumui turi daugiausia įtakos, tačiau jis yra silpnas β -

spinduolis ir jo skilimo produktas yra Cu-63 nesužadintos būsenos. Todėl Ni-63 skilimas nelydimas γ spinduliuotės emisijos, taigi ir kontaktinei dozei jis įtakos praktiškai neturi.



2 pav. Komponento KAK-15 nuosėdų aktyvumo kitimas laike (kiti < 1 %)



3 pav. Komponento KAK-15 nuosėdų nuklidų įtakos skleidžiamai suminei dozės galiai kitimas laike (kiti < 1 %)

Kaip matyti iš 3 pav., praėjus 5 metams nuo reaktoriaus galutinio sustabdymo, dozės galia žymiai sumažėja (~ 80 %). Taip atsitinka dėl trumpaamžių nuklidų Fe-59, Co-58, Mn-54 savaiminio skilimo. KAK išmontavimo darbai nebus pradėti iškart po bloko sustabdymo, todėl toks žymus dozės galios sumažėjimas leis atlikti išmontavimo ir radioaktyviųjų atliekų tvarkymo darbus su mažesne darbuotojų apšvita.

Išvados

Atlikus RBMK-1500 reaktoriaus kontrolės ir apsaugos kanalų (KAK) komponentų užterštumo radiologinį įvertinimą bei užterštumo kitimo laikui bėgant analizę, galima daryti šias išvadas:

1. Komponentų užterštumas yra labai nevienodai pasiskirstęs tarp KAK-15, KAK-12, KAK-14 ir kitų KAK komponentų. Šių komponentų užterštumui daugiausia įtakos turi didesnės vidutinio srauto greičio ir temperatūros vertės, palyginus su kitais KAK komponentais.
2. Iškart po galutinio reaktoriaus sustabdymo, korozijos produktų radionuklidai Fe-55, Co-60 ir Mn-54 labiausiai lemia KAK-15 užterštumą. Po 35 metų laikotarpio, KAK-15 komponentų užterštumą labiausiai lemia ilgaamžis nuklidas Ni-63, nes per trumpą laiką suskyla trumpaamžiai nuklidai. Kitų ilgaamžių nuklidų įtaka bendram užterštumui taip pat išauga, nes jų aktyvumai praktiškai nepakinta per tokį laiką.
3. Iškart po galutinio reaktoriaus sustabdymo, γ spinduliuotę labiausiai lemia Co-60, Fe-59, Mn-54 ir Co-58 radionuklidai, bet praėjus 5 metams po sustabdymo – Co-60. Praėjus 5 metams nuo reaktoriaus galutinio sustabdymo, suminė dozės galia sumažėja apie 80 %.

Literatūra

1. K. Almenas, A. Kaliatka, E. Uspuras. Ignalina RBMK-1500. A source book. Ignalina Safety Analysis Group, 1998, 200 p.
2. Beslu P. A computer code PACTOLE to predict activation corrosion products in PWRs. In Proceedings of the International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, Bournemouth. British Nuclear Energy Society, London. 1978.
3. LEE C. B. Modeling of Corrosion Product Transport in PWR Primary System, Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts. 1990.
4. Burrill A. K., Menut P. A description of the activity transport computer codes in the IAEA benchmarking exercise. Water chemistry of nuclear reactor systems 8. Bournemouth, UK. 2000. Volume 1.
5. Edited by M. LARAIA. Nuclear decommissioning: Planning, execution and international experience. Woodhead Publishing Series in Energy. 2012. No. 36, pp. 824.
6. 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.

Radiological contamination modelling of RBMK-1500 control and protection channels

Summary

The article presents results of modelling and analysis of component contamination of the RBMK-1500 reactor Control and Protection Channels (CPC) at Ignalina NPP Unit 1. The modelling was performed using a computer code LLWAA-DECOM (Tractebel Energy Engineering, Belgium), taking into consideration CPC components characteristics, parameters of the water flowing in the circuits, system work regimes, etc. During the modelling, results on activity of CPC components' deposits, nuclide composition of the deposits and dose rates after the final shutdown of the reactor, as well as activity decay of the most contaminated CPC components' deposits were obtained.

Analysis showed that there is a significant difference in contamination levels between CPC components. The rundown header from the channels of the reactor's fast acting scram system is the most contaminated component, and contamination of the least contaminated component is only 7.6% compared to the activity of the most contaminated component. Corrosion nuclides are the nuclides that mostly contribute to contamination of the CPC deposits.

Naujos konstrukcijos ABWR kuro rinklės skaitinis tyrimas

Liutauras Vasiliauskas, Linas Paukštaitis
 Kauno technologijos universitetas

Įvadas. Didėjant energijos poreikiams pasaulyje ir siekiant sumažinti šiltnamio efektą, vis daugiau dėmesio tenka atominei energetikai, ir dėl to įvairiais būdais stengiamasi padidinti jėgainių našumą ir saugumą. Vienas iš būdų yra branduolinio kuro rinklių konstrukcijų modifikavimas, siekiant gauti geresnes termohidraulines charakteristikas. Esminė kuro rinklės konstrukcijos komponentė yra distancinė gardelė, ji ne tik atlieka kuro strypų sutvirtinimo funkciją, bet ir gali pagerinti termohidraulinių procesų charakteristikas kuro kanale.

Tyrimo metodika. Šiame darbe atliktas trijų modifikuotų distancinių gardelių įtakos termohidrauliniams procesams kuro kanalo dalyje skaitinis tyrimas, naudojant ANSYS CFX 14.0 programinį paketą. Daugiausiai dėmesio buvo skiriama distancinių gardelių gebėjimui išmaišyti šilumnešio srautą, taip suaktyvinant energijos ir masės mainus kanale, bei pagerinant konvekcinių šilumos mainų charakteristikas. Taip pat buvo atsižvelgiama į kanalo slėgio nuostolius, kuriuos papildomai sukuria modifikuotos konstrukcijos. Išanalizavus gautus rezultatus ir palyginus juos su atskaitos modeliu, buvo nustatyta optimaliausia distancinės gardelės konstrukcija ir pateiktos atitinkamos išvados.

Modifikuotos konstrukcijos buvo projektuojamos SolidWorks programiniame pakete, pagal distancinės gardelės be maišymo elementų modelį, papildomai nubraižant trijų tipų sraigtnius maišymo elementus. Geometriniai sraigtų konstrukcijų parametrai pateikti 1 lentelėje. Atskaitos modelio ir modifikuotų konstrukcijų vaizdai pateikti 1 pav.

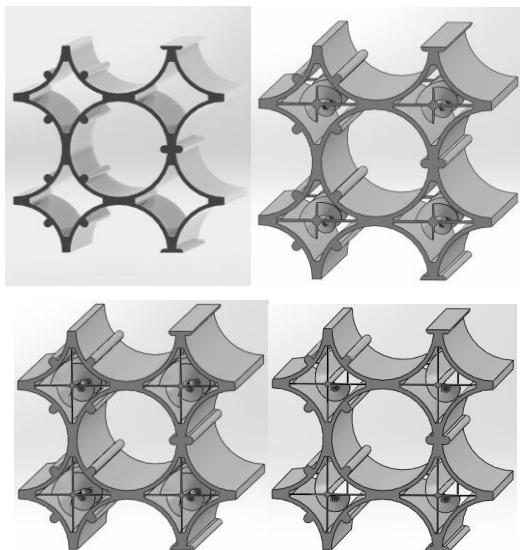
1 lentelė. Geometriniai sraigtų konstrukcijų parametrai

	1-ojo tipo sraigtas	2-ojo tipo sraigtas	3-ojo tipo sraigtas
Sraigto ilgis, mm	31	31	31
Sraigto eigų skaičius	4	4	1
Sraigto šerdies skersmuo, mm	1,0	0,64	0,64
Spiralės sienelės storis, mm	0,1	0,1	0,1
Spiralės išnešimo ilgis nuo šerdies, mm	1,75	2,28	2,28

Norint gauti kuo realesnius rezultatus, būtina sukurti kaip įmanoma geresnį ir tikslesnį baigtinių tūrių tinklėlį. Dėl šios priežasties nuspręsta tirti skirtingų pozicijų distancinių gardelių regionus, padalintus į 170 mm ilgio kuro rinklės pjūvius. Šis pjūvis atitinka 20 hidraulinių diametrų atstumą iki distancinės gardelės ir 40 hidraulinių diametrų atstumą, srautui pratekėjus ją. Taip pat yra svarbu tinkamai aprašyti kraštines sąlygas. Atliekant skaitinį kuro rinklės termohidraulinių procesų modeliavimą, buvo priimtos tokios kraštines sąlygos:

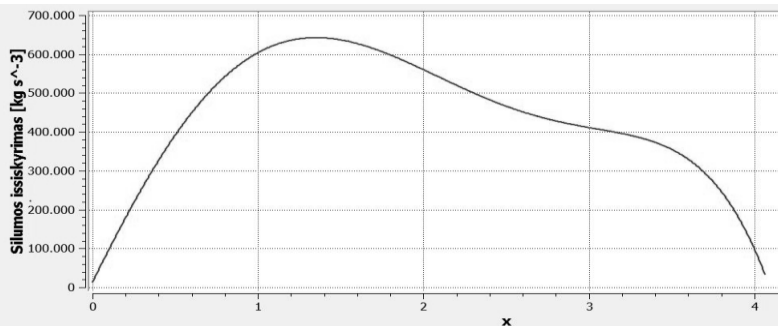
- Šilumnešio temperatūra įėjime: 278,33°C;
- Šilumnešio slėgis įėjime: 7,17 MPa;
- Šilumnešio debitas įėjime: 0,6899 kg/s;
- Vandens masinė dalis įėjime: 1;
- Turbulencijos intensyvumas įėjime: 5 proc;
- Turbulencijos modelis: k-Epsilon;
- Fluido tekėjimo modelis: homogeninis.

Aprašant šilumos srautą kuro rinklėje, buvo naudojami Hitachi pateikti eksploataciniai duomenys [1]. Pagal šiuos duomenis Microsoft Excel aplinkoje, panaudojus polinominės krypties linijos funkciją, buvo gauta šešto lygio polinominė lygtis (žr. 1 lygtį), aprašanti ašinį galios kitimą. Ši lygtis buvo įkelta į ANSYS CFX programinį paketą ir ją tinkamai sutvarkius, gauta ašinio šilumos srauto tankio pasiskirstymo kreivė (žr. 2 pav.).



1 pav. Tirtų distancinių gardelių konstrukcijos. Viršuje kairėje – atskaitos modelis, viršuje dešinėje – distancinė gardelė su 1-ojo tipo sraigtais, apačioje kairėje – distancinė gardelė su 2-ojo tipo sraigtais, apačioje dešinėje – distancinė gardelė su 3-ojo tipo sraigtais

$$y = -5,46 \cdot 10^{-22} \cdot x^6 - 1,58 \cdot 10^{-16} \cdot x^5 + 1,37 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 - 3,29 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 - 5,47 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 8,69 \cdot 10^{-3} \cdot x + 1,46 \cdot 10^{-1} \quad (1)$$

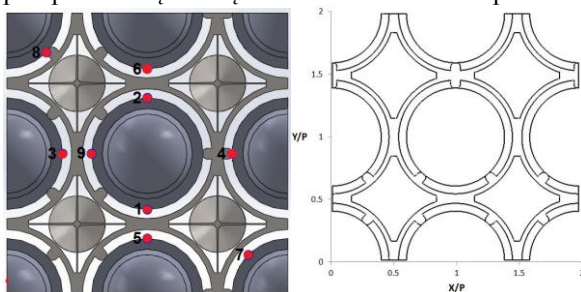


2 pav. Ašinis šilumos srauto tankio pasiskirstymas kuro rinklėje

Taip pat buvo naudojamas „Buoyancy“ modelis, kuriame pagreitis ašine kryptimi buvo nustatytas reikšmei, lygiai neigiamam laisvojo kritimo pagreičiui – g. Atskaitomasis šio modelio tankis buvo nustatytas reikšmei, lygiai $37,52 \text{ kg/m}^3$.

Siekiant kaip įmanoma tiksliau nustatyti kiekvienos konstrukcijos šilumos atidavimo koeficiento kitimą, buvo pasirinkta tirti devynis charakteringus taškus prie kuro strypų paviršiaus, kurie pavaizduoti 3 pav. Per šiuos charakteringus taškus buvo išvestos ašinės linijos per visą tiriamos zonos aukštį ir jose skaičiuotos vidutinės šilumos atidavimo koeficiento reikšmės.

Termohidrauliniai procesai kuro rinklėje buvo tiriami tiek visame aukštyje, tiek skersai tarp tarpkanalinių erdvių. Skersinės koordinatės pavaizduotos 3 pav.

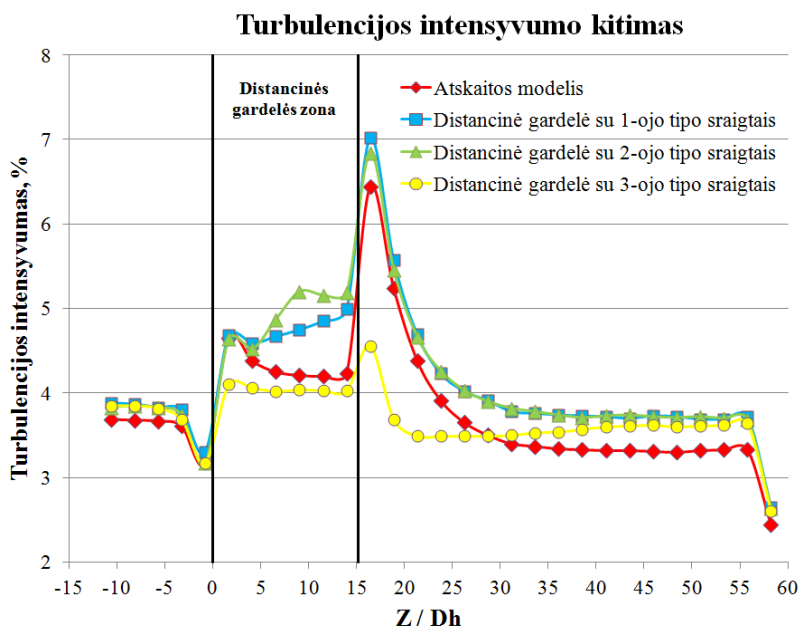


3 pav. Charakteringi šilumos atidavimo koeficiento tyrimo taškai (kairėje) ir skersinių termohidraulinių procesų distancinėje gardelėje tyrimų koordinatės (dešinėje)

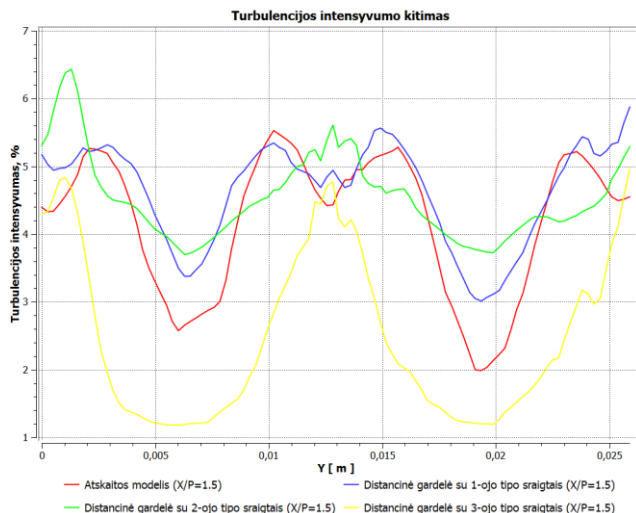
Rezultatai ir jų aptarimas. 4 pav. pavaizduotas skirtingų distancinių gardelių konstrukcijų vidutinis ašinis turbulencijos intensyvumo (žr. 2 formulę) kitimas. Iš grafiko matome, kad prieš distancinę gardelę turbulencijos intensyvumas visose konstrukcijose staiga sumažėja, kadangi srautas išsilygina. Srautui įtekėjus į distancinę gardelę, turbulencijos intensyvumas padidėja ir konstrukcijose su 1-ojo ir 2-ojo tipo sraigtais išsilaiko didžiausias. Srautui ištekęs iš distancinės gardelės

zonos, turbulencijos intensyvumas pasiekia piko reikšmę apie 6–7 proc. atskaitos modelio, su 1-ojo ir 2-ojo tipo sraigtais konstrukcijose, ir apie 4,5 proc. su 3-ojo tipo sraigtais, toliau turbulencijos intensyvumas po truputį mažėja ir maždaug po 15 hidraulinių diametrų atstumo pasiekia stabilią reikšmę. Konstrukcijoje su 3-ojo tipo sraigtais turbulencijos intensyvumas nusistovi po maždaug 5 hidraulinių diametrų, ir po to dėl trinties su kuro strypų paviršiumi, palengva didėja. Visame tiriamame aukštyje konstrukcijos su 1-ojo ir 2-ojo tipo sraigtais sukuria didžiausią turbulencijos intensyvumą kanale, kuris maždaug 0,4 proc. didesnis nei atskaitos modelio.

$$T_u = \sqrt{\frac{2k}{3v^2}} \quad (2)$$



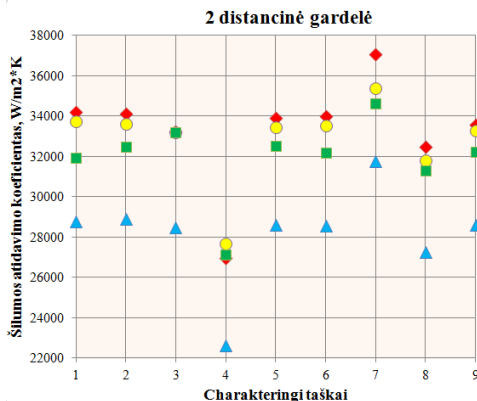
4 pav. Vidutinis ašinis turbulencijos intensyvumo kitimas 4-os pozicijos distancinės gardelės regione



5 pav. Skersinis turbulencijos intensyvumo pasiskirstymas tarpkanalinėje zonoje (kai $X/P = 1,5$), srautui pratekėjus 4 hidraulinius diametrus nuo distancinės gardelės

Iš 5 pav. matyti, kad didžiausi turbulencijos intensyvumai yra tarpuose tarp kuro strypų – taip yra dėl trinties su paviršiumi. Centrinėse tarpkanalinės erdvės zonose pasiekiami turbulencijos intensyvumo minimumai, kadangi šioje vietoje srautas mažiausiai kontaktuoja su paviršiumi. Srautui pratekėjus 4 hidraulinius diametrus nuo distancinės gardelės, turbulencijos intensyvumo maksimumai siekia apie 4,5–5,5 proc. Atskaitos modelio turbulencijos intensyvumo minimumai siekia 2–2,7 proc., o konstrukcijų su 1-ojo ir 2-ojo tipo sraigtais minimalios turbulencijos intensyvumo reikšmės yra gerokai aukštesnės ir lygios 3–3,8 proc. Tai parodo keturių eigų sraigtų gebėjimą išmaišyti srautą taip, kad turbulencijos intensyvumas pasiskirsto po visą tarpkanalinę erdvę ir yra gerokai didesnis, palyginti su atskaitos modeliu be maišymo elementų. Mažiausias turbulencijos intensyvumas tiriamoje tarpkanalinės erdvės zonoje sukuriama konstrukcijos su 3-ojo tipo sraigtais, greičiausiai tam įtakos turi tai, kad šio tipo sraigtas yra vienos eigos ir nukreipia srautą tik į vieną pusę, taip stabdydamas srauto tekėjimą ir maišymąsi.

6 pav. pavaizduotas vietinių šilumos atidavimo koeficiento reikšmių kitimas charakteringuose taškuose, 2-os pozicijos distancinėje gardelėje. Paveikslėlis puikiai iliustruoja, kad distancinės gardelės su 1-ojo tipo sraigtais labiausiai padidina vietinį šilumos atidavimo koeficientą charakteringuose taškuose. Tai reiškia, kad būtent šiuose taškuose yra sumažinama kritinio šilumos srauto tankio susidarymo galimybė, nes šilumnešio srautas sugeba geriau nuvesti šilumą nuo kuro strypų paviršiaus.



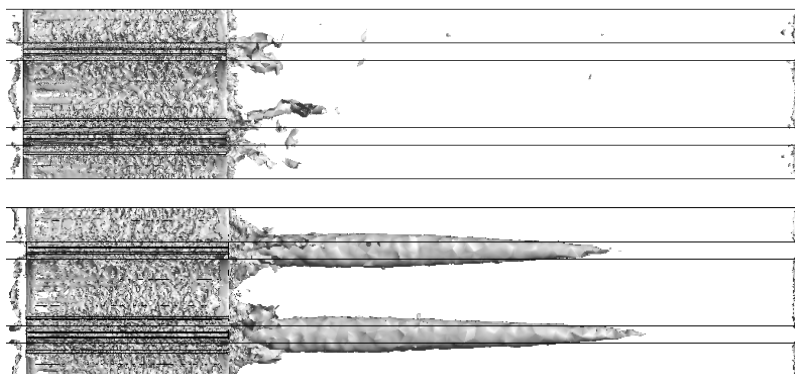
6 pav. Vietinių šilumos atidavimo koeficientų reikšmės charakteringuose taškuose, esant skirtingoms konstrukcijoms. Mėlyni trikampiai – atskaitos modelis, raudoni rombai – distancinė gardelė su 1-ojo tipo sraigtais, geltoni apskritimai – distancinė gardelė su 2-ojo tipo sraigtais, žali kvadratai – distancinė gardelė su 3-ojo tipo sraigtais

Iš 2 lentelės matyti, kad didžiausią šilumos atidavimo koeficiento pagerinimo efektą charakteringuose taškuose sukuria distancinė gardelė su 1-ojo tipo sraigtais. Ši konstrukcija pagerina vietinį šilumos atidavimo koeficientą net 16,02 proc., o konstrukcijos su 2-ojo ir 3-ojo tipo sraigtais atitinkamai 14,70 ir 11,22 proc. Bendrą vidutinį šilumos atidavimo koeficientą tirtose distancinių gardelių zonose ant kuro elementų paviršiaus labiausiai pagerina konstrukcija su 2-ojo tipo sraigtais – 21,02 proc., tačiau konstrukcija su 1-ojo tipo sraigtais atsilieka labai nedaug ir pagerinimas lygus 20,91 proc. Mažiausią pagerinimo efektą sukuria distancinė gardelė su 3-ojo tipo vienos eigos sraigtais. Didžiausius slėgio nuostolius kanale sukuria distancinė gardelė su 2-ojo tipo sraigtais, ir slėgio nuostoliai, palyginti su atskaitos modeliu, išauga net 57,17 proc. Konstrukcijos su 1-ojo ir 3-ojo tipo sraigtais slėgio nuostolius padidina atitinkamai 47,74 ir 42,53 proc. Reikia paminėti, kad bendras slėgio nuostolių padidėjimas per visą kuro rinklės aukštį nebus toks didelis, kadangi šie slėgio nuostoliai buvo gauti būtent distancinių gardelių regionuose – ten, kur jie yra didžiausi. Taigi, apibendrinę lentelės duomenis galime daryti išvadą, kad optimaliausia distancinės gardelės konstrukcija yra su 1-ojo tipo sraigtais, kadangi ji labiausiai pagerina vietinį šilumos atidavimo koeficiento padidėjimą, taip pat bendras padidėjimas ant kuro elementų paviršiaus nedaug atsilieka nuo konstrukcijos su 2-ojo tipo sraigtais, o slėgio nuostoliai gerokai mažesni. 7 pav. pavaizduotas sūkurių susidarymas distancinių gardelių – atskaitos modelio ir su 1-ojo tipo sraigtais, regionuose. Pavaizduoti sūkuriai, kurių stiprumo lygis yra lygus 0,002 arba daugiau. Sūkurių stiprumas yra tangentinio ir ašinio greičių santykis. Matome, kad distancinė gardelė be maišymo elementų nesukuria sūkurių

sraute, o distancinė gardelė su sraigtais juos sukuria. Keturių eigių sraigta sukuria siaurus, koncentruotus sūkurius, o jų intensyvumas priklauso nuo sraigčių užimamo srauto skerspjūvio ploto.

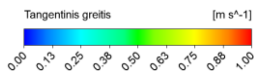
2 lentelė. Šilumos atidavimo koeficiento pokyčiai bei bendri slėgio nuostoliai (visų tirtų zonų) ir slėgio nuostolių pokytis lyginant su atskaitos modeliu

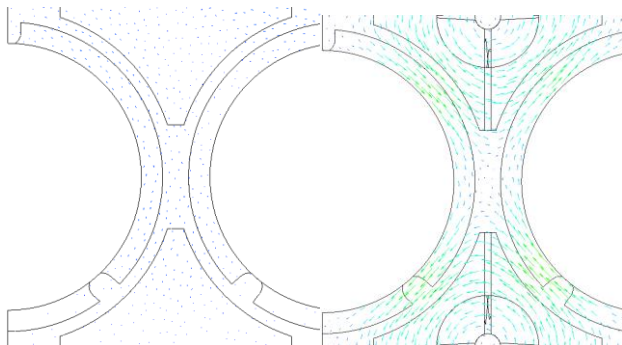
Distancinės gardelės konstrukcija	$\Delta h_{\text{v.iz.}}$ (vietinis)	$\Delta h_{\text{v.iz.}}$ (ant visų kuro elementų paviršiaus)	Δp , Pa	$\Delta p_{\text{v.iz.}}$
Be maišymo elementų	0,00	0,00	30173	0,00
Su 1-ojo tipo sraigtais	16,02	20,91	44578	47,74
Su 2-ojo tipo sraigtais	14,70	21,02	47424	57,17
Su 3-ojo tipo sraigtais	11,22	18,92	43006	42,53



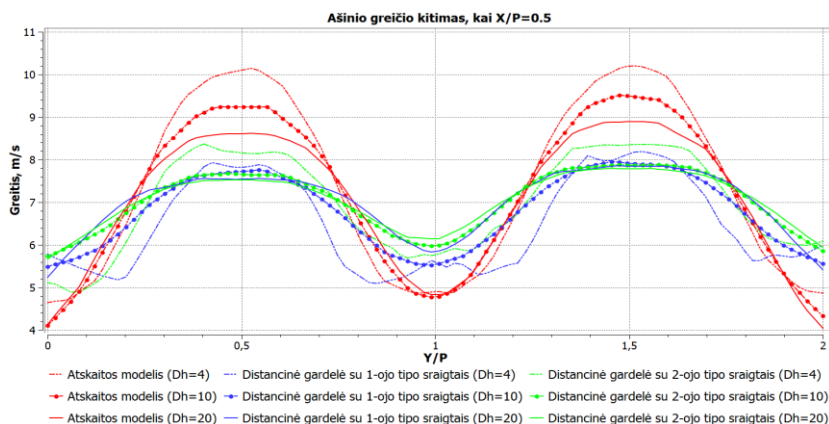
7 pav. Sūkurių susidarymas tiriamoje zonoje. Viršuje – atskaitos modelis, apačioje – distancinė gardelė su 1-ojo tipo sraigtais

8 pav. pavaizduoti tangentinio greičio vektoriai erdvėje tarp dviejų kuro strypų. Iš paveikslėlio matyti, kad srautui pratekėjus 20 hidraulinių diametrų atstumą nuo distancinės gardelės, atskaitos modelio konstrukcijoje skersiniai srautai neegzistuoja, o konstrukcijoje su 1-ojo tipo sraigtais jie vis dar aktyviai vyksta. Tokie skersiniai srautai intensyvina energijos ir masės mainus tarp gretimų tarpkanalinių erdvių, o tai greitina susijusius termohidraulinius procesus. Maišymo sraigčių sukelti skersiniai fluido srautai intensyviai apiplauna kuro strypus, net ir pratekėjus 20 hidraulinių diametrų atstumą nuo distancinės gardelės, ir tokia tendencija išlieka visame tiriamame 170 mm ilgio regione. Šie skersiniai srautai ne tik skatina turbulenciją kanale, bet ir pagerina konvekcinius šilumos mainus tarp kuro strypų ir fluido. Taip pat toks priverstinis kuro strypų apiplovimas atitolina CHF susidarymą kuro rinklėje.





8 pav. Tangentinio greičio vektoriai erdvėje tarp dviejų kuro strypų, srautui pratekėjus 20 hidraulinį diametrų nuo distancinės gardelės. Kairėje – atskaitos modelis, viduryje – gardelė su 1-ojo tipo sraigtais



9 pav. Ašinio greičio kitimas tarpkanalinės erdvės dalyje, kai $X/P = 0.5$, srautui pratekėjus 4, 10 ir 20 hidraulinį diametrų nuo distancinės gardelės

Dėl atskirų fluideo dalelių sukimosi judesio, padidėja vidinė trintis ir srauto tekėjimo greitis centrinėje tarpkanalinės erdvės dalyje šiek tiek sumažėja, palyginti su atskaitos modeliu, tačiau dėl susidariusio sūkuriu padidėja srauto greitis tarpuose tarp kuro strypų (žr. 9 pav.), o tai užtikrina geresnį šilumos nuvedimą nuo jų paviršiaus. Iš 9 pav. matyti, kad atskaitos modelio konstrukcijoje srauto greitis tarpuose tarp kuro strypų tostant nuo distancinės gardelės kinta labai nežymiai, o centrinėje dalyje greitis mažėja. Kuro rinklėse su 1-ojo ir 2-ojo tipo sraigtais, srauto greitis centrinėje dalyje nusistovi, pratekėjus 10 hidraulinį diametrų, o greitis tarpuose tarp kuro strypų didėja, didėjant atstumui nuo gardelės.

Išvados

1. Modifikuotos distancinių gardelių konstrukcijos su sraigtinio tipo maišymo elementais padidina turbulencijos intensyvumą kanale bei dėl sukurtų susidarymo sukuria skersinius fluideo srautus, o tai pagerina šilumnešio maišymąsi ir konvekcinius šilumos mainus kanale.
2. Modifikuotos distancinės gardelės tolygiau paskirsto šilumnešį kanale ir padidina srauto tekėjimo greitį tarpuose tarp kuro strypų, o tai pagerina strypų paviršiaus aušinimą.
3. Nustatyta optimali distancinės gardelės konstrukcija yra su 1-ojo tipo sraigtiniais maišymo elementais. Ši konstrukcija, palyginus su atskaitos modeliu:
 - Padidina šilumos atidavimo koeficientą kanale maždaug 16–21 proc.;
 - Padidina turbulencijos intensyvumą tiriamos zonos išėjime maždaug 0,4 proc.;
 - Padidina suminius slėgio nuostolius tirtose zonose 47,74 proc.;
 - Sukuria intensyvių skersinių fluideo maišymąsi, kuris išlieka visame tiriamos zonos aukštyje;
 - Užtikrina tolygesnį ašinio greičio pasiskirstymą kanale. Greitis tarpuose tarp kuro strypų padidėja maždaug 1–2 m/s, o centrinėse dalyse sumažėja 1 m/s.

Literatūra

1. Tokyo Institute of Technology, Hitachi Ltd., Nuclear Engineering Intensive course 2013, Kaunas University of Technologies, October 14th-18th, 2013, p. 157-180.

CFD simulation of new construction ABWR fuel assembly

Summary

In this paper the focus was on investigating turbulence processes, cross flow effects, heat transfer coefficient variation and pressure drops in fuel channel domains of different modified spacer grids constructions with helix flow mixing devices. After analyzing the results and comparing them to reference model, the most optimal construction was found and appropriate conclusions were made.

3 ŠILUMOS IR MASĖS MAINAI

Biokuro dūmų šilumos utilizavimo specifika ir pernašos procesų rekuperaciniuose kondensaciniuose ekonomizeriuose pažinimo poreikis

Nerijus Rinkevičius*, Gintautas Miliauskas**

*UAB „Enerstena“, **Kauno technologijos universitetas

Pastaruosius kelis dešimtmečius, esant stabiliai aukštoms energijos resursų kainoms, kaštų mažinimas tapo aktuali visose energetikos sektoriaus grandyse: šilumos gamyboje, tiekime ir vartojime. Kaštų mažinimas energijos tiekime (trasų optimizavimas, šiluminės izoliacijos gerinimas) ir vartojime (pastatų renovacija, individuali apskaita) yra ypač imlūs investicijoms bei įgyvendinimo trukmei procesai. Šilumos gamybos įrenginių pakeitimas pereinant prie biokuro naudojimo reikalauja santykinai nedidelių investicijų ir yra greitai įgyvendinamas. Dažnu atveju tai patrauklus kaštų mažinimo variantas, duodantis ilgalaikės finansinės naudos šilumos gamintojams ir jos vartotojams. Palankias sąlygas biokurui naudoti centrinio šilumos tiekimo sektoriuje (CŠT) sudaro daugelis veiksnių. Svarbūs yra: ženklus iškastinio kuro ir biokuro kainų skirtumas, palanki projektų finansavimo aplinka, konkurencija su nepriklausomais šilumos tiekėjais, stiprūs vietiniai rinkoje dirbantys biokuro infrastruktūros gamintojai, sėkmingi analogiškų projektų įgyvendinimo pavyzdžiai. Todėl logiška, kad Lietuvoje, turinčioje išvystytą CŠT sektorių, biokuro naudojimas šilumos gamybai nuolat auga. 2000–2015 m. biokuro dalis kuro balanse išaugo nuo 2 % iki 62 %. Biokuro naudojimas pramonės sektoriuje taip pat sparčiai auga, tiesa, kiek lėtesniais tempais.

Besiplečiant biokuro naudojimui, nepakanka pasitenkinti vien tik iškastinio kuro pakeitimu biokuru. Dėl santykinai aukštų energijos resursų kainų (taip pat ir biokuro), iškyla nuolatinio kompleksinio efektyvinimo poreikis šilumos gamyboje, tiekime ir vartojime. Dažnai patrauklus būna greičiausios finansinės grąžos teikiantis šilumos gamybos efektyvinimas. Katilinėse, kurios energijai gaminti naudoja nedžiovintą biokurą, pats akivaizdžiausias atliekinės šilumos utilizavimo būdas yra kondensacinių ekonomizerių panaudojimas. Patrauklias finansinės sąlygas jiems naudoti sudaro santykinai nedidelės investicijos, greita grąža, trumpas įrengimo laikas, ilgas darbo resursas. Techninės sąlygos sudaro du pagrindiniai veiksniai.

Fizikinis pagrindas. Tai besikondensuojančių dujų išskiriama fazinių virsmų šiluma. Besikondensuojančios dujos biokurą deginančių katilinių dūmuose yra vandens garas. *Ištobulintos technologijos.* Yra sukurta ir toliau tobulinamos trijų tipų kondensacinių ekonomizerių pagrindinės technologijos.

Kondensaciniame ekonomizeryje atgautas šilumos kiekis priklauso nuo: *Pradinės dūmų temperatūros.* Įprasta dūmų temperatūra už katilo (įėjime į

ekonomaizerį) yra 120–180°C vandens šildymo katilams ir 150–250°C garo katilams. *Kuro drėgnumo*. Įprastai naudojamas 35–55% drėgnumo kuras – nedžiovinotas, smulkintas medienos atliekos. Tokiam kurui sudegus susidaro dūmai, turintys santykinai daug 11–17 % (pagal masę) vandens garų. *Šilumnešio temperatūros*. Būtent šilumnešio pradinė temperatūra daugiausia nulemia galutinę dūmų temperatūrą kondensacinio ekonomaizerio išėjime. Nuo pastarosios priklauso vandens garų kiekis kondensacinio ekonomaizerio išėjime. Įprasta iš centrinio šildymo tinklų grįžtančio vandens temperatūra yra 40–50°C, o biokuro dūmų rasos taško temperatūra yra aukštesnė – 57–66°C.

Taigi, potencialiai didžiausias kondensaciniame ekonomaizeryje gaunamos šilumos kiekis yra kai: deginamas didelio drėgnumo biokuras; yra aukšta į ekonomaizerį įeinančių dūmų temperatūra; turimas kuo žemesnės temperatūros ir pakankamo debito šilumnešis. Dūmų šilumą utilizuojant kondensaciniame ekonomaizeryje, esant paminėtoms sąlygoms, galima gauti papildomai 15–30 % šiluminės energijos nuo katilo šiluminės galios.

Kondensaciniame ekonomaizeryje gaunamą šilumą, šilumnešiui perduotą kondensaciniame ekonomaizeryje, sudaro šios 4 dalys [1]: fizinė dūmų ataušimo nuo pradinės temperatūros iki rasos taško temperatūros šiluma; vandens garų kondensacijos metu išskiriama šiluma; fizinė dūmų ataušimo nuo rasos taško iki galutinės (išmetimo) temperatūros šiluma; kondensato ataušimo nuo rasos taško iki galutinės (išmetimo) temperatūros šiluma. Praktikoje reikšmingiausios yra pirmos dvi dedamosios.

Fizinė dūmų ataušimo nuo pradinės temperatūros iki rasos taško temperatūros šiluma Q_1 :

$$Q_1 = m g c_p (t_1 - t_r) \quad (1)$$

Išraiškoje (1): m – deginamo kuro sunaudojimas, kg/s; g – dūmų masinis debitas kuro masės vienetui, kg/kg kuro; c_p – savitoji dūmų šiluma, J/(kg K); t_1 – dūmų temperatūra įtekėjime į ekonomaizerį, °C; t_r – rasos taško temperatūra, °C.

Vandens garų kondensacijos metu išskiriama šiluma Q_2 :

$$Q_2 = m r_m ((H_2O)_1 - (H_2O)_2) \quad (2)$$

Išraiškoje (2): r_m – fazinių virsmų šiluma esant vidutinei kondensacijos temperatūrai, kJ/kg; $(H_2O)_1$ ir $(H_2O)_2$ – vandens garų kiekiai dūmuose prieš ir po ekonomaizerio, kg/kg kuro.

Skaičiuojant fizinę dūmų ataušimo nuo rasos taško iki galutinės (išmetimo) temperatūros šilumą Q_3 atsižvelgiama į sausų dūmų debitą ir įvertinama pusė susikondensavusių vandens garų:

$$Q_3 = m (g_d + (H_2O)_2 + \frac{(H_2O)_1 - (H_2O)_2}{2}) c_p (t_r - t_2) \quad (3)$$

Išraiškoje (3): g_d – sausų dūmų masinis debitas kuro masės vienetui, kg/kg kuro; t_2 – dūmų temperatūra ištekejime iš ekonomizerio, °C.

Kondensato ataušimo nuo rasos taško iki galutinės (išmetimo) temperatūros šiluma Q_4 :

$$Q_4 = m \frac{(H_2O)_1 - (H_2O)_2}{2} c_{p,H_2O} (t_r - t_2) \quad (4)$$

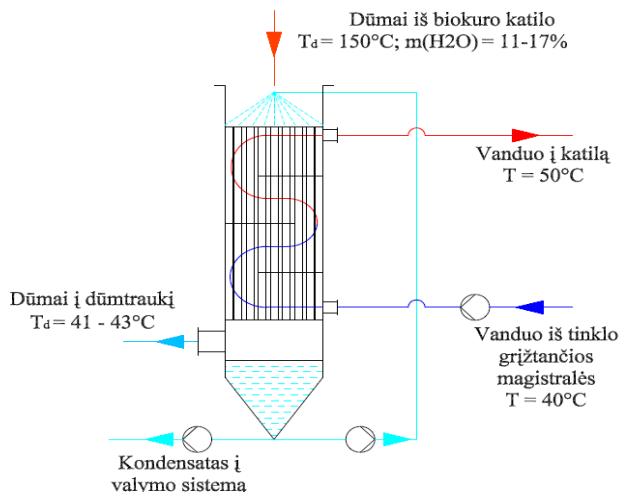
Išraiškoje (4): c_{p,H_2O} – savitoji vandens šiluma, J/(kg K).

Kondensaciniame ekonomizeryje atgauta šiluma Q :

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (5)$$

Pagal pateiktą atgaunamos šilumos kondensaciniame ekonomizeryje modelį galima numanyti, jog atgautas šilumos kiekis priklauso nuo: *Deginimo metu susidarancio dūmų kiekio*. Šis kiekis yra skirtingas kiekvienam kuro tipui ir priklauso nuo kuro elementinės sudėties, kuro drėgnumo, deginimo technologijos, oro pertekliaus koeficiento; *Pradinės dūmų temperatūros*. *Rasos taško temperatūros*. Rasos taško temperatūra priklauso nuo vandens garų dalinio slėgio biokuro dūmuose, kurį apibrėžia kuro drėgnumas, kuro elementinė sudėtis, oro pertekliaus koeficientas. *Šilumnešio temperatūros*. Būtent šilumnešio pradinė temperatūra nulemia galutinę dūmų temperatūrą kondensacinio ekonomizerio išėjime. Nuo pastarosios priklauso vandens garų kiekis kondensacinio ekonomizerio išėjime.

Katilų išmetamų dūmų šilumai utilizuoti praktiškai naudojami kondensaciniai ekonomizeriai pastaruoju metu yra grindžiami trimis kondensacinių ekonomizerių technologijomis [2]: *Skruberio tipo*. Skruberio tipo ekonomizerių veikimo principas yra tai, kad gaunamas didelis šilumos mainų paviršiaus plotas ant išpurškiamo vandens lašelių paviršiaus. Kaip išpurškiamas vanduo, naudojamas kondensatas. Kondensatas tiesiogiai kontaktuoja su dūmais, todėl dūmų fizinė ir dūmuose esančių vandens garų fazinių virsmų šiluma perduodama kondensatui. Pašildytas kondensatas savo šilumą perduoda šilumnešiui (paprastai – termofikaciniam vandeniui) per tarpinį šilumokaitį. *Skruberio su įkrova tipo*. Skruberio su įkrova ekonomizerio veikimo principas yra panašus aukščiau aprašytam. Skirtumas tik tas, kad čia šilumos mainų paviršiaus plotas gaunamas ant kondensatu laistomos įkrovos paviršiaus. *Rekuperatoriaus tipo*. Rekuperatoriaus tipo ekonomizeris – tai klasikinis vertikalus vamzdelių pluošto šilumokaitis. Jame dūmai teka viena eiga vamzdelių vidumi ir perduoda šilumą šilumnešiui, kuris teka tarpvamzdine erdve priešsrove ir darydamas keletą eigų. Rekuperatoriaus tipo ekonomizeriai yra viena labiausiai paplitusių kondensacinių ekonomizerių technologijų. Tai technologija, turinti kelis privalumus prieš skruberio tipo ekonomizerius. Paminėtini – aukštas efektyvumas ir nedidelės elektros energijos sąnaudos ekonomizerio eksploatacijai. Kondensacinio rekuperatoriaus principinė konstrukcinė schema pateikta 1 pav.



1 pav. Kondensacinio rekuperatoriaus veikimo principinė schema

Viena iš būtinų sąlygų rekuperatoriaus patikimam veikimui – nuolatinis kondensato išpurškimo sistemos darbas. Tai apibrėžia į rekuperatorių patenkančių dūmų sudėtis. Biokuro pakuroje susidarę dūmai ir po valymo proceso tebėra užteršti kietosiomis dalelėmis. Pastarosios sąveikoje su ant vidnio vamzdelių paviršiuje susidaranciu kondensatu neišvengiamai užkimštų rekuperatoriaus vamzdelius pelenų-kondensato mišiniu. Dar dūmų sudėtyje be kietųjų dalelių yra ir kitų priemaišų, iš kurių pirmiausia paminėtini degimo produktai, susidarantys iš biokure nedideliais kiekiais esančių S, Cl junginių. Jų buvimas dūmų sudėtyje, kartu su CO₂, ir sąveika su purškiamu kondensatu lemia tai, kad kondensato pH rodiklis yra < 7. Dėl šios priežasties, kondensaciniai rekuperatoriai yra gaminami iš korozijai atsparių nerūdijančių plienų. Brangių medžiagų naudojimas rekuperatoriams gaminti reikalauja optimalios rekuperatoriaus geometrijos. Optimaliam kondensaciniam rekuperatoriui suprojektuoti būtina gerai išmanyti jame vykstančius šilumos ir masės pernašos procesus.

Naudingas šilumos perdavimas iš dūmų termofikaciniam vandeniui vyksta rekuperatoriuje, kuris šiuo atveju yra vertikalus, vienos dūmų eigos vamzdelinis šilumokaitis. Proceso pradžia prasideda dūmų įtekėjime į vamzdelius. Todėl būtina žinoti tikslūs dūmų parametrai prieš išpurškimo etapą gali būti apskaičiuoti ir išmatuoti gana tiksliai, turint pradinis duomenis apie biokuro sudėtį, žinant katilo darbo režimą. Tačiau po kondensato išpurškimo etapo, dūmų parametrai pasikeičia, dėka šių vykstančių pernašos procesų: *Šilumos perdavimas dūmai-kondensato lašeliai*. Šilumos mainus sąlygoja tiesioginis kontaktas tarp dūmų ir kondensato lašelių, ir didelis temperatūrų skirtumas: 1 pav. pateiktame pavyzdyje dūmų

temperatūra 150 °C, o kondensato temperatūra tik 41 °C. Taigi, šio proceso dėka, dūmų temperatūra krinta, ir įtekėjime į vamzdelius skiriasi nuo pradinės. *Paviršinė kondensacija ant išpurškiamo kondensato lašelių paviršių.* Sudeginus pakuroje 40 % drėgnumo medieną, vandens garai dūmuose sudaro 13,9 % nuo visų dūmų pagal masę arba 21,5 % nuo visų dūmų pagal tūrį. Tokios sudėties dūmų rasos taško temperatūra yra $t_r = 61,7^\circ\text{C}$. Pradinė išpurškiamo kondensato temperatūra yra gerokai žemesnė: tik 41 °C. Tai sudaro sąlygas dūmuose esančių vandens garų kondensacijos procesui. Jam vykstant, išsiskiria fazinių virsmų šiluma, kuri sudaro prielaidas kondensato lašeliams šilti. Kadangi dalis vandens garų išsikondensuoja, todėl biokuro dūmų drėgnumas sumažėja, taigi ir rasos taško temperatūra pasikeičia. Norint apskaičiuoti dūmų parametrus įtekėjime į vamzdelius, reikia sudaryti skaitmeninį modelį, kuris apjungtų visus aptartus pernašos procesus: šilumos perdavimą dūmai-kondensato lašeliai, dūmuose esančių vandens garų kondensacija ant kondensato lašelių paviršių ir dar įgalintų atsižvelgti į galimą fazinių virsmų režimo iš kondensacinio pokytį į garavimo režimą, jeigu lašelių paviršius pašiltų virš rasos taško temperatūros.

Šilumos ir masės mainams rekuperatoriaus vamzdyje pradinės sąlygos iš termofikacinio vandens pusės gerai žinomos: vandens įėjimo temperatūra (apiplauna vamzdelį iš išorės, apačioje), debitas, vandens išėjimo temperatūra (apiplauna vamzdelį iš išorės, viršuje). Pav.1 pateiktos vandens temperatūros: įėjime – 40 °C, išėjime – 50 °C. Pradinės sąlygos iš dūmų pusės – tai rezultatas, gautas išsprendus aprašytą išpurškimo procesų uždavinį. Dūmų parametrai vamzdelio išėjime nežinomi.

Pradinės sąlygos iš kondensato pusės susideda iš:

- vamzdelio vidinėje pusėje, dėl purškiamo kondensato formuojasi kondensato plėvelė;
- kondensato plėvelės pradinė temperatūra gaunama išsprendus aprašytą išpurškimo procesų uždavinį;
- kondensato kiekis, tenkantis 1-am vamzdeliui susideda iš pradinio išpurškiamo kondensato debito ir pridėtinio kondensato kiekio, gaunamo dūmuose esančių vandens garų kondensacijos ant kondensato lašelių paviršių proceso metu.

Kondensato plėvelės storis vamzdyje nėra žinomas dėl 2-jų priežasčių. Pirmą, nors kondensato pradinis kiekis debitas apskaičiuojamas ir yra žinomas vamzdelio vidinis perimetras, tačiau nėra žinomas plėvelės tekėjimo greitis. Antra, toliau vykstant kondensacijai ir dūmams tekant išilgai vamzdelio žemyn, plėvelės storis didėja dėl papildomai susidarancio kondensato.

Esant tokioms sąlygoms, vamzdyje vykstantys procesai:

Šilumos perdavimas esant priverstinei konvekcijai dūmai-kondensato plėvelė-vamzdelio sienelė- vanduo [3]. Šio proceso ypatumai: Kondensacija vyksta esant dideliame kiekiui nesikondensuojančių dujų. Vandens garai dūmuose sudaro tik

13,9 % nuo visų dūmų pagal masę, po išpurškimo proceso tikėtina – dar mažiau. Likusią dūmų dalį sudaro nesikondensuojančios dujos N_2 , CO_2 , O_2 .

Nežinomas ir kintantis kondensato plėvelės storis. Plėvelės storiui įtaką daro ne tik pradinio ir naujai susidarančio kondensato kiekis, bet ir vamzdelio paviršiaus savybės, taip pat vis mažėjantis ta pačia kryptimi tekančių dūmų greitis. Nežinomas dūmų temperatūros kitimo išilgai vamzdelio priklausomumas. Dėl fazinių virsmų įtakos tikėtina, kad dūmų temperatūros kritimas viršutinėje vamzdelio dalyje yra gerokai intensyvesnis, negu apatinėje.

Paviršinė kondensacija ant pasroviui tekančio kondensato plėvelės [4].

Minėta, kad yra nežinomas dūmų temperatūros kitimo išilgai vamzdelio priklausomumas, o kondensato plėvelė įgauna temperatūrą, labai artimą vamzdelį apiplaunančio vandens temperatūrai. Tiksliai apibrėžti temperatūrą galima tik atsižvelgus į šilumos perdavimo proceso tarpines termines varžas. Tūrinė vamzdelio vidumi tekančių vandens garų kondensacija [3]. Ji galimai vyksta, kai auštant dūmams, bet kartu dėl paviršinės kondensacijos mažėjant vandens garų daliniam slėgiui, yra pasiekama rasos taško temperatūra.

Norint apskaičiuoti dūmų parametrus vamzdelio išteklėjime, reikia sudaryti skaitmeninį modelį, kuriame būtina atsižvelgti į vienu metu vykstančius procesus: šilumos perdavimas esant priverstinei konvekcijai dūmai-kondensato plėvelė-vamzdelio sienelė-vanduo; paviršinė kondensacija ant pasroviui tekančio kondensato plėvelės; tūrinė vamzdelio vidumi tekančių vandens garų kondensacija.

Apibendrinimas

Biokuro panaudojimas šilumos gamybai auga, ir plėtros potencialas dar nėra visiškai išnaudotas. Šilumos gamybos iš biokuro efektyvinimas, ypač turint tam palankias technines sąlygas, yra labai aktualus efektyviam šilumos išnaudojimui. Efekyviausias būdas 15–30 % padidinti šilumos gamybą sudeginant tą patį kuro kiekį yra kondensacinių ekonomaizerių panaudojimas. Dėl jų darbo specifikos, ekonomaizeriai yra gaminami iš brangių, korozijai atsparių nerūdijančių plienų. Todėl jiems projektuoti reikia skaičiavimo modelio, leidžiančio optimizuoti šiluminių paviršių skaičiavimą. Tokiam modeliui sudaryti yra būtina pažinti ir ištirti šilumos ir masės pernašos procesus, vykstančius ekonomaizerio darbo metu: šilumos perdavimas esant priverstinei konvekcijai dūmai-kondensato plėvelė-vamzdelio sienelė- vanduo, paviršinė kondensacija ant pasroviui tekančio kondensato plėvelės, tūrinė vamzdelio vidumi tekančių vandens garų kondensacija.

Į visus aptartus rekuperacinio ekonomaizerio savitumus atsižvelgti galima tik kompleksiskai išanalizavus vykstančių sudėtinių pernašos procesų sąveiką ir apibrėžus jos dėsningumus. Tai ir yra tolesnių tyrimų tikslas.

Literatūra

1. Geoffrey F. Hewitt HEAT EXCHANGER DESIGN HANDBOOK 1998 (HEDH 1998).
2. Düsseldorf, Springer Reference; 2006; VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen; VDI Heat Atlas Second Edition; 1586 psl.; ISBN 978-3-540-77876-9.
3. Effects of water vapor condensation on the convection heat transfer of wet flue gas in a vertical tube Pages 4257-4265 L. Jia, X. F. Peng, Y. Yan, J. D. Sun and X. P. Li
4. Condensation of a vapour with incondensables: An improved gas phase film model accounting for the effect of mass transfer on film thickness Pages 1465-1474 A. C. Bannwart and A. Bontemps.

The demand for knowledge of the biomass combustion flue gas heat recovery specifics and heat and mass transfer processes in shell&tube type flue gas condenser

Summary

The biofuel usage for district heat production is growing. The efficient heat production, especially under advantageous conditions, is economic necessity. The most effective way to increase heat production by 15–30% in biomass boiler is employing the condenser for flue gas heat recovery. Due to corrosion hazard, the expensive stainless steel grades must be used for the shell&tube type condenser manufacturing. Thus the condenser needs optimal design and sizing model. Engineering of such a model creates the demand for good knowledge of the heat and mass transfer processes that take place inside the flue gas condenser.

Drėgno oro sraute slystančių vandens lašelių kondensacinio fazinių virsmų režimo savitumai

Monika Maziukienė, Gintautas Miliauskas
 Kauno technologijos universitetas

Kondensacinis fazinių virsmų režimas būtinas orui sausinti ar drėgnų dūmų šilumai utilizuoti vandens įpurškimu grindžiamose technologijose. Tuo tikslu, į drėgnų dujų srautą turi būti įpurškiamas žemesnės už rasos tašką T_{rt} temperatūrą vanduo. Šiose technologijose būtina kontroliuoti vandens lašelių šilimą, kad jų paviršius nepašiltų virš rasos taško temperatūros, kas reikštų kondensacinio režimo lašelių paviršiuje pasikeitimą į garavimo režimą, ir sausinamų dujų srautas vėl pradėtų drėkti. Drėgnų dujų išsausinimo laipsnis priklauso nuo įpurkšto šalto vandens kiekio ir kondensacinio režimo trukmės. Todėl aktualu išryškinti kondensacinio režimo lašelių paviršiuje trukmę apibrėžiančius faktorius ir išryškinti optimalų vandens įpurškimą. Kondensacinio režimo trukmę įtakos rasos taško ir įpurškiamo vandens temperatūrų $T_{rt} - T_{l,0}$ skirtumas bei lašelio ir dujų srauto šilumokaitos ir masės mainų sąlygos.

Drėgnų dujų išsausinimo proceso intensyvumą apibrėžia lašelių paviršiuje išsikondensuojančio vandens garo srautas, kurio tankį galima aprašyti analitiškai, atsižvelgiant į nuo lašelio dispersiškumą ($2R$), vandens garo ir dujų mišinio $T_{gd,R}$ temperatūrą prie lašelio paviršiaus bei vandens garo dalinį $p_{g,\infty}$ slėgį dujose ir prie $p_{g,\infty}$ lašelio skirtumą [1]:

$$m_{g,R} = \frac{D_{gd} M_g}{T_{gd,R} l_D R_M} p \ln \frac{p - p_{g,\infty}}{p - p_{g,R}}. \quad (1)$$

Išraiškoje (1): D_{gd} – vandens garo difuzijos koeficientas dujose, m^2/s ; l_D – difuzinio sluoksnio storis, m, kuris proporcingas lašelio spinduliui $l_D \cong R$ [2]; R_M – dujų pastovioji, $J/(kmol\ K)$; M_g – vandens garo molekulinė masė, $kg/kmol$; p – dujų slėgis, Pa; $p_{g,\infty}$ – vandens garo dalinis slėgis dujose, apibrėžiantis jų drėgnumą $\bar{p}_{g,\infty} = p_{g,\infty} / p$; $p_{g,R}$ – vandens garo ir dujų mišinio prie lašelio dalinis slėgis, Pa, kurį galima apibrėžti kaip sočiojo garo slėgį prie lašelio paviršiaus temperatūros $p_{g,R} \cong p_{sat}(T_R)$. Vandens garo ir dujų mišinio temperatūra gali būti prilyginta lašelio paviršiaus T_R temperatūrai $T_{gd} \cong T_R$, jeigu temperatūros slėgio galimo šuolio Knudseno sluoksnyje nepaisyti, kas stambesniųjų lašelių atveju visiškai priimtina [3].

Lašelio išorinės šilumokaitos intensyvumą apibrėžia dujų teikiamos lašeliui šilumos srauto $q_{d,\Sigma}$ tankis, kurį sudaro konvekinis $q_{d,c}$ ir radiacinis $q_{d,r}$ sandai:

$$q_{d,\Sigma} = q_{d,c} + q_{d,r} \quad (2)$$

Oro kondicionavimo technologijų terminis lygmuo žemas, todėl radiacinis sandas (2) išraiškoje paneigtinas. Biokuro dūmų šilumos utilizavimo technologijų terminis lygmuo yra aukštesnis, ir apibrėžiamas 500 K eilės dūmų temperatūra. Todėl dujų lašeliams teikiamo šilumos srauto radiacinė dedamoji tam tikros įtakos lašelių fazinių virsmų ciklams turės. Kiek tai turės tiesioginės įtakos kondensaciniam fazinių virsmų režimui, klausimą galima laikyti atviru. Tačiau galima numanyti, jog vandens lašelių fazinių virsmų ciklui tradicinėse kondensacinėse technologijose lemiamos įtakos turės konvekinė šilumokaita. Lašelio išorinės konvekcijos intensyvumo apibrėžimas yra tiesiogiai susijęs su lašelio slydimo dinamikos drėgnų dujų sraute apibrėžimu ir Stefano hidrodinaminio srauto poveikio lašelio fazinių virsmų intensyvumui įvertinimo problema. Lašelio slydimas apibrėžiamas Reinoldso kriterijaus $Re_l(\tau)$ funkcija, kuriai aprašyti dažniausia pritaikoma modifikuota Reinoldso kriterijaus forma [4]:

$$Re_l = 2R \frac{\Delta w_l}{\mu_{gd}} \rho_d \quad (3)$$

Išraiškoje (3): $2R$ – lašelio skersmuo, m; Δw_l – lašelio slydimo drėgnose dujose greitis, m/s, apibrėžiamas lašelio ir dujų srauto greičių skirtumu $\Delta w_l = |w_l - w_d|$; ρ_d – drėgnų dujų tankis, kg/m³, parinktas pagal dujų T_d temperatūrą; μ_{gd} – vandens garo ir dujų mišinio dinaminės klampos koeficientas, Pa s, parinktas T_{gd} temperatūros ir $\bar{p}_{gd} = p_{gd} / p$ drėgnumo garo ir dujų mišiniui, kai:

$$T_{gd} = T_R + \frac{T_d - T_R}{n_{gd}}; \quad p_{pg} = p_{gd,R} + \frac{p_{g,\infty} - p_{gd,R}}{n_{gd}}; \quad p_{gd,R} = p_{sot}(T_R). \quad (4)$$

Parametrui n_{gd} apibrėžti taikomos „1/2“ ir „1/3“ taisyklės, kuriose $n_{gd} = 2$ [5] ir $n_{gd} = 3$ atitinkamai [6].

Lašelio konvecinį šildymo intensyvumą fazinių virsmų cikle apibrėžiantis Nusselto $Nu_f = 2\alpha_f R / \lambda_{gd}$ kriterijus aprašomas kietos sferos konvekinio šildymo atvejo Nusselto $Nu = 2\alpha R / \lambda_{gd}$ kriterijuje įvedus Stefano hidrodinaminio srauto įtaką įvertinančią f_{B_r} pataisą pagal [6] metodiką:

$$Nu_f = \left(2 + Re_l^{1/2} Pr_l^{1/2}\right) \cdot f_{B_T} \cdot \quad (5)$$

Spoldingo šilumos pernašos B_T parametras (5) išraiškoje kondensaciniame lašelio fazinių virsmų režime apibrėžiamas atsižvelgus į fazinių virsmų šilumos srauto ir išorinio konvekcinio šildymo šilumos srauto tankių santykį [7]:

$$B_T = \frac{q_f}{q_{c,d}} \frac{c_{p,gd}}{L} (T_d - T_R). \quad (6)$$

Išraiškoje (6): $c_{p,gd}$ – aptarto garo ir dujų mišinio savitoji šiluma, J/(kg K); L – vandens fazinių virsmų šiluma, J/kg, parenkama pagal T_R temperatūrą; q_f ir $q_{c,d}$ – fazinių virsmų šilumos srauto ir išorinio konvekcinio šildymo šilumos srauto tankiai atitinkamai, W/m², aprašomi išraiškomis:

$$q_f = m_{g,R} \cdot L, \quad q_{c,d} = Nu_f \frac{\lambda_{gd}}{2R} (T_d - T_R). \quad (7)$$

Kondensaciniame režime lašeliui išorine konvekcija suteikiama šiluma kartu su paviršinės kondensacijos procese išsiskiriančia šiluma vidine šilumokaita nuvedama į lašelį. Tuo pačiu metu į lašelį krintančio išorinės spinduliuotės $q_{r,d}$ srauto $q_{r,d}$ dalis atspindima lašelio paviršiumi, o likusioji $q_r = q_{r,d} - q_{r,ats}$ tenka lašeliui. Tam tikra lašeliui tenkančios spinduliuotės srauto $q_{r,R}$ dalis sugerama lašelio paviršiumi, o likusioji $q_{r,l} = q_r - q_{r,R}$ dalis sugerama pusskaidrio lašelio tūryje. Todėl bendruoju atveju lašelio vidinės šilumokaitos intensyvumą apibrėžia nuo lašelio paviršiaus vidinės pusės sklindančios suminės šilumos srauto $q_{\Sigma,l}$ tankis:

$$q_{\Sigma,l} = q_{c,l} + q_{r,l} = q_f + q_{c,d} + q_{r,l}. \quad (8)$$

Lašelio paviršiaus šiluminę būseną, kurią atspindės lašelio paviršiaus temperatūros $T_R(\tau)$ funkcija, apibrėš šilumos srautų lašelio paviršiuje dinamika, užtikrinanti prie paviršiaus pritekančių (tiek iš dujų srauto, tiek iš lašelio) ir nutekančių (tiek į dujų srautą, tiek ir į lašelį) šilumos srautų atitikimą, kadangi lašelio paviršiuje šiluminė energija nesusikaupia. Šį atitikimą aprašanti šilumos srautų balanso lygtis yra atraminė vandens lašelio kondensacinio fazinių virsmų režimo skaitinio tyrimo schemai sudaryti. Sudarant šilumos srautų lašelio paviršiuje lygtį, būtina

atsižvelgti į lašelio temperatūros $T(r, \tau)$ lauko gradiento savitumus. Pastarieji apibrėžia konvekcinės šilumos $q_{c,l}$ srauto lašelyje kondukcijos $q_{c,l,k}$ dedamąją:

$$q_{c,l,k} = -\lambda_l \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R}. \quad (9)$$

Sudėtinio šilumos plitimo lašelyje spinduliavimu ir laidumu atveju temperatūros lauko gradientas (9) išraiškoje aprašomas pagal skaitiniam modeliavimui patogų integralų modelį [8], o šilumos pernaša lašelyje su cirkuliuojančiu vandeniu įvertinama efektyviojo šilumos laidumo k_c parametru pagal [6] metodiką. Tuomet šilumos srautų atitikimas lašelio paviršiuje aprašomas išraiška:

$$\bar{q}_{\Sigma,d} + \bar{q}_f + \bar{q}_{\Sigma,l} = Nu_f \frac{\lambda_{gd}}{2R} (T_d - T_R) + q_{r,R} - m_{g,R} L - k_c \lambda_l \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0 \quad (10)$$

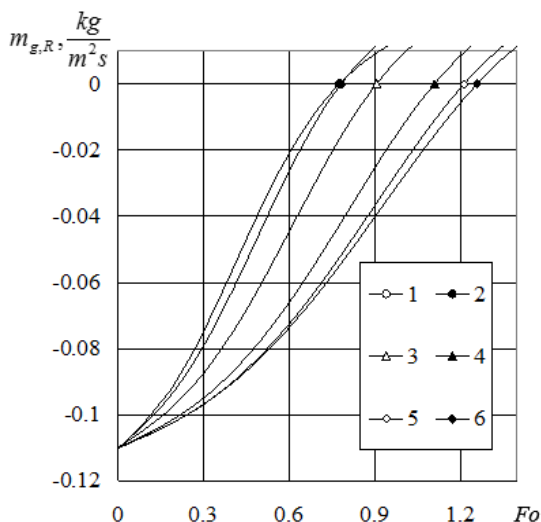
Išraiškoje (10) atsižvelgta, jog išraiška (1) aprašomas garo srauto tankis kondensaciniame lašelio fazinių virsmų režime yra neigiamo ženklo parametras. Galima pastebėti, jog visi išraiškos (10) nariai yra susiję su lašelio paviršiaus temperatūros $T_R(\tau)$ funkcija, ir kiekvienu išskirtu τ_i laiko momentu tik tam tikra $T_{R,i}$ temperatūra užtikrins išraiška (10) aprašomą šilumos srautų lašelio paviršiuje atitikimą.

Išraiškos (10) pagrindu pagal [9] metodiką sudaroma skaitinė lašelio paviršiaus temperatūros apibrėžimo iteracinė schema. Lygiagrečiai apskaičiuojami visi dominantys lašelio šilumos ir masės mainų parametrai kondensaciniame fazinių virsmų režime. Skaitiniam modeliavimui optimizuoti išnaudojami Furje $Fo = (a_0 / R_0^2) \cdot \tau$ kriterijumi išreikšto laiko mastelio privalumai, kurie įgalina analizuoti laisvai parinkto dispersiškumo lašelio fazinių virsmų ciklą $Fo \equiv 0 \div Fo_f$, o po to jo modeliavimo apibendrintus rezultatus išplėsti norimo dispersiškumo lašelių individualiems fazinių virsmų ciklams $\tau \equiv 0 \div \tau_f$.

Lašelių slydimo drėgnų dujų sraute faktoriaus įtakai jų kondensaciniam fazinių virsmų režimui išryškinti, skirtingo dispersiškumo vandens lašeliai sugrupuoti į vienodo pradinio Reinoldso $Re_{l,0}$ kriterijaus debesėlius. Tirtas šešių debesėlių lašelių kondensacinis fazinių virsmų režimas, kai $Re_{l,0}$ yra 0, 5, 10, 25, 50 ir 100 atitinkamai. Kiekvienu atveju modeliavimui pasirinktas $2R_0 = 150$ mikrometrų skersmens šalto 278 K temperatūros vandens lašelis, susidarantis vandenį įpurškiant į $\bar{p}_{g,\infty} = 0.3$ drėgnumo 483 K temperatūros oro srautą. Tokios vandens laše-

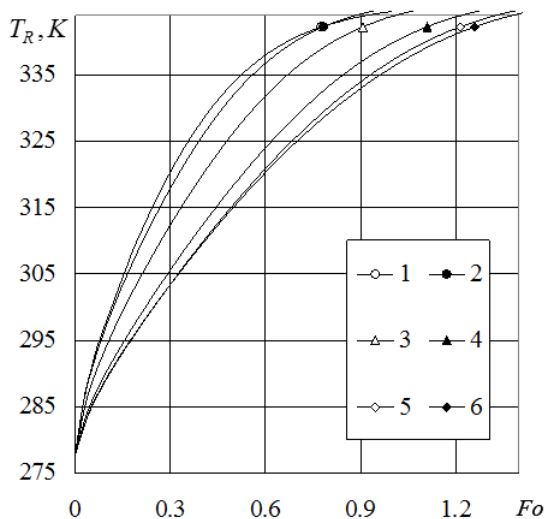
lių šilumokaitos ir masės mainų sąlygos yra artimos biokuro vidutinio drėgnumo šilumos utilizavimo technologijoms.

Lašelių fazinių virsmų drėgnų dujų sraute ciklo kondensacinis režimas yra jautrus vandens įpurškimo sąlygoms (1–7 pav.).

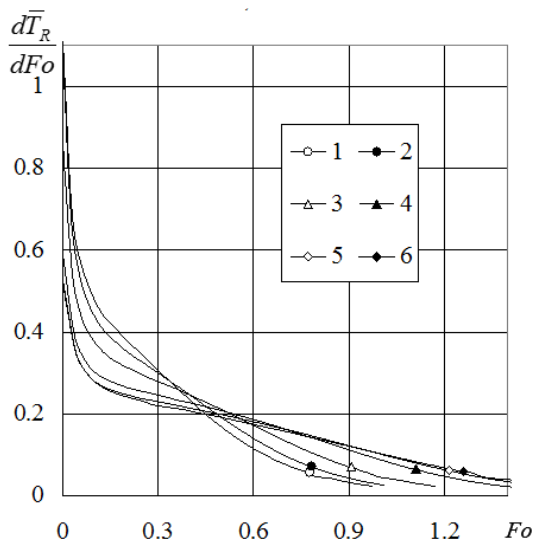


1 pav. Lašelio slydimo įtaka garo srauto tankio dinamikai kondensaciniame fazinių virsmų režime. $Re_{l,0}$: (1) 0, (2) 5, (3) 10, (4) 25, (5) 50, (6) 100

Kondensacinio režimo trukmė vienareikšmiškai apibrėžiama pagal lašelio paviršiuje besikondensuojančio garo srauto tankio, vandens garo srauto tankio lašelio paviršiuje $m_{g,R}(Fo)$ funkcijos grafiką (1 pav.): $m_{g,R}(Fo = Fo_{co}) = 0$. Modeliuotais atvejais apibrėžta universali kondensacinio fazinių virsmų lašelio paviršiuje režimo universali trukmė Furje kriterijaus mastelyje yra Fo_{co} : 0,776; 0,782; 0,907; 1,11; 1,214 ir 1,26, kai $Re_{l,0}$ yra 0, 5, 10, 25, 50 ir 100 atitinkamai. Realus laiko mastelyje 150 mikrometrų skersmens lašeliui tai atitiks τ_{co} , s: 0,0326; 0,0329; 0,0381; 0,0466; 0,051 ir 0,0529 atitinkamai. Šioje trukmėje lašelių paviršius nuo pradinės 278 K temperatūros pašyla iki rasos taško 342,28 K temperatūros (2 pav.). Svarbu tai, jog intensyviau slystančio lašelio paviršius pradinėje kondensacinio režimo stadijoje šyla lėčiau (3 pav.).

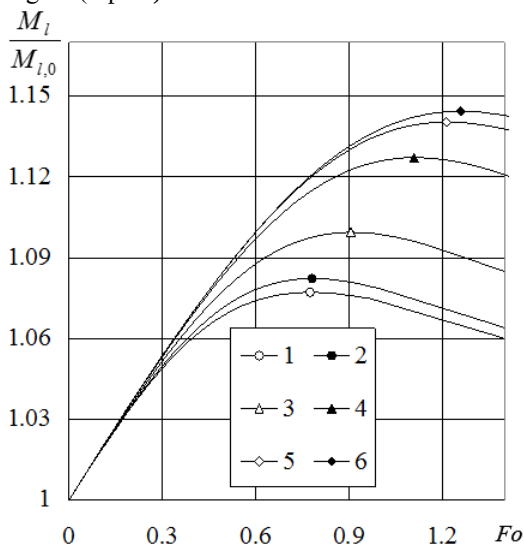


2 pav. Lašelio slydimo įtaka jo paviršiaus temperatūros kitimui kondensaciniame fazinių virsmų režime. $Re_{l,0}$: (1) 0, (2) 5, (3) 10, (4) 25, (5) 50, (6) 100



3 pav. Lašelio slydimo įtaka jo paviršiaus temperatūros kitimo spartai kondensaciniame fazinių virsmų režime. $\bar{T}_R = T_R / T_{l,0}$. $T_{l,0} = 278$ K. $Re_{l,0}$: (1) 0, (2) 5, (3) 10, (4) 25, (5) 50, (6) 100

Nors kondensacinio režimo baigiamojoje stadijoje intensyviau slystančių lašelių paviršiaus šilimas jau yra spartesnis (3 pav.), tačiau pradinėje šilimo sulėtėjimo stadijoje poveikis yra svaresnis ir intensyviau slydusių lašelio atveju kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmė išauga. Tai sudaro prielaidas slystančių lašelių atveju daugiau iš drėgnų dujų iškondensuoti vandens garo, todėl jų masė išauga ko ne dešimčia procentų daugiau (4 pav.).

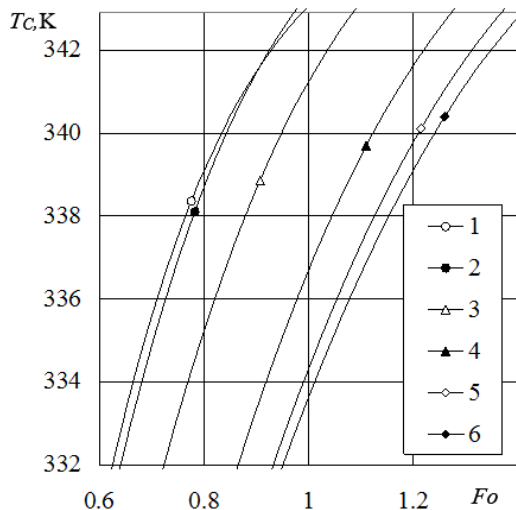


4 pav. Lašelio masės išaugimas kondensaciniame fazinių virsmų režime. $Re_{l,0}$: (1)

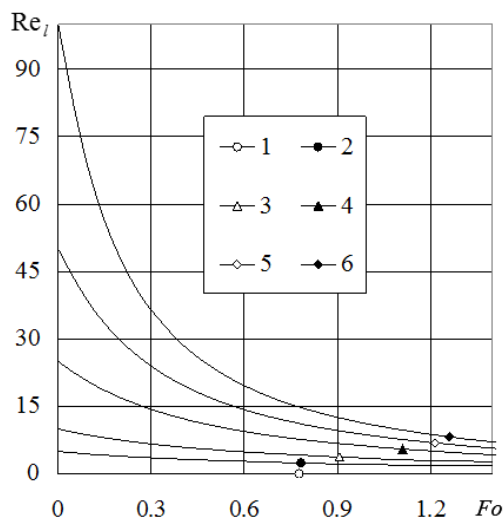
0, (2) 5, (3) 10, (4) 25, (5) 50, (6) 100; $M_{l,0} = 17.668 \cdot 10^{-10}$ kg

Šio, iš pirmo žvilgsnio kiek netikėto, efekto priežastimi yra šilumokaitos lašelyje priklausomumas nuo lašelio slydimo dujų sraute greičio. Slystančio lašelio paviršiuje kylančios trinties jėgos iššaukia paviršinį vandens tekėjimą, kurios sukuriama persiduoda ir į vidinius lašelio sluoksnius. Kilusi konvekcinė šilumos pernaša su cirkuliuojančiu vandeniu paspartina šilumos nuvedimą į lašelio centrinius sluoksnius ir slystančiuose lašeliuose kondensaciniame režime jie pašyla iki aukštesnės temperatūros (5 pav.).

Trinties jėgų įtaką lašelio judėjimo dinamikai apibrėžia Reinoldso kriterijaus $Re_l(Fo)$ funkcijos sparčiai slopstantis grafikas (6 pav.), apibrėžiantis šildymo kondensacinio režimo pabaigoje priartėjimą prie lašelių šildymo laidumu sąlygų (7 pav.). Taigi, šilumokaitos procesų lašelyje ir jo apsuptyje ryšys yra akivaizdus.

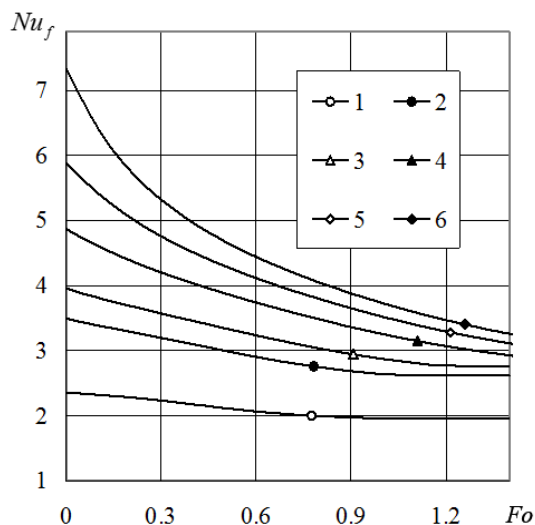


5 pav. Lašelio centrinių sluoksnių temperatūros kitimas kondensacinio režimo pabaigoje. $Re_{i,0}$: (1) 0, (2) 5, (3) 10, (4) 25, (5) 50, (6) 100

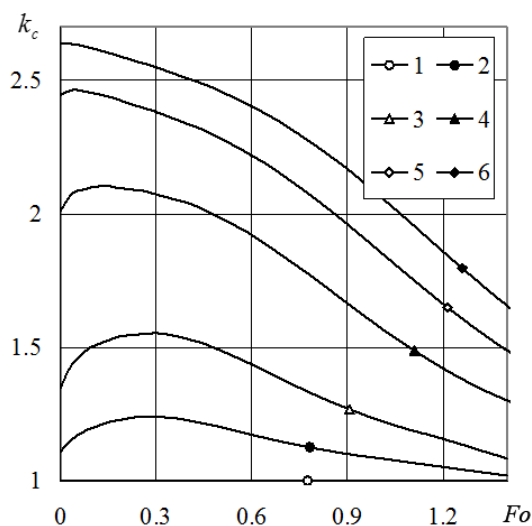


6 pav. Lašelio slydimo slopimas kondensaciniame fazinių virsmų režime.

$Re_{i,0}$: (1) 0, (2) 5, (3) 10, (4) 25, (5) 50, (6) 100



7 pav. Lašelio slydimo įtaka konvekciniam šildymui kondensaciniame fazinių virsmų režime. Nu_f : (1) 0, (2) 5, (3) 10, (4) 25, (5) 50, (6) 100



8 pav. Lašelio slydimo įtaka efektyviojo šilumos laidžio k_c parametrai kondensaciniame režime. Nu_f : (1) 0, (2) 5, (3) 10, (4) 25, (5) 50, (6) 100

Lašelio slydimui slopstant (6 pav.), konvekcinės pernašos lašelyje intensyvumą apibrėžiantis efektyviojo šilumos laidžio k_c parametras sparčiai mažėja (8 pav.), todėl besibaigiant kondensaciniam režimui, šilumos nuvedimo į lašelį procese ir įsivyrąja šilumos laidumo mechanizmas.

Apibendrinimas

Pagal sumodeliuotų $2R_0 = 150$ mikrometrų skersmens vandens lašelio fazinių virsmų ciklą kondensacinio režimo Fo_{co} universalią trukmę apskaičiuojamos dominančio lašelių pradinio $R_{0,i}$ dispersiškumo spektrui kondensacinio režimo individualios τ_i trukmės

$$\tau_{co,i} = Fo_{co} / (a_0 / R_{0,i}^2). \quad (11)$$

Lašelio šilumos ir masės mainų parametrų $P(Fo)$ funkcijomis apibrėžiami individualių parametrų santykiniai pokyčiai kondensaciniame režime pradinių parametrų atžvilgiu

$$\bar{P}_{co,i} = P_{co,i}(Fo = Fo_{co}) / P_{0,i}. \quad (12)$$

Sumodeliuotais $Re_{l,0}$: 0, 5, 10, 25, 50 ir 100 atvejais atitinkamose Reinoldso kriterijumi apibrėžtuose lašelių debesėliuose pagrindinių parametrų santykiniai pokyčiai atitinkamai yra: lašelio matmeniui $\bar{R}_{co}$: 1,0323, 1,0339, 1,0394, 1,0481, 1,0523 ir 1,0535; lašelio masei $\bar{M}_{co}$: 1,0771, 1,0822, 1,0994, 1,1272, 1,1404 ir 1,1444; lašelio tūriui $\bar{V}_{co}$: 1,0999, 1,1051, 1,1228, 1,1514, 1,165 ir 1,1691; lašelio masės vidutinei temperatūrai $\bar{T}_m$: 1,226, 1,2256, 1,2266, 1,2277, 1,2282 ir 1,2286; lašelio slydimo intensyvumui $\bar{Re}_{co}$: 1, 0,482, 0,373, 0,221, 0,1375 ir 0,0823; efektyviojo šilumos laidumo parametrai $\bar{k}_{co}$: 1, 1,015, 0,942, 0,741, 0,674 ir 0,681; Nuselto kriterijui: 1, 0,8483, 0,789, 0,7435, 0,6462, 0,5565 ir 0,4636; konvekcinio šildymo šilumos srauto tankiui $\bar{q}_{c,d,co}$: 0,586, 0,544, 0,51, 0,439, 0,377 ir 0,314; šilumos konvekcijos srauto lašelyje tankiui $\bar{q}_{c,l,co}$: 0,1516, 0,1855, 0,1884, 0,1841, 0,1757 ir 0,1632. Išraiška (12) apibrėžti santykiniai parametrų pokyčiai konkrečiame vienodu Reinoldso kriterijumi apibrėžtame lašelių debesėlyje bus universalūs išpurškiamo vandens temperatūra, bei biokuro dūmų parametrais apibrėžtu atveju. Tai įgalina apibrėžti lašelių dispersiškumui jautrių $P(\tau)$ funkcijų $P_{co} \equiv P(\tau = \tau_{co})$ parametrų vertes. Apibendrinančioje lentelėje pateikti $Re_{l,0}$ 0 ir 100 atvejų lašelių fazinių ir energinių parametrų pokyčio kondensaciniame režime pavyzdžiai (1 lentelė).

1 lentelė. Modeliavimo rezultatų išplėtimo pageidaujama lašelių dispersiškumui
 $Re_0 = 0$; $Fo_{co} = 0.7757$

R_0 μm	τ_{co} s	R_{co} μm	$\frac{M_0}{10^{-10}}$ kg	$\frac{Mco}{10^{-10}}$ kg	$\frac{q_{c,d,0}}{kW}$ $\frac{m^2}{m^2}$	$\frac{q_{c,d,co}}{kW}$ $\frac{m^2}{m^2}$	$\frac{q_{c,l,0}}{kW}$ $\frac{m^2}{m^2}$	$\frac{q_{c,l,co}}{kW}$ $\frac{m^2}{m^2}$
25	0,0036	25,81	0,6544	0,7048	286,9	168,1	1109	168,1
50	0,0145	51,61	5,235	5,6385	143,5	84,04	554,6	84,04
75	0,0326	77,42	17,67	19,03	95,65	56,03	369,7	56,03
100	0,0579	103,23	41,88	45,108	71,74	42,02	277,3	42,02
125	0,0905	129,03	81,8	88,101	57,39	33,62	221,8	33,62
150	0,1303	154,84	141,34	152,24	47,83	28,02	184,9	28,02
175	0,1774	180,64	224,49	241,79	40,99	24,01	158,4	24,01
200	0,2317	206,45	335,04	360,86	35,87	21,04	138,6	21,04
225	0,2932	232,26	477,04	513,8	31,88	18,68	123,2	18,68
250	0,362	258,06	654,37	704,81	28,7	16,81	110,9	16,81
275	0,438	283,87	870,96	938,09	26,09	15,28	100,8	15,28
300	0,521	309,68	1130,8	1217,9	23,91	14,01	92,43	14,01
325	0,612	335,48	1437,7	1548,5	22,07	12,93	85,32	12,93
350	0,71	361,29	1795,6	1934	20,5	12,01	79,22	12,01
375	0,714	387,1	2208,5	2378,7	19,13	11,21	73,94	11,21
400	0,927	412,9	2680,3	2886,9	17,93	10,51	69,32	10,51

$Re_0 = 100$; $Fo_{co} = 1.26$

R_0 μm	τ_{co} S	R_{co} μm	$\frac{M_0}{10^{-10}}$ kg	$\frac{Mco}{10^{-10}}$ kg	$\frac{q_{c,d,0}}{kW}$ $\frac{m^2}{m^2}$	$\frac{q_{c,d,co}}{kW}$ $\frac{m^2}{m^2}$	$\frac{q_{c,l,0}}{kW}$ $\frac{m^2}{m^2}$	$\frac{q_{c,l,co}}{kW}$ $\frac{m^2}{m^2}$
25	0,0596	26,34	0,6544	0,7412	892,9	280,1	1714	280,1
50	0,0235	52,67	5,235	5,934	446,4	140,4	857,5	140,4
75	0,0529	79,01	17,67	20,487	297,6	93,36	571,7	93,36
100	0,0941	105,35	41,88	47,473	223,2	70,02	428,7	70,02
125	0,147	131,68	81,8	92,721	178,6	56,02	343	56,02
150	0,2117	158,02	141,34	160,22	148,8	46,68	285,8	46,68
175	0,2882	184,35	224,49	254,47	127,5	40,01	245	40,01
200	0,3764	210,69	335,04	379,79	111,6	35,01	214,4	35,01
225	0,4764	237,03	477,04	540,75	99,2	31,12	190,6	31,12
250	0,5881	263,36	654,37	741,77	89,28	28,01	171,5	28,01
275	0,7116	289,7	870,96	987,29	81,16	25,46	155,9	25,46
300	0,8469	316,04	1130,8	1281,8	74,4	23,34	142,9	23,34
325	0,9939	342,37	1437,7	1629,7	68,68	21,54	131,9	21,54
350	1,153	368,71	1795,6	2035,4	63,77	20,01	122,5	20,01
375	1,323	395,05	2208,5	2503,5	59,52	18,68	114,3	18,68
400	1,506	421,38	2680,3	3038,3	55,8	17,51	107,2	17,51

Literatūra

1. S. N. Shorin. Teploperedacha, Vishaja Shkola, Moskva, 1964.
2. Zuev V.E., Kopitin U.D., Kuzikovskii A.V. Nonlinear optical effects in aerosols, Novosibirsk, Nauka, 1982.
3. T. Elperin, B. Krasovtsov. Radiation, thermal diffusion and kinetic effects in evaporation and combustion of large and moderate size fuel droplet, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995. Vol. 38: 409–418.
4. Sirignano W.A. Fluid dynamics and transport of droplets and sprays, Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
5. Renksizbulut M., Nafziger R., Li X. A mass transfer correlation for droplet evaporation in high-temperature flows, *Chemical Engineering Science*, 1991. Vol. 46: 2351-2358.
6. Abramzon B., Sirignano W. A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1989. Vol. 32: 1605–1618.
7. Miliauskas G., Sinkunas S., Miliauskas G. Evaporation and condensing augmentation of water droplets in flue gas, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010. Vol. 53: 1220-1230.
8. 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.
9. Miliauskas G., Maziukienė M. Modeling 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. 21(2): 123-128.

Peculiarities of condensation phase transformation regime of water droplets slipping in humid gas flow

Summary

The influence of droplets slipping in humid gas flow factor for condensation phase transformation regime at different droplet slipping clouds is defined, when initial Reynolds number of droplets in them is 0, 5, 10, 25, 50 and 100, respectively. At each case, condensation phase transformation regime is modelled for 150 μm droplet diameter, when 278 K temperature water is sprayed to $\bar{p}_{g,\infty} = 0.3$ humid air flow which is at 473 K temperature. When universal condensation regime Fo_{co} duration and droplet parameter functions P_{co}/P_0 changes are defined, the modelling results for functions $P_{co} \equiv P(\tau = \tau_{co})$ values are expanded for freely chosen droplet dispersity.

Išpurškiamo vandens parametrų įtaka lašelių šilumos ir masės mainams biokuro dūmų šilumos utilizavimo technologijose

Virginijus Ramanauskas*, Gintautas Miliauskas**

*UAB „Enerstena“, **Kauno technologijos universitetas

Šiluma iš biokuro katilų išeinančių drėgnų dūmų, prieš juos išmetant į atmosferą, utilizuojama kondensaciniuose ekonomizeriuose. Iš šalinamų dūmų atgaunama juose sukaupta vandens garo fazinių virsmų šiluma ir auštančių dūmų šiluma. Taip gamta apsaugoma nuo šiluminio užteršimo, ir kartu žymiai padidinamas biokuro katilinės našumas. Biokuro drėgnų dūmų šilumos utilizavimo technologijose gana plačiai pritaikomas vandens išpurškimas. Jo pritaikymo specifika susijusi su tinkamu vandens išpurškimo proceso organizavimu, kurį daug kuo apibrėžia saviti reikalavimai išpurškiamam vandeniui ir lašelių paviršiuje vykstantiems fazinių virsmų procesams. Kontaktinio tipo ekonomizeriuose vandens garas iškondensuojamas tiesiog ant lašelių paviršiaus, todėl įpurškiamo vandens $T_{l,0}$ temperatūra privalo būti žemesnės už dūmuose esančių vandens garų rasos taško T_{rt} temperatūrą: $T_{l,0} < T_{rt,0}$. Rasos taško temperatūrą apibrėžia dūmų drėgnumas: ji atitinka vandens sočiojo garo temperatūrą, parinktą pagal vandens garo dalinį slėgį biokuro dūmus sudarančių dujų mišinyje. Vandens garo dalinis slėgis apibrėžiamas pagal vandens tūrinę dalį dūmuose, kuri išreiškiama vandens garo dalinio p_g slėgio ir dūmų p_d slėgio santykiu:

$$\bar{p}_g = \frac{p_g}{p_d}, \quad (1)$$

todėl $p_g = \bar{p}_g \cdot p_d$ ir $T_{rt} = T_{sot}(p_g)$.

Iš dūmų iškondensuojant vandens garą, jie sausėja ir rasos taško temperatūra žemėja. Todėl kontaktiniuose kondensaciniuose ekonomizeriuose tenka kontroliuoti lašelių šilimo procesą bei sekti, kad lašelių paviršius nepašiltų aukščiau rasos taško temperatūros ir lašeliai nepradėtų garuoti.

Rekuperacinio tipo kondensaciniuose ekonomizeriuose vandens garas iš dūmų iškondensuojamas dūmams tekant vamzdeliais ir kontaktuojant su žemesnės už rasos taško temperatūrą gravitacinės vandens plėvelės paviršiumi. Gravitacinės plėvelės tekėjimo vidiniu vamzdelio paviršiumi hidrodinamikai pagerinti ir galimam kietomis dalelėmis užterštų dūmų srauto kamštinio tekėjimo režimui išvengti, viršutinėje kondensacinio ekonomizerio dalyje virš vamzdelių retinės į biokuro dūmus išpurškiamas vanduo. Fazinių virsmų režimas lašelių paviršiuje priklausys nuo įpurškiamo vandens temperatūros. Išpurškus aukštesnės už rasos taško temperatūrą vandenį, lašeliai iš karto garuos. Išpurškus žemesnės už rasos taško temperatūrą vandenį, lašelių paviršiuje kondensuos vandens garas ir jų garavimas prasi-

dės tik tuomet, jeigu jie pašils virš rasos taško temperatūros, dar nepasiekę retinės. Taigi, įpurškiamo vandens temperatūra galima apibrėžti dūmų drėgnumo kitimo tendenciją virš retinės. Aišku, svarbiu parametru bus ir įpurškiamo vandens ir dūmų debitų G_l ir G_d atitinkamai santykiu išreikštas santykinis vandens debitas:

$$g_l = \frac{G_l}{G_d}. \quad (2)$$

Dūmų temperatūros ir drėgnumo pokytis jiems pritekant iki retinės bus ryškesnis, kai santykinis vandens debitas bus didesnis. Retinę pasiekęs vanduo pasiskirstys jos vamzdeliuose ir apibrėš vamzdelio vidiniu paviršiumi tekančios gravitacinės plėvelės pradinius parametrus. Gravitacinę plėvelę vamzdeliuose formuos prie retinės lašelių pavidale pritekančio vandens srautas ir stiprins jos paviršiuje susikondensuojančio garo kondensato srautas.

Taigi, vandens įpurškimo optimalių sąlygų apibrėžimas yra svarbus tiek kontaktiniais, tiek ir rekuperaciniais kondensaciniais ekonomaiseriais grindžiamose biokuro dūmų šilumos utilizavimo technologijose. Vandens įpurškimą į biokuro dūmų srautą galima apibrėžti vandens temperatūros T_l , lašelių dispersiškumo $2R$ ir slydimo dūmų sraute greičio Δw_l bei vandens santykinio debito g_l parametrais.

Išpurškiamo vandens temperatūra apsprendžia lašelių fazinių virsmų ciklą [1], ir kartu apibrėžia lašelio šilumokaitos varančiosios jėgos, išreiškiamos dūmų temperatūros ir lašelių paviršiaus temperatūros skirtumu, kitimą cikle:

$$\Delta T_l(\tau) = T_d(\tau) - T_l(\tau). \quad (3)$$

Lašelių dispersiškumas apibrėžia kontakto tarp išpurkšto vandens ir bio dūmų paviršiaus ploto kitimą, kuris sferiškai simetriškų lašelių debesėliui apibrėžiamas sumuojant lašelių paviršiaus plotus išskirtose dispersiškumo R_i grupėse ir atsižvelgiant į lašelių N_i koncentraciją jose:

$$A_l(\tau) = 4\pi \sum_{i=1}^n N_{il} R_{il}^2(\tau). \quad (4)$$

Lašelių slydimas dūmų sraute apibrėš lašelių išorinę konvekcinę šilumokaitą [2]:

$$q_c^+(\tau) = \lambda_{gd}(\tau) \frac{1 + 0.3 \text{Re}^{\frac{1}{2}}(\tau) \text{Pr}^{\frac{1}{3}}(\tau)}{R(\tau)} f_{B_r}(\tau), \quad \text{Re} = 2R \frac{|w_d - w_l|}{\mu_{gd}} \rho_d. \quad (5)$$

Spoldingo šilumos pernašos B_r parametro funkcija išorinės konvekcinės šilumos srauto tankio (5) išraiškoje atsižvelgiama į lašelio fazinius virsmus lydinčio Stefano hidrodinaminio srauto poveikį lašelio konvekciniame šildyme pagal [3] metodiką.

Išpurškiamo vandens santykinis $g_{l,0}$ debitas apibrėš lašelių šilumokaitos ir fazinių virsmų poveikį dūmų temperatūros ir drėgnumo $T_d(\tau)$ ir $\bar{p}_g(\tau)$ funkcijoms atitinkamai. Kai į dūmų srautą įpurškiama santykinai mažai vandens, tuomet $g_l \rightarrow 0$ ir dūmų parametrų kitimą lašelių fazinių virsmų cikle galima paneigti, numatant $T_d(\tau) \approx T_{d,0}$ ir $\bar{p}_g(\tau) \approx \bar{p}_{g,0}$ sąlygas. Tolesnėje analizėje numatomas šių sąlygų galiojimas ir skaitiniu tyrimu siekiama išgryninti išpurškiamo vandens temperatūros poveikį lašelių terminei būsenai ir faziniams virsmams jų fazinių virsmų cikle.

Į T_d temperatūros ir $\bar{p}_g$ drėgnumo biokuro dūmų srautą išpurkšto T_l temperatūros vandens Reinoldso Re_0 kriterijumi apibrėžto lašelių debesėlio fazinių virsmų ciklas sumodeliuotas pagal vienišo lašelių šilumokaitos ir masės mainų [4] metodiką, visiškai tinkančią atveju $g_l \rightarrow 0$. Lašelio šilumos ir masės mainų parametrų kitimas fazinių virsmų cikle apibrėžtas lašelio paviršiaus momentinę temperatūrą atrinkus pagal iteracinę skaitinę schemą, kai prie lašelio paviršiaus pritekantiems ir nuo jo nutekantiems šilumos srautams keliama atitikimo penkių šimtųjų procentinio punkto sąlyga. Šia sąlyga apjungiamos (5) išraiška aprašoma išorinio konvekcinio šildymo šilumos srauto tankio $q_c^+(\tau)$ funkcija, lašelio paviršiuje vykstančių fazinių virsmų intensyvumą aprašanti $q_f^+(\tau)$ funkcija, ir šilumos nuvedimo į lašelį intensyvumą aprašanti $q_c^-(\tau)$ funkcija. Fazinių virsmų šilumos srautas išreikštas garo srauto m_g^+ tankio lašelio paviršiuje ir vandens garavimo L šilumos sandauga:

$$q_f^+(\tau) = m_g^+(\tau) \cdot L(\tau). \quad (6)$$

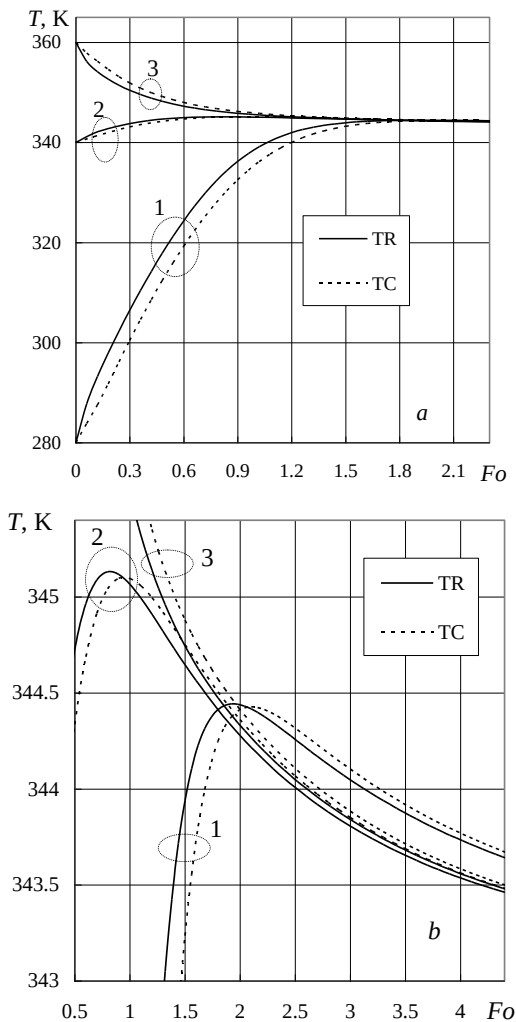
Garų srauto tankis apibrėžtas pagal [5] metodiką, numatančią kondensacijos režime link lašelio sklindantį garų srautą neigiamu. Šilumos plitimo į lašelį srauto tankis aprašytas pagal Furje dėsnį:

$$q_c^-(\tau) = -\lambda_l(\tau) \cdot \text{grad} T_{r=R}(\tau) \cdot k_c^-(\tau). \quad (7)$$

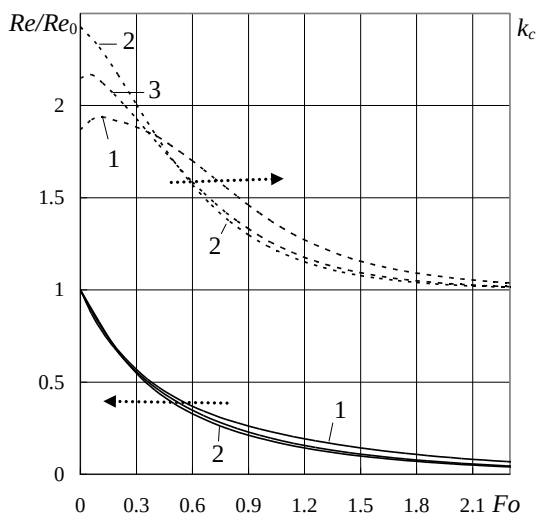
Lašelio nestacionariojo temperatūros lauko gradientas aprašytas pagal šilumos plitimo lašelyje laidumo ir spinduliavimo analitinį modelį [3], numačius nulinį spinduliuotės srauto $q_r = 0$ tankį. Šilumos konvekcijos indėlis šilumos pernešimo į lašelio vidinius sluoksnius procese įvertintas efektyviojo šilumos laidumo parametru $k_c^-(\tau)$ funkcija, pagal [2] metodiką.

Sumodeliuotas 200 mikrometrų skersmens 500 K temperatūros vidutinio $\bar{p}_g = 0.25$ drėgnumo oro sraute $Re_0 = 25$ ir $g_l \approx 0$ sąlygomis slystančių lašelių fazinių ciklas, kai išpurškiamas šaltas, šiltas ir karštas vanduo. Vanduo laikomas šaltu, kai jo temperatūra yra žemesnė už rasos taško temperatūrą ($T_{l,0} < T_{rt}$). Van-

duo laikomas šiltu, kai jo temperatūra yra aukštesnė už rasos taško temperatūrą, bet žemesnė už lašelių pusiausvyros garavimo temperatūrą ($T_{rt} < T_{l,0} < T_e$). Karšto vandens atveju $T_{l,0} > T_e$. Išpurškiamo vandens temperatūra daro esminį poveikį lašelių terminės būsenos kitimui (1 pav.).



1 pav. Vandens temperatūros įtaka lašelių terminiai būsenai. $T_{l,0}$, K: (1) 280, (2) 340, (3) 360; $T_d = 500$ K; $\bar{p}_g = 0.25$

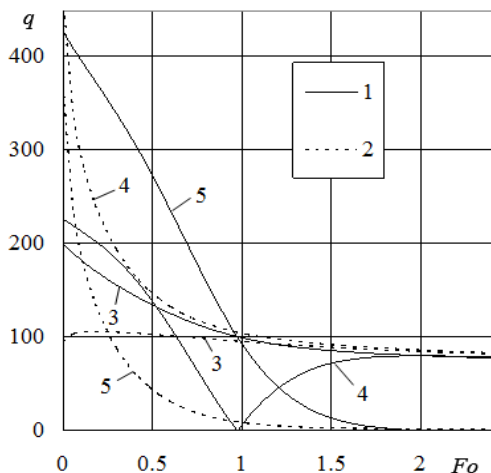


2 pav. Vandens temperatūros įtaka lašelių slydimui ir priverstinei šilumos konvekcijai juose. $T_{i,0}$, K: (1) 280, (2) 340, (3) 360

Skaitinio modeliavimo rezultatai analizuoti Furje $Fo = (a_0 / R_0^2) \cdot \tau$ kriterijumi išreikštame universalus laiko mastelyje. Tokios analizės privalumas tas, kad laisvai parinktam lašelio dispersiškumui sudarytų lašelio šilumos ir masės P parametrų bematės $\bar{P}(Fo) = P(Fo) / P_0$ formos $\bar{P}(Fo)$ funkcijų grafikai yra nejautrūs lašelių dispersiškumui vandens T_l temperatūra, dūmų T_d temperatūra bei $\bar{p}_g$ drėgnumu ir pradiniu Reinoldso Re_0 kriterijumi apibrėžtais atvejais [6].

Verta atskirai aptarti vandens pereinamųjų fazinių virsmų ir pusiausviro garavimo režimus. Pereinamųjų fazinių virsmų režime lašeliai šyla, o pusiausviro garavimo režime aušta. Šalto vandens atveju lašelių pereinamųjų fazinių virsmų režimą sudaro kondensacinis ir pereinamojo garavimo režimai, šilto vandens atveju tik pereinamojo garavimo režimas, o karšto vandens lašeliai pusiausvirai garuoti pradeda iškart. Pusiausviro garavimas vyksta prie tam tikros lašelio T_e temperatūros, kuomet dūmų suteikiama lašeliui šiluma tik garina vandenį. Pereinamųjų fazinių virsmų režime šalto ir šilto vandens lašeliai iki pusiausviro garavimo T_e temperatūros pašyla (1 pav. a), o pusiausviro garavimo režime pradeda aušti (1 pav. b). Todėl garavimo režimo pokytį ryškiai išreiškia maksimumo taškas šalto ir šilto vandens lašelio paviršiaus temperatūros $T_R(Fo)$ funkcijos grafike (1 pav. b 1 ir 2 kreivės). Pereinamojo garavimo režimo karšto vandens lašelių fazinių virsmų cikle

nėra ir jie iškart pusiausvirai garuodami aušta (1 pav. b 3 kreivės). Taigi, išpurškiamo vandens temperatūra ryškiai lemia lašelių terminės būsenos kitimą pereinamųjų fazinių virsmų režime, tačiau kokybinės įtakos lašelio terminiai būsenai pusiausviro garavimo režime neturi, nes lašeliai nuosekliai aušta silpnėjant jų slydimui dujų sraute (2 pav.). Vandens temperatūros poveikis šilumokaitai lašelyje ypač ryškus pradinėje lašelių terminės būsenos kitimo stadijoje, ką patvirtina efektyviojo šilumos laidumo parametro funkcijų grafikų išsislukuosniavimas pirmajame fazinių virsmų ciklo režime (2 pav.). Tai apibrėžia šilumos srautų lašelio paviršiuje dinamiką 3 pav.).

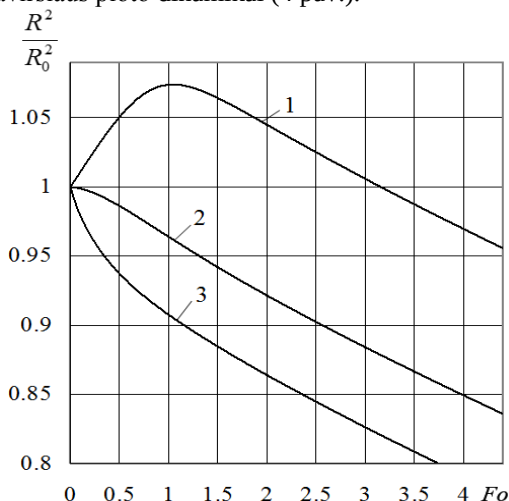


3 pav. Vandens temperatūros įtaka šilumos srautų lašelio paviršiuje dinamikai: q , kW/m^2 : (3) q_c^+ , (4) q_f^+ , (5) q_c^- ; $T_{l,0}$, K: (1) 280, (2) 360

Karšto vandens lašelio išorinės šilumokaitos varančioji jėga, apibrėžiama dūmų ir lašelio paviršiaus temperatūrų skirtumu, yra mažesnė, todėl konvekcinio šildymo intensyvumas iš pradžių yra ryškiai silpnesnis nei šalto vandens atveju (3 pav. 3 kreivės). Šilumos konvekcijos lašelyje srautas šalto ir karšto vandens atvejais pereinamajame garavime nuosekliai slopsta (3 pav. 5 kreivės). Ypač ryškus vandens temperatūros poveikis fazinių virsmų srautui. Šalto vandens lašelių paviršiuje, kol jie pašyla iki rasos taško temperatūros, kondensuojasi vandens garas, ir fazinių virsmų šilumos srautas nuosekliai sumažėja iki nulio, tuomet prasideda paviršinis vandens garavimas ir pereinamojo garavimo režime lašelių paviršiuje fazinių virsmų srautas išauga iki išorinio konvekcinio šildymo intensyvumo (3 pav. 4 ištisinė kreivė). Karšto vandens lašelių paviršiuje fazinių virsmų srautas nuosekliai slopsta (3 pav. 4 punktyrinė kreivė). Aiškiai matosi, jog karšto vandens

auštančio lašelio entalpijos indėlis fazinių virsmų procese daug ryškesnis nei šalto vandens atveju.

Išpurškiamo vandens temperatūra turi nemažai įtakos kontakto tarp skystosios ir dujinės fazių paviršiaus ploto dinamikai (4 pav.).



4 pav. Vandens temperatūros įtaka kontakto tarp fazių paviršiaus ploto kitimui.
 $T_{l,0}$, K: (1) 280, (2) 340, (3) 360.

Apibendrinimas

Į biokuro dūmų srautą įpurškiamo vandens temperatūra iš esmės lemia lašelių pernašos procesus pereinamųjų fazinių virsmų režime. Tai sudaro prielaidas vandens įpurškimu norimus keisti dūmų srauto parametrus viršutinėje rekuperacinio kondensacinio ekonomaizerio dalyje virš retinės, iki dūmams įtekant į jos vamzdelius. Įpurškus šaltą vandenį, dūmai bus aušinami ir sausinami, o šilto ir karšto vandens įpurškimo atvejais bus aušinami ir drėkinami. Optimaliam vandens įpurškimui apibrėžti, būtini išsamūs lašelių šilumokaitos ir fazinių virsmų tyrimai, tiesiogiai susiję su vandens garo kondensacijos ant vamzdelių paviršiumi tekančios gravitacinės skysčio plėvelės procesu ir dūmų šilumokaitos ir hidrodinamikos vamzdyje procesais.

Literatūra

1. 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.

2. Abramzon B., Sirignano W. A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1989. Vol. 32: 1605–1618.
3. 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.
4. Miliauskas G.; Maziukienė M., Ramanauskas V. Modelling of heat and mass transfer processes in phase transformation cycle of sprayed water into gas. 3. Energy and thermal states analysis of slipping droplet in a humid air flow, *Mechanics*, 2015. Vol. 21(5): 377-383.
5. Kuzikovskij A. V. Dynamic of spherical particle in powerful optical field, *Izv. VUZ Fizika*, 1970. No. 5: 89–94.
6. Maziukienė M., Miliauskas G., Adomavičius A. Lašo uždavinio skaitinio eksperimento optimizavimas lašelio terminių parametrų aspektu, *Šilumos energetika ir technologijos* – 2015. 2015: 156-167.

The impact of sprayed water parameters for droplets mass transfer in the transit phase transformation regime at heat recovery technologies of the biofuel flue gases

Summary

The warming and evaporation of the cold, warm and hot water droplets in the 500 K temperature and flue gas flow, when water vapour volume is 0.2 and initial slipping of water droplets is defined by Reynolds $Re_0 = 20$ number, was modelled. Water temperature is 280, 340 and 360 K, respectively. The results analysis is accomplished in universal time scale defined by Fourier number. Into the flue gas sprayed water temperature essential impact for droplets heating and phase transformations at the transit phase transformation regime was based on.

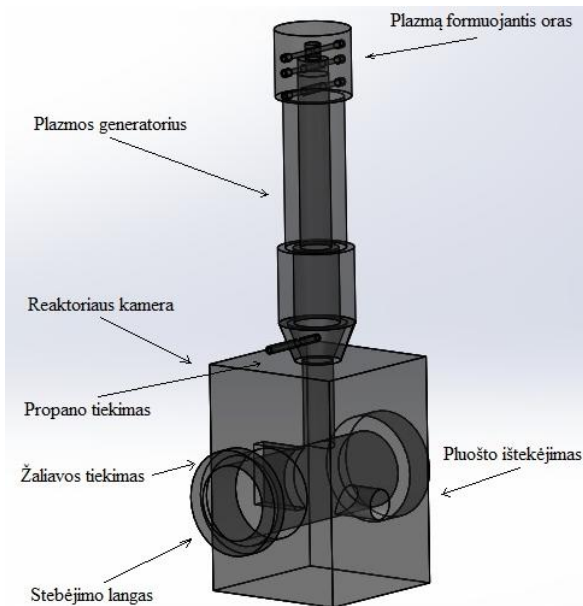
Mineralinio pluošto gamybos iš stiklo juostų, taikant plazminę technologiją, proceso vizualizacija

Mindaugas Aikas, Romualdas Kėželis, Mindaugas Milieška, Rolandas Uscila,
Viktorija Grigaitienė
Lietuvos energetikos institutas

Išvadas. Tiek tradicinėmis, tiek ir inovatyviomis plazminėmis technologijomis formuojant keraminį pluoštą proceso efektyvumui padidinti, ir siekiant suprasti jo eigą, dažnai naudojamos vizualizacinės priemonės, tokios kaip foto ar greitaieigės vaizdokameros, kurių dėka galima stebėti lydalo lašelių judėjimą, matmenų kitimą bei pluošto susidarymo procesą [1-3]. Taip pat, pluošto formavimo metu šiluminių procesų parametrams nustatyti naudojami neinvaziniai metodai, tokie kaip infraraudonųjų spindulių kameros, termovizoriai ar pirometrai [4], kurie leidžia nustatyti lydalo ar jo dalelių paviršiaus temperatūrų svyravimų dėsningumus, ir taip kuo efektyviau organizuoti pluoštinimo procesą. Tokie metodai straipsnio autorių jau buvo panaudoti keraminio pluošto iš ceolitų dispersinių dalelių formavimo optimizavimui ir diagnostikai [5]. Šiame darbe proceso vizualizacija naudojama plačiau suprasti pluošto iš stiklo juostų formavimo procesą. Būtina paminėti, kad šiame darbe, kitaip nei ankstesniuose [6], tarp stiklo juostų įterpiama plieninė juostelė, kuo siekiama, kad stiklo pluošte susiformuotų plieno dariniai ar net pluošto elementai, kuriuos vėliau galbūt būtų galima atskirti nuo stiklo pluošto ir taip gauti vien tik plieno mikropluoštą.

Šio darbo tikslai – vizualizacinėmis priemonėmis praturtinti pluošto formavimo iš stiklo juostų žinias, išmatuoti išsilydžiusios žaliavos paviršiaus temperatūrą pluošto formavimo metu, bei nustatyti plazmos srauto temperatūros įtaką geležies kiekiui gautame pluošte.

Tyrimų metodika. Eksperimentai buvo vykdomi plazmocheminiu reaktoriu, kurį sudaro iki 70 kW galios plazmos generatorius ir reaktoriaus kamera su žaliavos tiekimo ir produkcijos ištekėjimo angomis bei stebėjimo langu (1 pav.). Plazmos srautui formuoti buvo naudojamas oras. Plazmos generatorius ir reakcinė kamera aušinami vandeniu. Karšto oro temperatūrai padidinti, tarp plazmos generatoriaus ir reakcinės kameros įpučiamos iki 5 g/s propano dujos. Reakcinė kamera suprojektuota taip, kad į ją plazmos generatoriaus įkaitintas oro srautas patektų tangentiškai žaliavos judėjimo kryptimi. Stiklo juostoms tiekti, karšto oro srauto ištekėjimo į aplinką pro žaliavos tiekimo angą išvengti, reikiamoms pluoštinimo sąlygoms užtikrinti prie reaktoriaus sumontuota forkamera, į kurioje esančią ertmę yra tiekiami iki 5 g/s oro. Forkamera užtikrina pastovų tarpą tarp stiklo atraižų bei pašalina stiklo juostų strigimą darbo metu. Glaustesnis stiklo juostų lydymo ir pluoštinimo mechanizmas aprašytas ankstesniame darbe [6].

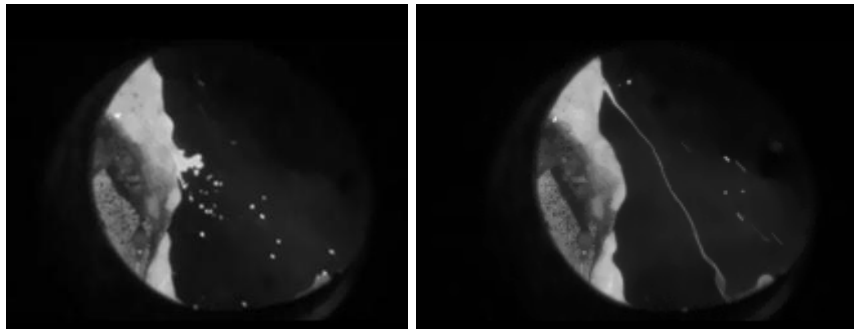


1 pav. Plazmocheminio reaktoriaus principinė schema

Eksperimentų metu matuojama plazmos generatoriaus srovė ir įtampa, naudojamas oro ir propano srautai, įrenginį aušinančio vandens kiekis ir pašilimas. Plazmos srauto parametrai nustatomi iš šilumos balanso procese [7].

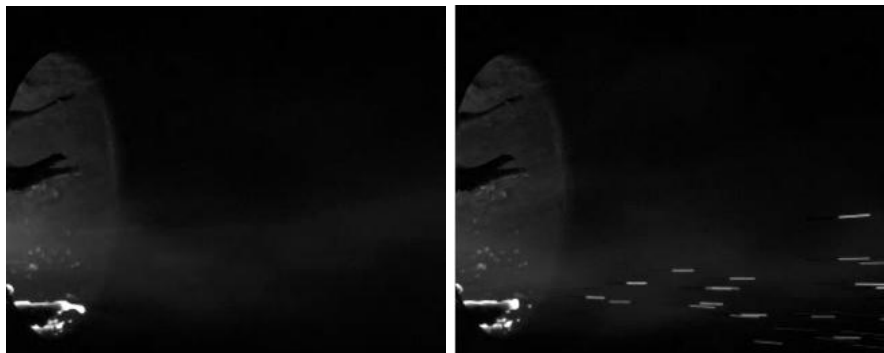
Pluoštinimo proceso vizualizacija buvo vykdoma panaudojant greitaeigę optinę kamerą Phantom Miro M310. Išsilydžiusios žaliavos paviršiaus temperatūra proceso metu buvo matuojama 5 s intervalu pirometru Cyclops C100. Gauti pluošto skaidulų vaizdai ir jų elementinė sudėtis tirti skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM) JSM-5600 ir EDS metodu.

Rezultatų aptarimas. Greitaeigę optinę kamerą buvo siekiama užfiksuoti žaliavos lydymosi ir pluošto formavimosi vaizdus. Tuo tikslu kamera buvo filmuojami vaizdai pro reaktoriaus kameroje įrengtą stebėjimo langą bei per pluošto iškėjimo angą. Pro stebėjimo langą gautuose vaizduose matome, kaip plazmos srautas apiplaudamas žaliavą iš viršaus atplėšia nuo jos lydalo lašelius (2 pav. kairėje) ar net suformuoja lydalo srovelę (2 pav. dešinėje). Išanalizavus vaizdo įrašus pastebėta, kad žaliavos lydymas vyksta visame jos paviršiuje, kuris sąveikauja su karšto oro srautu, tačiau intensyviausiai – viršutinėje dalyje. Greitaeigę kamerą filmuojant lydalo iškėjimo angos aplinkoje, susiformavusių pakankamai didelių pluošto elementų užfiksuoti nepavyko, tačiau angos apačioje matomas ryškus lydalo tekėjimas (3 pav. kairėje), nuo kurio plazmos srauto kinetinė energija atplėšia mažus pluošto elementus (3 pav. dešinėje) ir nukreipia juos į surinkimo vietą.



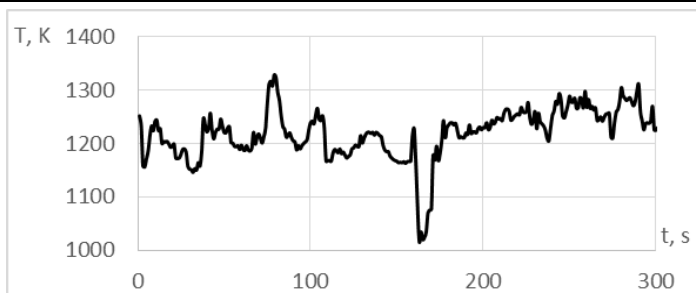
2 pav. Vaizdas pro stebėjimo langą pluošto formavimo metu

Ekspperimentų metu plazmos generatoriaus galia buvo 55 kW, oro srautas – 23 g/s, propano dujų srautas – 0,5 m/s. Tokiomis sąlygomis ištekančios plazmos srauto temperatūra siekė 1890 K, o greitis – 420 m/s. Pluoštinamos buvo dvi suglaustos stiklo juostos, kurių matmenys buvo 4×30 mm. Proceso išeiga, palyginus stiklo juostų svorį prieš eksperimentą ir gautą stiklo pluošto svorį po jo, siekė 80 %.



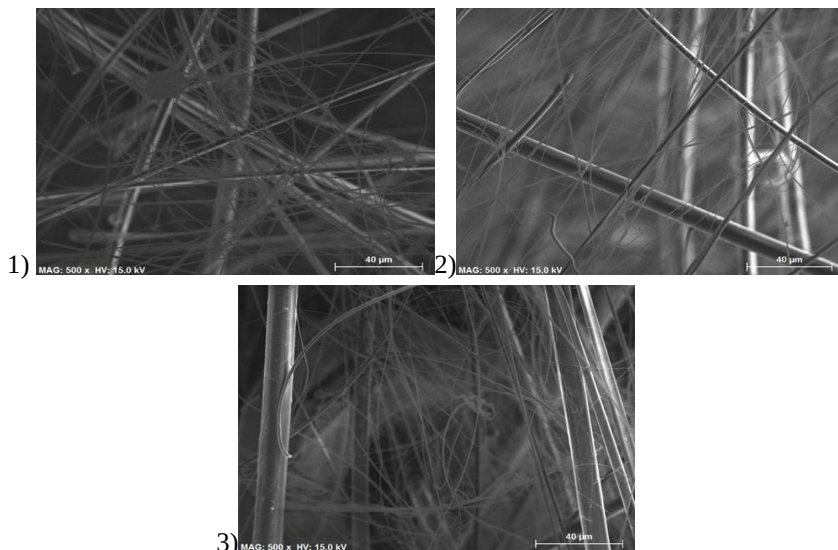
3 pav. Greitaeigė optine kamera gauti vaizdai pluošto išteikėjimo aplinkoje

Lydalo paviršiaus temperatūrai įvertinti pirmoetras buvo nutaikytas į žaliavos lydymosi vietą per pluošto išteikėjimo angą. Matome (4 pav.), kad lydalo paviršiaus temperatūra svyruoja 100 K ribose ir siekia iki 1300 K. Toks nežymus nepastovumas paaiškinamas tuo, kad vyksta lydalo lašelių atplėšimas, po kurio vėl reikia pakaitinti žaliavos paviršių.



4 pav. Stiklo juostų lydalo paviršiaus temperatūra

Toliau aprašomuose eksperimentuose tarp dviejų stiklo juostų buvo įterpiama 1×30 mm matmenų geležies juostelė. Tai buvo daroma norint nustatyti, ar į stiklo pluoštą pavyktų įterpti kitokių, pvz., katalizinių, medžiagų. Be to, pasaulinėje rinkoje pastebimas didelis metalų mikropluošto poreikis, tad, suformavus metalo oksidų puošto elementus ir atskyrus juos nuo stiklo pluošto, būtų galima išplėtoti metodą šiam poreikiui patenkinti.



5 pav. Suformuoto iš stiklo ir metalo juostų pluošto SEM vaizdai. Nuotraukų numeracija atitinka reaktoriaus režimus, pateiktus 1 lenetelėje

Siekiant nustatyti optimalias proceso sąlygas, kurioms esant pluošto sudėtyje gaunama daugiausia geležies, buvo išbandyti 3 skirtingi plazmocheminio reaktoriaus darbo režimai, kurie pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Plazmocheminio reaktoriaus darbo parametrai pluošto formavimo metu

Režimas	1	2	3
Plazmos generatoriaus galia, kW	63	55	45
Oro srautas, 10-3 kg/s	35	35	35
Propano dujų srautas, 10-3 kg/s	0,5	0,5	0,5
Ištekanti plazmos srauto temperatūra, K	1990	1890	1710
Ištekanti plazmos srauto greitis, m/s	450	420	385

Ekspperimentų metu buvo keičiama plazmos generatoriaus galia, kitus reaktoriaus parametrus išlaikant pastoviais. Kadangi pluoštui sudaryti reikia pakankamai kinetinės energijos, plazmą formuojančio oro kiekis nebuvo mažinamas. Esant tokioms sąlygoms, o generatoriaus galiai mažėjant nuo 63 iki 45 kW, ištekanti iš reaktoriaus plazmos temperatūra mažėja nuo 1990 iki 1710 K. Kaip matyti iš 5 pav., gauto pluošto SEM vaizdai yra pakankamai panašūs, pluošto elementų skersmuo yra tarp 5 ir 20 μm , o pluoštas yra kokybiškas, nes jame nėra į pluoštą nesuformuotų lydalo lašelių – granulijų.

2 lentelė. Suformuoto pluošto elementinė sudėtis

Cheminis elementas	1	2	3
Degūnis, %	58,3	58,5	56,2
Silicis, %	24,7	24,5	23,4
Natris, %	8,6	9	7,9
Kalcis, %	3,3	3,4	3,8
Geležis, %	2,5	2,2	2,1
Kalis, %	0,2	0,2	0,2

EDS metodu ištirus gautus pluošto bandinius nustatyta, kad jų elementinė sudėtis beveik nepriklauso nuo plazmos generatoriaus parametrų, tačiau didėjant plazmos srauto temperatūrai, pastebimas nežymus geležies kiekio padidėjimas nuo 2,1 iki 2,5 % (2 lentelė).

Išvados

1. Pluoštinimo metu vidutinė lydalo paviršiaus temperatūra yra nepastovi ir kinta nuo 1000 iki 1300 K, kai plazmos generatoriaus galia 55 kW, o plazmą formuojančio oro srautas 35 g/s.
2. Pluoštinimo proceso analizė greitaėge optine kamera parodė, kad pluoštas formuojamas plazmos srauto kinetine energija, atplėšiant ar ištempiant tinkamą klampumą pasiekusį stiklo lydalą.
3. Kintant plazmos generatoriaus galiai, o oro srautui esant pastoviam, suformuoto stiklo pluošto SEM nuotraukose matome, kad plaušelių forma ir skersmuo nesikeičia.

4. Iš pluošto EDS analizės matyti, kad didėjant plazmos generatoriaus galiai, tarp stiklo juostų įterpus geležies juostas, geležies kiekis gaunamame pluošte didėja.

Literatūra

1. Hočevlar, M.; Širok, B.; Blagojevič, B. Mineral Wool Production Monitoring Using Neural Networks. *International Journal of Information Technology*, 2005, vol. 11, no. 9, p. 64–72.
2. Landes, K. Diagnostics in plasma spraying techniques. *Surface & Coatings Technology*. 2006, vol. 201, p. 1948–1954.
3. Milieška M., Kėželis R., Mėčius V. Keraminių medžiagų lydimas ir jų pluošto sudarymas atmosferinio slėgio oro plazmoje. *Šilumos energetika ir technologijos-2009: konferencijos pranešimų medžiaga*, KTU, 2009 vasario 5-6. Kaunas: Technologija, 2009, p. 263-268.
4. Li, Y., Kuai, P., Huo, P., Liu, C.-J. Fabrication of CuO nanofibers via the plasma decomposition of $\text{Cu}(\text{OH})_2$. *Materials Letters*, 2009, vol. 63, p. 188–190.
5. Grigaitienė V., Kėželis R., Valinčius V., Milieška M. Diagnostic of plasma spray process using high speed imaging and numerical simulation. *15th international symposium on flow visualization (ISFV-15)*, Minsk, Belarus, 25-28 June, 2012. Minsk, 2012, p. 1-7.
6. Kėželis R., Balkevičius V., Kaminskas A. Stiklo atraižų plazminio pluoštinimo proceso pagrindiniai dėsningumai. *Energetika*. 2000, Nr. 4, p. 110-116.
7. Milieška M., Kėželis R., Mėčius V. Influence of gas flow rate on the thermal characteristics of plasma-chemical reactor. *7th annual conference of young scientists on energy issues CYSENI 2010*, Kaunas, Lithuania, May 27-28, 2010. Kaunas: LEI, 2010, p.450-456.

The visualization of the process for production of glass fiber by plasma technology

Summary

This article discusses the production of mineral fibers from glass strips using plasma technology, giving greater emphasis on fiber-forming visualization and thermal parameters of the process. Process visualization is carried out using high-speed optical camera, and surface temperature of the molten material is measured with a pyrometer. The obtained fiber is characterized by SEM and EDS techniques. The fibrillation process parameters during operation were: plasma torch power 45–63 kW, plasma forming air flow rate 35 g/s, propane gas flow rate 0.5 g/s, fiber yield was about 80%.

Kraštinųjų sąlygų įtaka įtempių pasiskirstymui ir deformacijoms akies arterijos skaitiniame modelyje

Edgaras Misiulis, Algis Džiugys, Robertas Navakas
Lietuvos energetikos institutas

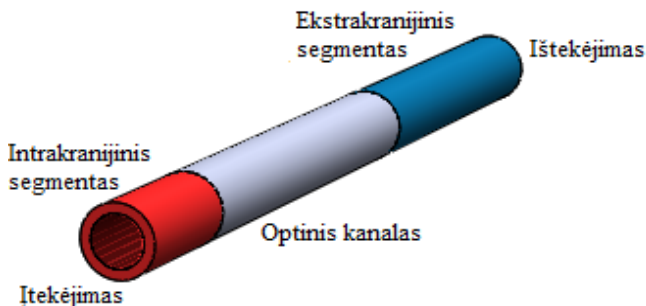
Žmogaus akies arterija yra ypatinga, nes beveik visais iki šiol tirtais atvejais jos skirtingi segmentai yra keliose skirtingose zonose: kaukolės viduje (intrakranijinis segmentas), optiniame kanale ir akiduobėje (ekstrakranijinis segmentas) [1]. Skirtingi segmentai yra veikiami skirtingų slėgių – intrakranijinis *ICP* (intracranial pressure) arba dar kitaip slėgis kaukolėje, ekstrakranijinis gali būti sukurtas papildomu išoriniu slėgiu *Pe* (Pressure external). Kadangi akies arterija yra sąlyginai trumpa (iki 30 mm ilgio), galima teigti, kad jos mechaninės savybės per visą jos ilgį nekis, ir veikiamos papildomo slėgio skirtinguose segmentuose deformuosis vidutiniškai vienodai, vidutinis greitis kis atitinkamai proporcingai, jeigu aplinkos, veikiančios akies arteriją, mechaninės savybės bus panašios [2]. Panaudojus šią akies arterijos savybę, Kauno technologijos universiteto (KTU) mokslininkai, bendradarbiaudami kartu su Lietuvos energetikos instituto (LEI) mokslininkais, sukūrė prietaisą, leidžiantį netiesiogiai matuoti absoliučią intrakranijinio slėgio vertę. Matavimo metu pacientui ant galvos yra uždedama speciali kaukė, kurios dėka kuriamas papildomas išorinis slėgis *Pe* ir matuojamas akies arterija skirtinguose segmentuose tekančio kraujo greitis bei nustatomos bedimensinių palyginamųjų indeksų (BPI) vertės, pvz., PI (pulsacijos indeksas), RI (pasipriešinimo tekėjimui indeksas) ir kiti. Eksperimentiškai įrodyta, kad skirtinguose segmentuose nustatyta artima BPI vertė atitiks sąlygą: $ICP = Pe$ [3].

Šio darbo tikslas yra ištirti kuriamam akies arterijos skaitiniui modeliui daromą kraštinių sąlygų įtaką arterijos mechaninėms deformacijoms, bei įtempių pasiskirstymams.

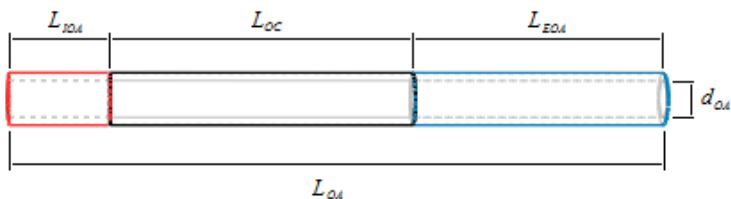
Tikslui įgyvendinti sukurtas trimatis pirminis akies arterijos skaitinis modelis, pasitelkiant COMSOL Multiphysics programinį paketą. Modelyje įskaitoma fluido-struktūros sąveika. Su šiuo modeliu atlikti keturi tyrimai, kurių metu keičiami akies arterijos segmentų ilgiai [1, 4, 5]: a) intrakranijinio: 4 mm; optinio kanalo 12 mm; ekstrakranijinio: 10 mm, b) visų segmentų ilgiai vienodi ir lygūs: 8,667 mm, bei a1), b1) laipsniškai keičiamas slėgis akies arterijos viduje, išorėje palaikomas vienodas slėgis a2), b2) laipsniškai keičiamas slėgis akies arterijos išorėje, viduje palaikomas pastovus slėgis.

Skirtingi akies arterijos segmentų ilgiai a1) ir a2): stacionarus laike uždavinys

a1), a2) akies arterijos segmentų ilgiai: intrakranijinio $L_{IOA} = 4$ mm, optinio kanalo $L_{OC} = 12$ mm, ekstrakranijinio $L_{EOA} = 10$ mm, bendras arterijos ilgis $L_{OA} = 26$ mm; arterijos vidinis skersmuo $d_{OA} = 1.45$ mm, arterijos sienelės storis $d_{OA_{wall}} = 0.29$ mm. Sistemą veikiantis slėgis lygus 1 standartinei atmosferai, absoliutus slėgis lygus sistemą veikiančio slėgio ir pridėtinio slėgio sumai. a1) atveju laipsniškai keičiamas pridėtinis slėgis akies arterijos viduje intervale nuo 40 iki 120 mmHg žingsniu 20 mmHg, išorėje palaikomas vienodas pridėtinis slėgis, kuris lygus 0 mmHg. a2) atveju vidinis pridėtinis akies arterijos slėgis lygus 0 mmHg, išorinis pridėtinis slėgis P_e laipsniškai keičiamas nuo 40 iki 120 mmHg, žingsniu 20 mmHg.



1 pav. Akies arterijos geometrija a1) ir a2) atvejais, kuomet akies arterijos segmentų ilgiai skirtingi

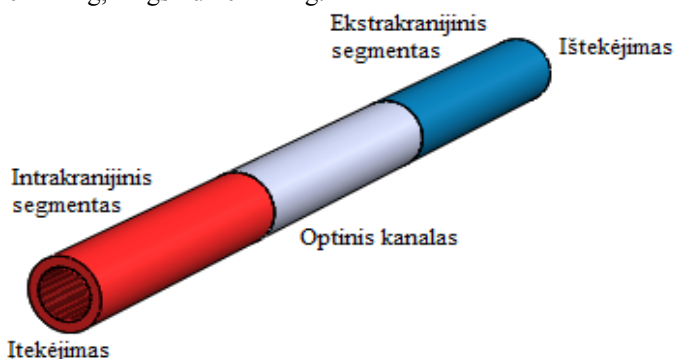


2 pav. a1), a2) geometrijos schema

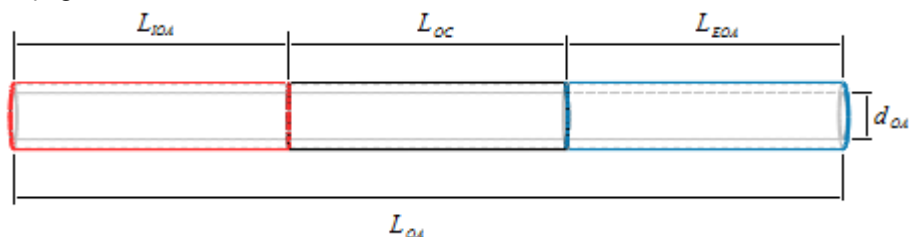
Vienodi akies arterijos segmentų ilgiai b1) ir b2): stacionarus laike uždavinys

b1), b2) akies arterijos segmentų ilgiai: intrakranijinio $L_{IOA} = 8,667$ mm, optinio kanalo $L_{OC} = 8,667$ mm, ekstrakranijinio $L_{EOA} = 8,667$ mm, bendras

arterijos ilgis $L_{OA} = 26$ mm; arterijos vidinis skersmuo $d_{OA} = 1,45$ mm, arterijos sienelės storis $d_{OA_{wall}} = 0,29$ mm. Sistemą veikiantis slėgis lygus 1 standartinėi atmosferai. b1) atveju laipsniškai keičiamas pridėtinis slėgis akies arterijos viduje intervale nuo 40 iki 120 mmHg žingsniu 20 mmHg, išorėje palaikomas vienodas pridėtinis slėgis, kuris lygus 0 mmHg. b2) atveju vidinis pridėtinis akies arterijos slėgis lygus 0 mmHg, išorinis pridėtinis slėgis P_e laipsniškai keičiamas nuo 40 iki 120 mmHg, žingsniu 20 mmHg.



3 pav. Akies arterijos geometrija b1) ir b2) atvejais, kuomet akies arterijos segmentų ilgiai vienodi



4 pav. b1), b2) geometrijos schema

Akies arterijos skaitinio modelio kraštinės sąlygos

Skaitinis modelis sudarytas priimant prielaidas, kad arterijos sienelė homogeniška, izotropiška, nespūdi, ir elgiasi kaip hiperelastinis kūnas [6]. Tariama, kad fluidas yra homogeniškas, mažai spūdis, o klampumas nekinta (Niutoninis skystis) [7].

Atliktuose skaitiniuose tyrimuose a1), a2), b1) ir b2) kraštinės sąlygos buvo užduodamos vienodos, išskyrus išorinės sienelės ir įtekėjimo sąlygas. Toliau (žr. 1 lentelę) pateikiamas kraštinių sąlygų apibendrinimas. Pradinės sąlygos: fluido greitis visomis kryptimis lygus 0, slėgis sistemoje 1 atmosfera, pradinis arterijos sienelės judėjimas visomis kryptimis lygus 0.

1 lentelė. Kraštinės modelio sąlygos

Kraštinė sąlyga	Intervalas (pradinė vertė; kitimo žingsnis; galutinė vertė)	Matavimo vienetai
Įtekėjimas užduodant slėgį a1), b1)	(40;20;120)	mmHg
Ištekėjimas užduodant slėgį a1), b1)	(40;20;120)	mmHg
Intrakranijinis slėgis (ICP) a2), b2)	0	mmHg
Ekstrakranijinis slėgis (Pe) a2), b2)	(40;20;120)	mmHg
Optinio kanalo išorinė sienelė	Neįtvirtinta	-
Vidinės arterijos sienelės (sąlyčio kraštinė sąlyga tarp hiperelastinės arterijos sienelės ir fluído)	$\mathbf{u}_{\text{fluid}} = \mathbf{0}$	-
Fluído skaičiavimo tinklelio įtekėjimo ir ištekėjimo kraštinės sąlygos	Įtvirtinta x ašimi	-

Skaitinio modelio, sudaryto COMSOL programa, sprendžiamos Navje-Stokso lygtys fluidui:

Judesio kiekio lygtis:

$$\rho(\mathbf{u}_{\text{fluid}} \cdot \nabla) \mathbf{u}_{\text{fluid}} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u}_{\text{fluid}} + (\nabla \mathbf{u}_{\text{fluid}})^T)] + \mathbf{F} \quad (1)$$

čia: ρ – fluído tankis, $\mathbf{u}_{\text{fluid}}$ – fluído greičio vektorius, p – slėgis,

∇ – nabla operatorius (šiuo atveju reiškiantis $\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$), $\mathbf{I}$ – vienetinė matrica, μ – dinaminės klampos koeficientas.

Nepertraukiamumo lygtis:

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u}_{\text{fluid}} = 0 \quad (2)$$

Lygtys hiperelastinio kūno sprendimui:

Įtempių lygtis:

$$-\nabla \cdot \sigma = \mathbf{F}_V \quad (3)$$

čia: $\mathbf{F}_V$ – tūrinės deformacijos tenzorius.

Košį įtempių tenzorius:

$$\sigma = \mathbf{J}^{-1} \mathbf{F} \mathbf{S} \mathbf{F}^T \quad (4)$$

čia: $\mathbf{F}$ – deformacijos gradiento tenzorius, $\mathbf{S}$ – antroji Piola-Kirchofo įtempių konfigūracija, – deformacijos gradiento tenzorius determinantas.

$$\mathbf{F} = (\mathbf{I} + \nabla \mathbf{u}_{\text{solid}}) \quad (5)$$

$$\mathbf{J} = \det(\mathbf{F}) \quad (6)$$

$$\mathbf{S} = \frac{\partial W_s}{\partial \boldsymbol{\epsilon}} \quad (7)$$

čia: W_s – elastinės deformacijos energijos tankis.

Neo-Huko modelio mažai spūdžiam kietam kūnui taikoma lygtis:

$$W_s = \frac{1}{2} \mu (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{2} \kappa (J_{el} - 1)^2 \quad (8)$$

čia: μ – antrasis Lamé parametras, κ – pradinis tūrinis tamprumo modulis, $\bar{I}_1$ – izochorinis invariantas (nekintantis), J_{el} – tūrinės elastinės deformacijos determinantas.

$$\boldsymbol{\epsilon} = \frac{1}{2} [(\nabla \mathbf{u}_{solid})^T + \nabla \mathbf{u}_{solid} + (\nabla \mathbf{u}_{solid})^T \nabla \mathbf{u}_{solid}] \quad (9)$$

čia: $\boldsymbol{\epsilon}$ – deformacijos tenzorius.

Skirtinguose akies arterijos segmentuose skirtingos akies arterijos, aplinkos mechaninės savybės ir skaitinio modelio kraštinės sąlygos gali turėti įtakos sąlygai $ICP = P_e$. Tariant, kad akies arterijos ir veikiančios aplinkos mechaninės savybės yra labai panašios, lieka skaitinio modelio kraštinių sąlygų įtaka. Šią įtaką darbe įvardijame ΔP_e . Bendrąją lygtį tuomet galime užrašyti taip:

$$ICP = P_e + \Delta p + \Delta P_e \quad ((10))$$

čia: Δp yra slėgio perkritis tarp matuojamų zonų.

Skaičiavimų tinkelio įtakos rezultatams patikra

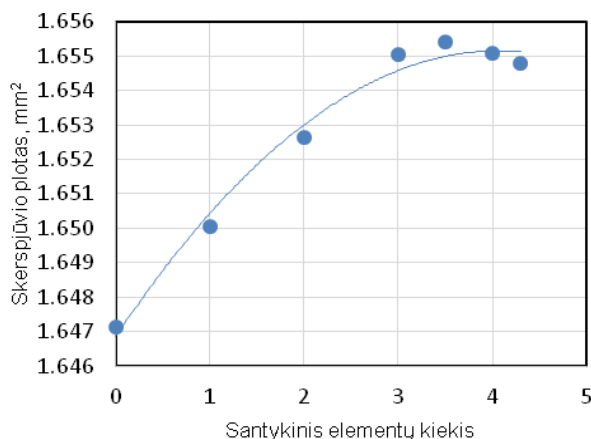
Atlikta skaičiavimų tinkelio (ST) įtakos rezultatams patikra. Pagal pasirinktas eksponentines funkcijas buvo keičiama 15 ST parametrų (žr. 2 lentelė). Pasirinktas nagrinėti atvejis, kai pridėtinis slėgis visuose segmentuose lygus 0. Buvo didinamas ST elementų kiekis pagal santykinį ST elementų kiekį intervale nuo 0 iki 3 žingsniu 1, tuomet iki 4 žingsniu 0,5 ir iki 4,3 žingsniu 0,3, kur 0 atitinka 14696 elementų kiekį ir elementų santykį su tūriu, lygų 0,05157, o 4,3 atitinka 688444 elementų kiekį ir elementų santykį su tūriu, lygų 0,003284. Pasirinktas stebėjimo parametras buvo skerspjūvio plotas, einantis per arterijos centrą.

2 lentelė. ST parametrai

Parametro taikymas	Parametras sistemoje	Funkcija
Arterijos sienelėi	maks. ST elemento dydis	$0.0055e^{-0.374 \cdot m_q}$
	min. ST elemento dydis	$0.0017e^{-0.664 \cdot m_q}$
	maks. elemento didėjimo greitis	$1.9215e^{-0.053 \cdot m_q}$
	kreivumo faktorius	$1.1496e^{-0.191 \cdot m_q}$

	siaurų regionų rezoliucija	$0.1488e^{0.2609 \cdot mq}$
Fluidui	maks. ST elemento dydis	$0.0009e^{-0.359 \cdot mq}$
	min. ST elemento dydis	$0.0004e^{-0.525 \cdot mq}$
	maks. elemento didėjimo greitis	$1.4055e^{-0.036 \cdot mq}$
	kreivumo faktorius	$1.2857e^{-0.167 \cdot mq}$
	siaurų regionų rezoliucija	$0.2891e^{0.1629 \cdot mq}$
Sąsajai tarp arterijos sienelės ir fluído	maks. ST elemento dydis	$0.0004e^{-0.356 \cdot mq}$
	min. ST elemento dydis	$0.000045e^{-0.405 \cdot mq}$
	maks. elemento didėjimo greitis	$1.274e^{-0.027 \cdot mq}$
	kreivumo faktorius	$1.0153e^{-0.205 \cdot mq}$
	siaurų regionų rezoliucija	$0.4591e^{0.1152 \cdot mq}$

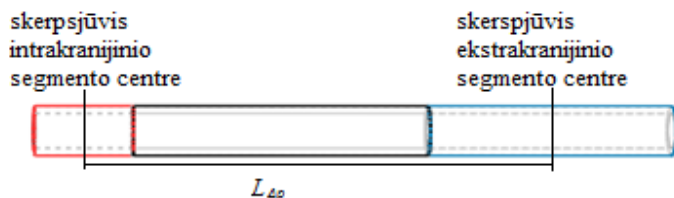
Toliau atlikti akies arterijos įtempių pasiskirstymo ir deformacijos tyrimai, kai santykinis ST elementų kiekis lygus 3.



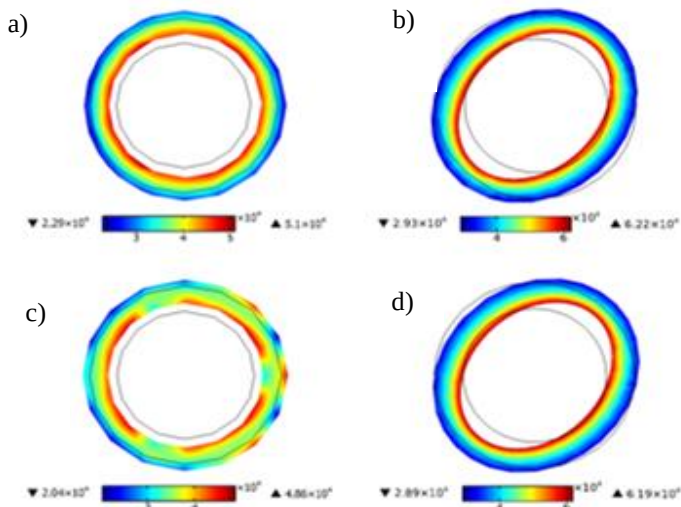
5 pav. Skerspjūvio ploto priklausomumas nuo ST santykinio elementų kiekio

Rezultatai

(7 pav.) pateikiamos akies arterijos sienelės deformacijos ir įtempių vertės skirtinguose segmentuose, veikiant skirtingiems pridėtiniais slėgiams.



6 pav. Rezultatų skyrelyje naudojamų duomenų vizualinis pateikimas

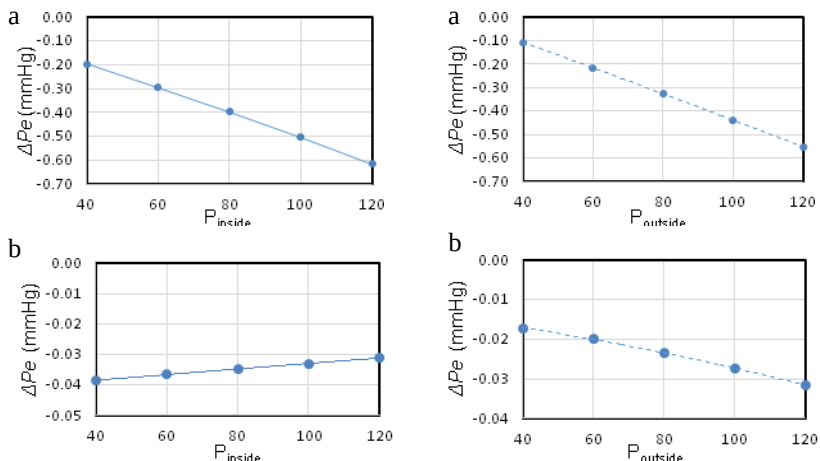


7 pav. Akies arterijos sienelės įtempiai (Pa) ir deformacija, atidėti per segmentų skerspjūvio centrus

(6 pav.), veikiant skirtingiems pridėtiniams slėgiams. Tamsūs apskritimai nurodo akies arterijos pavidalą prieš deformaciją. 7.a) ir 7.c) pav. pavaizduotas skerspjūvio pjūvis, einantis per intrakranijinės dalies centrą atitinkamai a1) ir a2) atvejais, slėgis arterijos viduje lygus 60 mmHg, išorėje 0 mmHg. 7.b) ir 7.d) pav. pateiktas skerspjūvio pjūvis, einantis per ekstrakranijinės dalies centrą atitinkamai b1) ir b2) atvejais, slėgis arterijos išorėje lygus 60 mmHg, viduje 0 mmHg.

Nustatyta Δp reikšmė lygi 1.32 mmHg. Δp atitinka slėgio perkrytį per atstumą $L_{\Delta p}$, kuris tiesiogiai lemia bendrąjį slėgį segmente.

Sprendžiant (10) lygtį nustatyta kraštinių sąlygų įtaka ΔP_e pateikta (8 pav.).



8 pav. Pateiktas tyrimų a1), a2), b1), b2) metu gautas ΔP_e (kraštinių sąlygų įtakos) priklausomumas nuo sistemą veikiančių papildomų pridėtinių slėgių

Išvados

1. Kraštinės skaitinio modelio sąlygos lemia akies arterijos sienelės įtempių pasiskirstymą ir deformacijas. Veikiantis vidinis slėgis priverčia arteriją keisti skersmenį, išlaikant pirminį pavidalą (šio atveju apskritimą). Išorinis slėgis verčia akies arteriją deformuotis į ovalą. Įtempiai abejais atvejais didžiausi yra vidinėje akies arterijos dalyje ir mažėja einant išorinės dalies link.
2. Nustatyta, kad esant geometrinei struktūrai, kai segmentų ilgiai vienodi, gaunamos kraštinių sąlygų įtakos – ΔP_e vertės mažesnės (nuo -0,04 iki -0,016 mmHg), kai P kinta nuo 40 iki 120 mmHg), negu esant skirtingiems segmentų ilgiams (-0,61 iki -0,1, P kinta nuo 40 iki 120 mmHg).
3. Kraštinių sąlygų įtaka akies arterijos sienelių įtempiams aprašoma lygtimi $ICP = P_e + \Delta p$ +, kurios narys ΔP_e kiekybiškai apibūdina kraštinių sąlygų įtaką akies arterijos pavidalui ir įtempių pasiskirstymui.

Literatūra

1. HAYREH, S. S. Orbital vascular anatomy. Eye, 2006, Vol. 20, pp. 1130-1144.
2. RAGAUSKAS, A., DAUBARIS, G., DZIUGYS A. Innovative non-invasive method for absolute intracranial pressure measurement without calibration. Acta Neurochir. Suppl., 2005, Vol. 95, p. 357-361. 2011. Vol. 25. No. 6. P. 2469-2480.

3. RAGAUSKAS, A., MATIJOSAITIS, V., ZAKELIS, R. Clinical assessment of noninvasive intracranial pressure absolute value measurement method. *Neurology*, 2012, Vol. 78, p. 1684-1691.
4. X. LIU IR C. ZHOU, "CT anatomic measurement of the optic canal its clinical significance", 2000.
5. N. KOCABIYIK IR F. YAZAR, "The intraorbital course of ophthalmic artery and its relationship with the optic nerve", *Neuroanatomy*, t. 8, pp. 36-38, 2009.
6. AURICCHIO, F., CONTI, M., FERRARA, A., MORGANTI, S., REALI, A. Patient-specific finite element analysis of carotid artery stenting: a focus on vessel modeling. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 2012.
7. K. AMBARKI IR P. HALLBERG, "Blood Flow of Ophthalmic Artery in Healthy Individuals Determined by Phase-Contrast Magnetic Resonance Imaging," *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, t. 54, No. 4, pp. 2738-2745, April 2013.

Boundary conditions influence on stress distribution and deformations in ophthalmic artery numerical model

Summary

Clinical research has shown that in most case human ophthalmic artery crosses several different zones: one is inside the skull (intracranial), second in the optic canal and third in the eye socket (extracranial). Different pressures affect these segments – ICP (intracranial pressure) affects intracranial part, P_e (Pressure external) affects extracranial part. Since the ophthalmic artery is relatively short (up to 30 mm in length) it is assumed that mechanical properties does not vary across artery's length and pressure acting on different artery segments will deform on average uniformly, and average velocity will change dependently, if the operating environment's mechanical properties are similar. Using these features Kaunas Technology University researchers in cooperation with the Lithuanian Energy Institute researchers have developed a device permitting measurement of absolute intracranial pressure.

The aim of this work is to investigate boundary conditions influence on arterial mechanical deformations and stress distribution in ophthalmic artery numerical model.

It was found that boundary conditions influence on the ophthalmic artery wall stress distribution and deformation could be formulated into equation $ICP = P_e + \Delta p$, where ΔP_e quantitatively describe the boundary conditions influence on the ophthalmic artery.

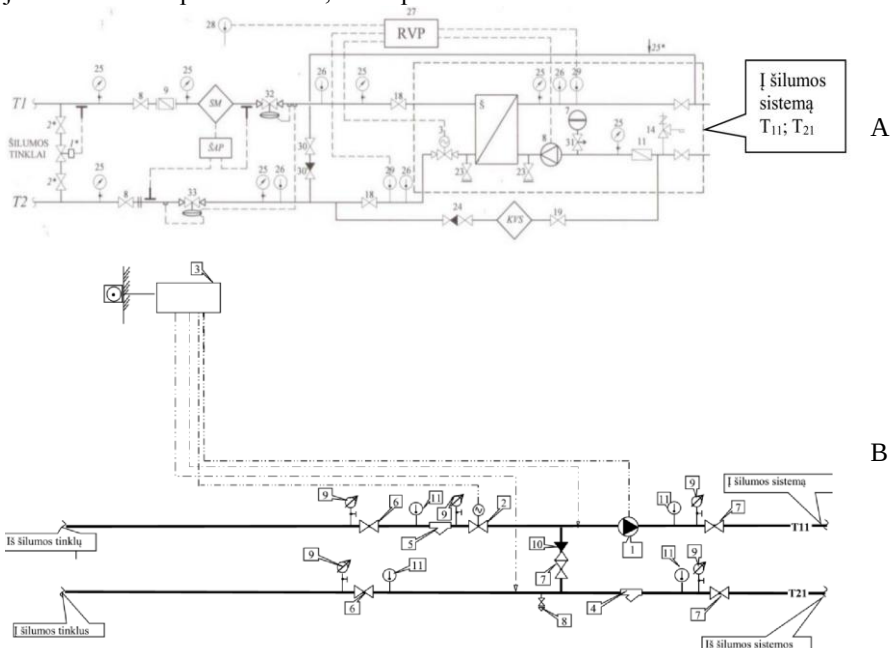
4 ŠILDYMAS, ŠILUMOS TIEKIMAS IR TERMOFIKACIJA

Pastatų šildymo sistemų su individualiais šilumos punktais butuose darbo režimų optimizavimas taikant matematinius modelius

Stasys Šinkūnas, Mantas Morkvėnas, Jozas Gudžinskas, Romaldas Morkvėnas
Kauno technologijos universitetas

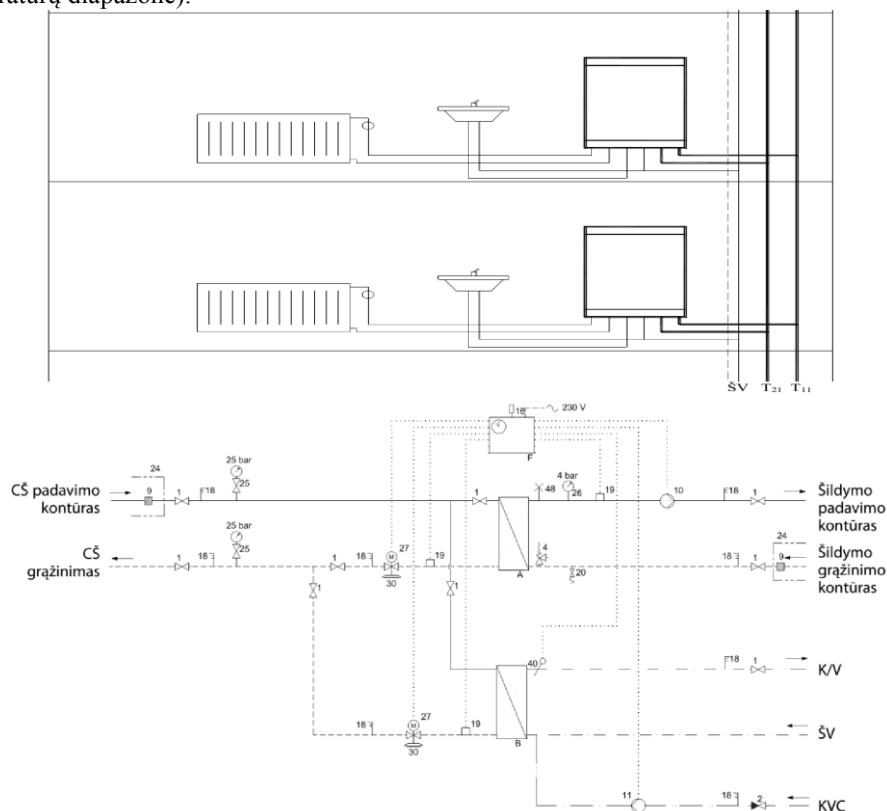
Tyrimo objektas – pastato su individualiais šilumos punktais butuose šildymui ir karštam vandentiekiiui tiekiamos šilumos srauto ir šildymo sistemų darbo režimų valdymo ir automatinio reguliavimo pastato įvade ir butuose probleminiai klausimai, jų sprendimo būdai, pateikiami autorių siūlomi šildymo sistemų darbo procesų valdymo matematinio modeliavimo metodai, kurių pritaikymo galimybės atsiranda pradėjus šilumos įrenginiuose taikyti šiuolaikines technologijas ir įrangą.

Šiame darbe autorių analizuojamos tyrimo objekto schemas ir projektuojamieji darbo režimai pavaizduoti 1, 2 ir 3 paveiksluose.



1 pav. Šilumos sistemos darbo režimų valdymo ir automatinio reguliavimo pastato įvade principinės schemas: A – nepriklausomo jungimo; B – priklausomo jungimo

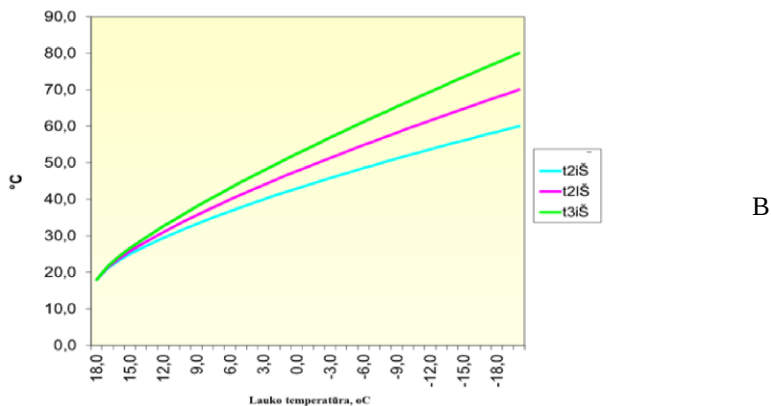
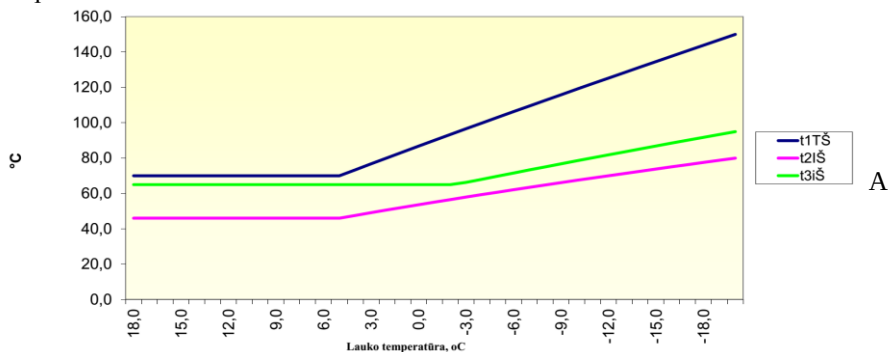
Pastatų šildymo sistemos galia privalo būti projektuojama ir reguliuojama taip, kad būtų užtikrinama patalpų vidaus oro temperatūra t_{in} , esant lauko oro temperatūrai norminėms sąlygomis t_{en} , ir kitu laiku t_e (šildymo sezono lauko oro temperatūrų diapazone).



2 pav. Pastato šilumos sistemos su individualiais šilumos punktais butuose (BIŠP) schemas: A – BIŠP jungimo schema; B – BIŠP darbo režimų valdymo ir automatinio reguliavimo butuose principinė schema

Šiame darbe autorių analizuojamo tyrimo objekto atveju tiekiamo į pastato šilumos sistemą šilumnešio temperatūrą T_{11} automatiškai reguliuoja valdiklyje integruota ir pastato įvadiniame šilumos punkte įrengta **trikdžio kompensavimo** automatinio reguliavimo sistema (1 paveikslas), kuomet valdiklis matuoja lauko oro temperatūrą t_e ir tiekiamo į šilumos sistemos individualius šilumos punktus butuose (toliau – BIŠP) šilumnešio temperatūrą T_{11} (2 pav.), bei atitinkamai keičia šildančio šilumnešio srautą taip, kad būtų išlaikytas lauko oro temperatūros t_e ir tiekiamo į pastato šilumos sistemas (šildymo ir karšto vandentiekio) šilumnešio temperatūros

T_{11} santykis (3A paveikslas) pagal iš anksto nustatytą priklausomumą [1–5], sudarytą vadovaujantis šilumos mainų šildomose patalpose dėsniais grandinėje: šildymo prietaisas – patalpos temperatūra t_{in} – šilumos srautas (nuostoliai) per išorines atitvaras – lauko oro temperatūra t_e . (3B paveikslas), bei poreikiu BIŠP pašildyti karštą vandenį iki higienos normomis nustatytos temperatūros. Kita vertus, maksimalią tiekiamo į BIŠP šilumnešio temperatūrą riboja teisės aktais reglamentuojama leistina vamzdinių, montuojamų gyvenamosios paskirties pastatuose paviršiaus temperatūra.



3 pav. Tiekiamo šilumnešio temperatūrų ir lauko oro temperatūros skaičiuojamieji priklausomumai: A – pastato įvade; B – BIŠP

Tyrimo objekto problemų analizė ir siūlomi sprendimai

Dauguma šiuo metu gaminamų ir naudojamų valdiklių tiek įvadinuose, tiek individualiuose šilumos punktuose butuose (1A, 1B ir 2B pav.) gali realizuoti tik lauko oro t_e ir tiekiamo šilumnešio T_{11} ar t_3 temperatūrų tiesinį priklausomumą.

Šiame darbe autorių analizuojamo tyrimo objekto atveju toks įvadinio šilumos punkto valdiklio darbo režimas praktiškai neturi įtakos visos pastato šilumos sistemos darbui, o toks neatitinkantis projektuojamo ir faktinio priklausomumo tarp lauko oro t_e ir tiekiamo šilumnešio t_3 temperatūrų BIŠP valdiklio darbo režimas turi nemažai įtakos projektuojamai patalpų vidaus oro temperatūrai t_{in} (4 pav.).

Kaip matome iš 4 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 projektinę 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 projektinę temperatūrą t_{in} .

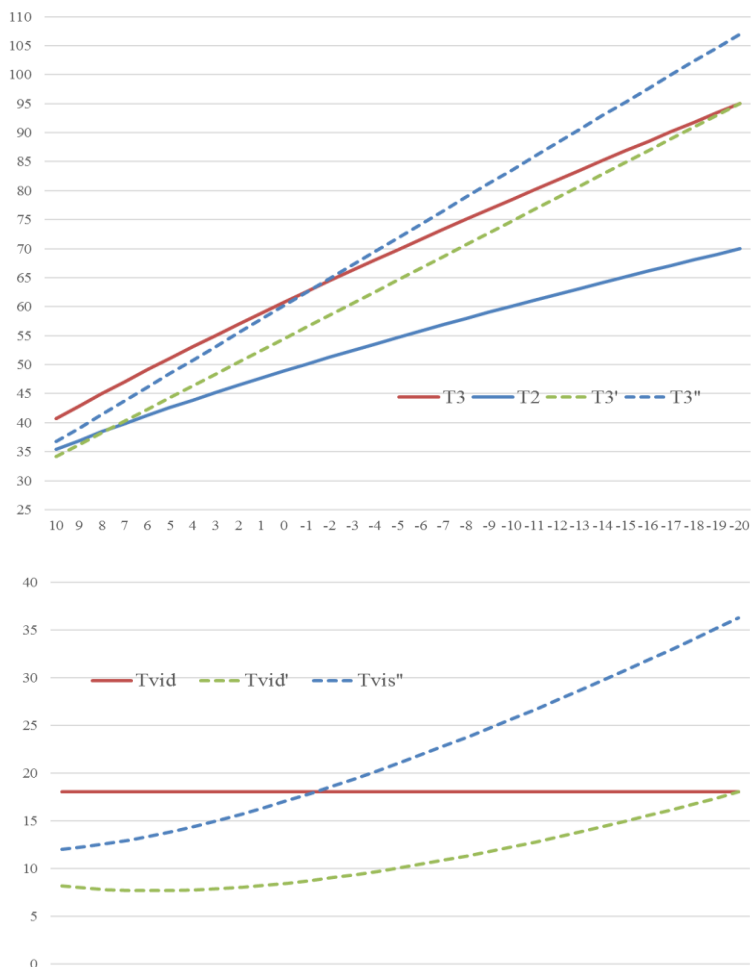
Valdikliai derinami tik keičiant nustatomą pagal poreikius (paprastai eksperimentu, esant tam tikroms atsitiktinėms lauko oro temperatūroms) lauko oro ir tiekiamo šilumnešio temperatūrų santykio (tiesinį) priklausomumą. Tai sudaro prielaidų, kad tam tikruose lauko oro temperatūrų diapazonuose neužtikrinama reikiama patalpų oro temperatūra, net naudojant kiekvieno šildymo prietaiso termostatus.

Šiuo atveju siūlome:

- jei yra numatytos tokios techninės galimybės valdiklyje, skaidyti reguliavimo kreivę į lauko oro temperatūrų sektorius taip, kad kiekviename sektoriuje valdiklio reguliavimo tiesė būtų galimai artimesnė skaičiuojamajai;
- taikyti grįžtamojo ryšio arba kombinuoto tipo ARS;
- naudoti nuotolinio ar vietinio valdymo sistemas (buto savininkui tai nėra sudėtinga atlikti) ir jų dėka pagal lauko oro temperatūrą koreguoti valdiklio parametrus;
- įvesti papildomą modulį, realizuojantį valdiklyje (programinę įrangą) ar jo lauko oro temperatūros matavimo įvade (autorių siūlomas modulis) lauko oro temperatūros ir tiekiamo į šildymo sistemas šilumnešio temperatūros skaičiuojamąjį priklausomumą.

BIŠP valdiklyje realizuojamas lauko oro t_e ir tiekiamo šilumnešio t_3 temperatūrų priklausomumas neįvertina nestacionaraus šilumos mainų proceso (šilumos inercijos) per išorines atitvaras.

Tuo tikslu siūloma įvesti projektuojamos lauko oro temperatūros t_{ep} sąvoką, kuri nuo faktinės momentinės lauko oro temperatūros realiu laiku 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 [2–5].



4 pav. Projektuojami (išsitiesinės linijos) ir faktiniai (punkttyrinės linijos) valdiklyje realizuojami priklausomumai tarp lauko oro t_e ir tiekiamo šilumnešio t_3 temperatūrų, ir jų įtaka projektuojamai patalpų vidaus temperatūrai t_{in}

Projektinės lauko oro temperatūros, įvertinus atitvarų šilumos inerciją, skaičiavimo matematinis modelis yra toks:

$$\begin{aligned}
 T'_e \frac{dt'_e(\tau)}{d\tau} + t'_e(\tau) &= (1 - \sigma) t_e(\tau) \\
 T''_e \frac{dt'_e(\tau)}{d\tau} + t'_e(\tau) &= \sigma t_e(\tau)
 \end{aligned}
 \quad ; \quad (1)$$

čia: t'_e – menama lauko oro temperatūra, kurios kitimo laiko atžvilgiu dėsningumas pakitus t_e atitinka t_3 kitimo dėsningumą, ir yra lygi t_e pasibaigus pereinamajam procesui;

σ – pastato įstiklinimo (langų) ir infiltracijos plotų sumos santykis su jo bendru išorės atitvarų plotu;

T'_e ir T''_e , – koeficientai, atitinkamai nusakantys didelės šiluminės talpos atitvarų (sienų, stogo) ir mažos šiluminės talpos atitvarų (langų, infiltracijos) šiluminę inerciją, skaičiuojami pagal formulę:

$$Te = \frac{C}{\alpha_{snl,e} + \alpha_{snl,i} + \alpha_{snl,e} \alpha_{snl,i} R}, \quad (2)$$

čia: $\alpha_{snl,e}$ – lauko atitvarų išorinio paviršiaus šilumos atidavimo koeficientas;

R – lauko atitvarų šiluminė varža;

C – lauko atitvarų šilumos imlumo koeficientas.

Lauko atitvarų šiluminė varža ir šilumos imlumo koeficientas skaičiuojami pagal šias formules:

$$R = \delta / \lambda; \quad C = \delta \rho; \quad (3)$$

čia: δ – atitvaros storis, m; λ – atitvaros šilumos perdavimo koeficientas, W/(m·°C); ρ – atitvaros medžiagos tankis, kg/m³; C – atitvaros medžiagos šilumos imlumo koeficientas, J/(kg·°C).

Šilumnešio, tiekiamo į šildymo sistemą, temperatūros reguliavimo procesui, pagal šilumos tiekimo reguliavimo grafiką stacionariomis sąlygomis valdyti, įvertinus atitvėrių šiluminę inerciją, būtų galima gavus diferencialių lygčių sprendinius realiu laiku, t. y. esant bet kokiam Δt_I pokyčio pobūdžiui (šuoliškam, harmoningų svyravimų), gauti $\Delta t_I(\tau)$ atitinkamam šilumos tiekimo ir šildymo sistemos darbo laikotarpiui. Tačiau šiuolaikinių BIŠP valdiklių skaičiuoklėms toks uždavinys yra neįveikiamas.

Siūlome skaidyti tolydinį lauko oro temperatūros kitimo procesą į vienetinius šuolinius pokyčius ir pasinaudoti diferencialių lygčių sprendiniu, esant tokiam pokyčiui. Jo išraiška yra tokia:

$$x(\tau) = K(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}); \quad (4)$$

Valdiklyje pagal tokią išraišką būtų atliekami $\Delta t_1(\tau)$ skaičiavimai, kiekvienai atitvėrių grupei ir kiekvienam faktiniam Δt_1 bei realiu laiku sumuojant visus įvykusius atitinkamu darbo laikotarpiu pokyčius.

Bendro sprendinio matematinis modelis yra toks:

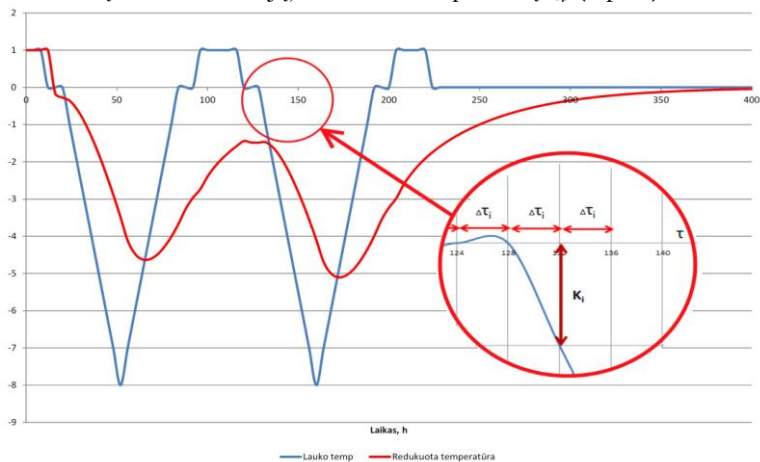
$$t_r(\tau) = \sum_{i=1}^n \left\{ K_i \left[(1 - \sigma) \times \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T^m}} \right) + \sigma \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T^m}} \right) \right] \right\} ; \quad (5)$$

čia: $K_i = t_{i\dot{s}_i} - t_{i\dot{s}_{(i-1)}} = \Delta t_{i\dot{s}_i}$.

Manome, kad toks matematinis modelis gali būti realizuotas šiuolaikiniuose BIŠP valdikliuose. Vadovaujantis šiuo modeliu, autoriai atliko skaičiavimus naudojant standartinę kompiuterinę Excel programą. Kai kurie skaičiavimo rezultatai pateikti 5 ir 6 paveiksluose.

Kaip matome iš 5 ir 6 pav. pateiktų skaičiavimo rezultatų, jeigu valdiklis reguliuoja tiekiamo šilumnešio temperatūrą t_3 , neivertinus išorinių atitvarų šilumos inercijos, faktinė šildomų patalpų temperatūra t_{if} tam tikru dėsningumu nukrypsta nuo projekcinės t_{if} .

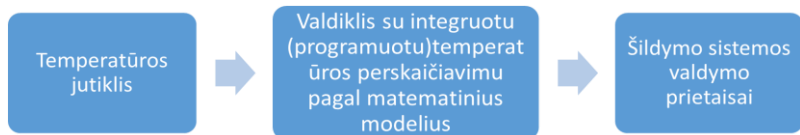
Šiuo atveju problema gali būti sprendžiama BIŠP valdiklyje įdiegus tiekiamo į šildymo sistemą šilumnešio temperatūros projektuojamo priklausomumo (2–5) bei pastato atitvarų šilumos inercijos įvertinimo projektuojamos lauko oro temperatūros t_{ep} skaičiavimo matematinio modelio modulį, atliekantį realiu laiku ir sąlygomis faktinės lauko oro temperatūros t_{ef} perskaičiavimą į projektuojamą (įvertinus pastato atitvarų šilumos inerciją) lauko oro temperatūrą t_{ep} (7 pav.).



5 pav. Projektuojamos, įvertinus atitvėrių šilumos inerciją, lauko oro temperatūros ir faktinės momentinės lauko oro temperatūros kitimo tarpusavio sąsajų grafikas (skaičiavimo pavyzdys)

Nr.	Laikas	Lauko temp.	delta t	delta t red	temp. Red	T3	t3 red	t3 laipsnio rodiklis 1	t3 red, laipsnis 1	Redukuotos lauko oro temperatūros dedamosios																							
1	0,0	1,0		1,00	2,00	58,87	58,87	47,70	48,10																								
2	4,0	1,0	0,00	1,00	2,00	58,87	58,87	47,70	48,10																								
3	8,0	1,0	0,00	1,00	2,00	58,87	58,87	47,70	48,10																								
4	12,0	0,0	-1,00	1,00	2,00	60,75	58,87	48,90	48,10	0,00																							
5	16,0	0,0	0,00	-0,16	1,00	60,75	61,12	48,90	49,42	-0,16																							
6	20,0	0,0	0,00	-0,27	-0,16	60,75	61,30	48,90	49,53	-0,27																							
7	24,0	-1,0	-1,00	-0,36	-0,27	62,60	61,49	50,10	49,64	-0,36	0,00																						
8	28,0	-2,0	-1,00	-0,59	-1,36	64,44	61,86	51,30	49,86	-0,43	-0,16	0,00																					
9	32,0	-3,0	-1,00	-0,92	-2,59	66,25	62,60	52,40	50,30	-0,49	-0,27	-0,16	0,00																				
10	36,0	-4,0	-1,00	-1,32	-3,92	68,05	63,34	53,60	50,74	-0,53	-0,36	-0,27	-0,16	0,00																			
11	40,0	-5,0	-1,00	-1,79	-5,32	69,83	64,07	54,70	51,18	-0,57	-0,43	-0,36	-0,27	-0,16	0,00																		
12	44,0	-6,0	-1,00	-2,32	-6,79	71,59	65,16	55,80	51,84	-0,61	-0,49	-0,43	-0,36	-0,27	-0,16	0,00																	
13	48,0	-7,0	-1,00	-2,88	-8,32	73,34	66,07	56,90	52,39	-0,64	-0,53	-0,49	-0,43	-0,36	-0,27	-0,16	0,00																
14	52,0	-8,0	-1,00	-3,48	-9,88	75,08	67,15	58,00	53,05	-0,67	-0,57	-0,53	-0,49	-0,43	-0,36	-0,27	-0,16	0,00															
15	56,0	-7,0	1,00	-4,12	-11,48	73,34	68,40	56,90	53,82	-0,70	-0,61	-0,57	-0,53	-0,49	-0,43	-0,36	-0,27	-0,16	0,00														
16	60,0	-6,0	1,00	-4,47	-11,12	71,59	68,94	55,80	54,15	-0,72	-0,64	-0,61	-0,57	-0,53	-0,49	-0,43	-0,36	-0,27	-0,16	0,00													
17	64,0	-5,0	1,00	-4,62	-10,47	69,83	69,29	54,70	54,37	-0,75	-0,67	-0,64	-0,61	-0,57	-0,53	-0,49	-0,43	-0,36	-0,27	-0,16	0,00												
18	68,0	-4,0	1,00	-4,62	-9,62	68,05	69,29	53,60	54,37	-0,77	-0,70	-0,67	-0,64	-0,61	-0,57	-0,53	-0,49	-0,43	-0,36	-0,27	-0,16	0,00											
19	72,0	-3,0	1,00	-4,50	-8,62	66,25	69,11	52,40	54,26	-0,78	-0,72	-0,70	-0,67	-0,64	-0,61	-0,57	-0,53	-0,49	-0,43	-0,36	-0,27	-0,16	0,00										
20	76,0	-2,0	1,00	-4,30	-7,50	64,44	68,58	51,30	53,93	-0,80	-0,75	-0,72	-0,70	-0,67	-0,64	-0,61	-0,57	-0,53	-0,49	-0,43	-0,36	-0,27	-0,16	0,00									
21	80,0	-1,0	1,00	-4,01	-6,30	62,60	68,22	50,10	53,71	-0,82	-0,77	-0,75	-0,72	-0,70	-0,67	-0,64	-0,61	-0,57	-0,53	-0,49	-0,43	-0,36	-0,27	-0,16	0,00								
22	84,0	0,0	1,00	-3,67	-5,01	60,75	67,51	48,90	53,27	-0,83	-0,78	-0,77	-0,75	-0,72	-0,70	-0,67	-0,64	-0,61	-0,57	-0,53	-0,49	-0,43	-0,36	-0,27	-0,16	0,00							
23	88,0	0,0	0,00	-3,26	-3,67	60,75	66,79	48,90	52,83	-0,85	-0,80	-0,78	-0,77	-0,75	-0,72	-0,70	-0,67	-0,64	-0,61	-0,57	-0,53	-0,49	-0,43	-0,36	-0,27	-0,16							
24	92,0	0,0	0,00	-2,96	-3,26	60,75	66,25	48,90	52,50	-0,86	-0,82	-0,80	-0,78	-0,77	-0,75	-0,72	-0,70	-0,67	-0,64	-0,61	-0,57	-0,53	-0,49	-0,43	-0,36	-0,27							

6 pav. Projektuojamos, įvertinus atitvėrių šilumos inerciją, lauko oro temperatūros ir faktinės momentinės lauko oro temperatūros kitimo tarpusavio sąsajų skaičiavimo pavyzdys Excel lentelėje



7 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 BIŠP valdiklyje turėtų būti įvertinti:

- pastato išorės atitvarų šilumos inertiškumas, taikant siūlomą projektinės lauko oro temperatūros skaičiavimo matematinį modelį;
- projektuojamasis (dėl natūralios konvekcijos šilumos mainų procesų šildymo prietaiso aplinkoje ypatumų) tiekiamo šilumnešio ir lauko oro temperatūrų priklausomumas;

Šiame darbe pateikiamas 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.
5. Šinkūnas S., Morkvėnas M., Gudzinskas J., Morkvėnas R. Pastatų šildymo sistemų darbo režimo optimizavimas taikant valdymo matematinius modelius. Šilumos energetika ir technologijos, 2015.

Summary

The methodology and recommendations of building heating system parameter optimization were provided in the 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 presented in the article.

Energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonių pastatuose veiksmingumo vertinimas

Vaclovas Kveselis, Eugenija Farida Dzenajavičienė, Aurimas Lisauskas
Lietuvos energetikos institutas

Ivadas. Siekdama darnios energetikos sektoriaus plėtros valstybė, naudodama savo ir įvairių ES bei tarptautinių programų paramos lėšas, įgyvendina priemones, dėl kurių įsipareigojo ES ir Lietuvos Respublikos piliečiams. Supaprastinant, priemonės galima skirstyti į dvi pagrindines grupes:

- Energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonės;
- Platesnis atsinaujinančių energijos išteklių (AEI) naudojimas.

Pagrindinis darnios energetikos tikslas – darni visuomenės raida, kurios pagrindiniai uždaviniai: poreikių tenkinimas, išsaugojant aplinką ir išteklius ateities kartoms, klimato kaitos prevencija, išteklių prieinamumas ir tolygi raida. Tuo tikslu formuojama atitinkama ES ir Lietuvos energetikos ir aplinkosaugos politika, kurios užduotys:

- „Šiltnamio“ dujų emisijų kontrolė;
- Energijos poreikio augimo kontrolė;
- Iškastinių išteklių pakeitimas AEI.

Tačiau šių priemonių įgyvendinimas dažnai yra gana brangus ir todėl remtinas. Kas lemia tokios paramos būtinumą? Vienas argumentų yra tai, kad AEI yra išsklaidyti, todėl jų įsisavinimo sąnaudos yra didesnės negu iškastinių, koncentruotų. Kita priežastis yra tai, kad pasaulyje (nors ne Lietuvoje, kur šie ištekliai yra riboti) vis dar skiriamos milžiniškos dotacijos iškastiniam kurui. Be to, nėra sukurta veiksmingų finansinių priemonių išoriniams taršos kaštams kompensuoti. Ir galiausiai, nors ne mažiau svarbu, yra būtinumas tobulinti technologijas.

Energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonių pastatuose veiksmingumo vertinimo kriterijai. Daugiabučių namų ir viešųjų pastatų energijos vartojimo efektyvumo didinimo ekonominis potencialas priklauso nuo sutaupomos energijos kainos, energijos išteklių kainų ir kainodaros [1] (1 lentelė).

Pirmojoje šio darbo stadijoje nustatyti daugiakriterijiniai priemonių efektyvumo vertinimo rodikliai, tačiau jiems apskaičiuoti reikia daug duomenų kiekio. Patikimi faktiniai duomenys visada yra pati didžiausia problema, su kuria susiduria ekspertai, vertinantys efektyvumo rodiklius. Labai dažnai susiduriama su jų trūkumu, kaip antai, nėra pastatų mikroklimato techninių rodiklių, tokių kaip drėgmė, vidaus temperatūra, CO₂ koncentracija ir pan. matavimų, kitais atvejais nėra fiksuojami net tokie duomenys, kaip išmatuotas šilumos vartojimas. VŠĮ *Būsto energijos taupymo agentūra* pateikia tik skaičiuotinus vartojimo duomenis, nors iš pirmo žvilgsnio atrodo, kad tų duomenų yra pakankamai daug.

1 lentelė. 2008 m. priimtame Energijos efektyvumo veiksmų plane nustatytas ekonominis potencialas

	Galutinis energijos sunaudojimas	Ekonominis taupymo potencialas
	TWh	
Daugiabučiai	9,5*	3*
1–2 butų gyvenamieji namai	13,9*	2,2*
Viešieji pastatai	4,8*	2,5*

*Energijos suvartojimas apskaičiuotas darant prielaidą, kad visose patalpose palaikomos normalios ar artimos joms komforto sąlygos per norminį šildymo sezoną. Šie rodikliai viršija statistikos duomenis, nes dalis kaimo vietovėse vartojamo kuro nepatenka į kuro ir energijos balanso apskaitą. Be to, dalis gyvenamojo ploto visą sezoną nešildoma, jame palaikoma žemesnė už norminę temperatūrą.

Įvertinus esamus duomenis, taip pat faktą, kad skatinimo priemonių efektyvumui vertinti nėra objektyvių duomenų, o paramą teikiančios institucijos vadovaujasi skaičiuotiniais dydžiais, pastatų energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonėms vertinti buvo taikomi šie kriterijai [2]:

•Skatinimo priemonių veiksmingumas:

$$E_n = \frac{Q_{n-1} - Q_n}{POT_{n-1}}; \quad (1)$$

čia: Q_n – sutaupytos energijos kiekis, POT – taupymo potencialas.

Sutaupomos energijos kaina [3]:

$$SEK = \frac{I \times CRF}{DE}; \quad (2)$$

čia: I – investicijos; $CRF = d / (1 - (1 + d)^{-t})$ – investicijų grąžos rodiklis, d – diskonto norma, t – taupymo priemonės tarnavimo laikas, DE – per metus sutaupomos energijos kiekis.

•Išvengtų emisijų kaina:

$$IEK = \frac{I \times CRF}{IE_{CO2ekv}}; \quad (3)$$

čia: $IECO_{2ekv} = DE \times k_{CO2kuro} \times f_{pe}$ – metinės išvengtos emisijos, f_{pe} – kuro pirminės energijos rodiklis.

Pradinio vertinimo rezultatai. Programos veiksmingumas. Viešųjų pastatų atnaujinimą (modernizavimą) skirstome į tris etapus, kurių pirmasis vykdytas 2004–2006 m., antrasis 2007–2013 m., o trečiasis vykdomas (2014–2020 m.) šiuo metu. Pirmojo laikotarpio projektų skaičius nedidelis, 2007–2020 m. rezultatų apibendrinimas pateiktas 2 lentelėje.

2 lentelė. Viešųjų pastatų atnaujinimo programos rodikliai

Periodas	Pastatų skaičius	Plotas	Metinis sutaupymas
	<i>Vnt.</i>	<i>m²</i>	<i>GWh/met</i>
2007–2013	906	1 021 779	215
2014–2020	621	700 000	60
2007–2020	1527	1 721 779	275
Pastatų fondas	13 123	14 800 000	2500
Atnaujintų pastatų dalis	12 %	12 %	11 %

Šios programos įgyvendinimą vargu ar galima būtų pavadinti sparčiu ar net savaikiu, kadangi Energijos vartojimo efektyvumo direktyva [4] reikalauja kasmet atnaujinti po 3 % bendro viešųjų pastatų ploto.

Sutaupomos energijos kaina. Duomenis apie viešosios paskirties pastatų atnaujinimą nacionaliniu, regioniniu, taip pat pastatų, atitinkančių 2004–2006 m. BPD, lygiais mūsų prašymu pateikė Lietuvos verslo paramos agentūra (LVPA), administruojanti ES investicijas. LVPA duomenys apie su ES fondų parama įgyvendintus projektus pateikti 3 lentelėje.

Nors daugelis įstaigų disponuoja ir netgi pateikia savo turimą statistiką, tačiau duomenys, kurie įgalintų korektiškai ir visapusiškai įvertinti įgyvendinamų priemonių efektyvumą, nėra pasiekiami.

Viešųjų pastatų atnaujinimas finansuotas ES Sanglaudos fondų lėšomis. Veiklas pagal šią priemonę santykinai galima sugrupuoti į: 1) įgyvendintas 2004–2006 m. ir 2), įgyvendintas 2007–2013 m. regioniniu lygiu, ir tais pačiais metais nacionaliniu lygiu. Turimų duomenų vertinimas atliktas pagal du kriterijus: sutaupyta energijos kaina, Lt/kWh per vienerius metus; ir finansavimo intensyvumu, %, t. y. santykių tarp LVPA išmokėtos paramos ir visos projekto kainos.

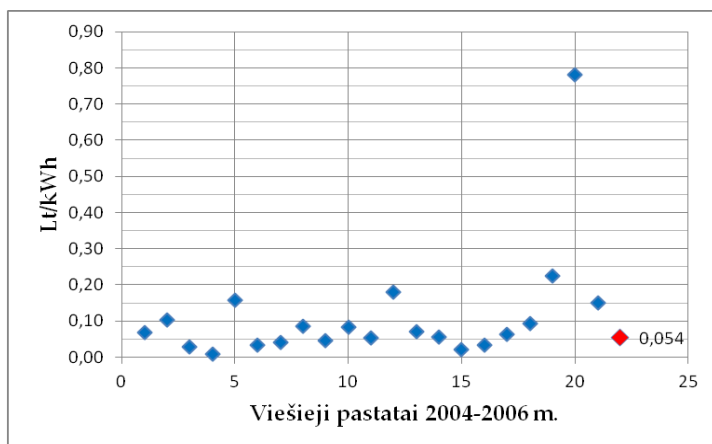
2004–2006 m. pirmajame viešųjų pastatų atnaujinimo etape buvo įgyvendinta 21 priemonė, iš kurių 10 projektų įgyvendinta švietimo įstaigose, 6 sveikatos apsaugos įstaigose ir 5 socialinės paskirties įstaigose (1 pav.). Raudona spalva pažymėtas taškas yra vidutinė svertinė sutaupyta energijos kaina.

3 lentelė. Įgyvendintos viešųjų pastatų atnaujinimo priemonės

Priemonė	Sutarties suma, Lt	Finansavimas, Lt	Išmokėta, Lt	Rodiklio pavadinimas	Matavimo vnt.	Reikšmė
Viešosios paskirties pastatų renovavimas nacionaliniu lygiu	214 456 463	212 060 358	193 391 839	Atnaujintuose viešosios paskirties pastatuose sutaupyta energijos	GWh	131,4
Viešosios paskirties pastatų renovavimas regioniniu lygiu	102 823 818	100 661 781	91 730 158	Atnaujintuose viešosios paskirties pastatuose sutaupyta energijos	GWh	70,29

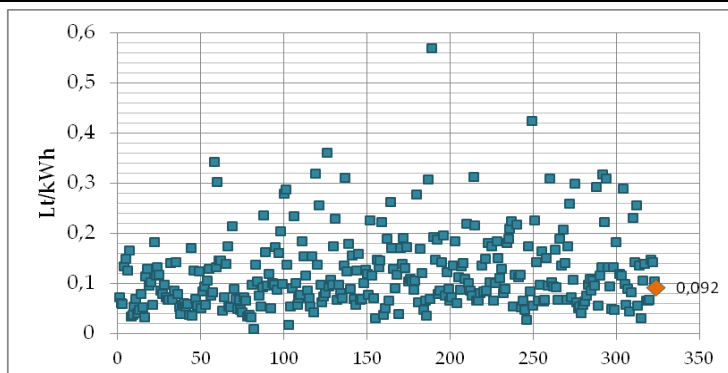
Viešosios paskirties pastatų renovavimo projektai, atitinkantys 2004–2006 m. BPD	12 423 663	12 423 663	11 050 840	Atnaujintuose viešosios paskirties pastatuose sutaupyta energijos	GWh	13,22
--	------------	------------	------------	---	-----	-------

Didžiąjai daliai šių pastatų sutaupytos energijos kaina (17 iš 21) neviršija 0,15 Lt/kWh. Tik keturiuose pastatuose ši kaina yra didesnė. Vidutinė sutaupytos energijos kaina šioje pastatų grupėje yra 0,054 Lt/kWh. Vidutinis finansavimo intensyvumas buvo 92,25 %. Išsiskiria vienas pastatas, kurio sutaupytos energijos kaina yra gana maža, bet pastato finansavimo efektyvumas priartėjo prie 140 %, kas rodo, kad projekto paramos išlaidos gerokai viršijo pradinį lėšų įvertinimą.



1 pav. Sutaupytos energijos kaina viešuosiuose pastatuose, atnaujintuose 2004–2006 m.

Vėlesniu, 2007–2013 m. laikotarpiu įgyvendintų projektų skaičius gerokai didesnis ir skirstomas į du lygius – nacionalinį ir regioninį. Regioniniu lygiu (2 pav.) su ES Sanglaudos fondų parama buvo įgyvendinti 323 projektai. Didžioji jų dalis įgyvendinta švietimo įstaigose – mokyklose, darželiuose (231 projektas). Kiti projektai įgyvendinti sveikatos apsaugos įstaigose (30 projektų), likusieji 62 projektai įgyvendinti socialinės, kultūros, sporto paskirties ir administracinės įstaigose.



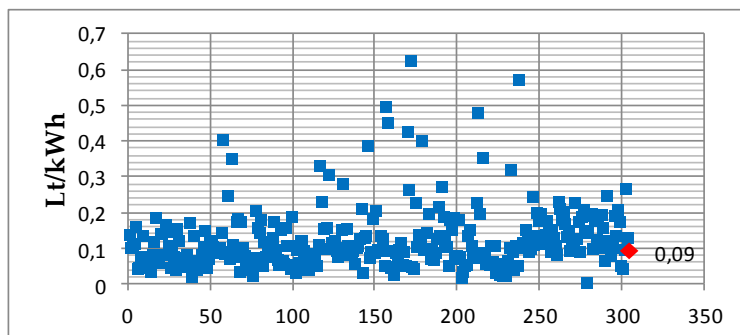
2 pav. ES remtų EE priemonių, įgyvendintų 2007–2013 m. regioniniu lygiu, vertinimas

Čia rezultatų įvairovė didesnė, sutaupytos energijos kaina kinta nuo beveik artimos nuliui iki siekiančios net 0,6 Lt/kWh, tiesa, tokių yra vos keli pastatai. Šį dydį reikia lyginti su perkamos energijos kaina. Jei sutaupytos energijos kaina yra didesnė, ar lygi perkamos energijos kainai, projektas yra neatsiperkantis, nes be maž vienintelis pasiektas tikslas yra, galbūt geresnės klimato sąlygos pastato viduje ir sutaupytos CO₂ emisijos, tačiau yra maža tikimybė, kad šios investicijos atsipirks (nebent ateityje būtų didelis energijos išteklių kainų šuolis). Nors, lyginant su pirmuoju laikotarpiu, vidutinė sutaupytos energijos kaina yra didesnė – 0,091 Lt/kWh, tačiau ji vis dėlto yra mažesnė už vidutinę tuo metu buvusią šilumos rinkos kainą.

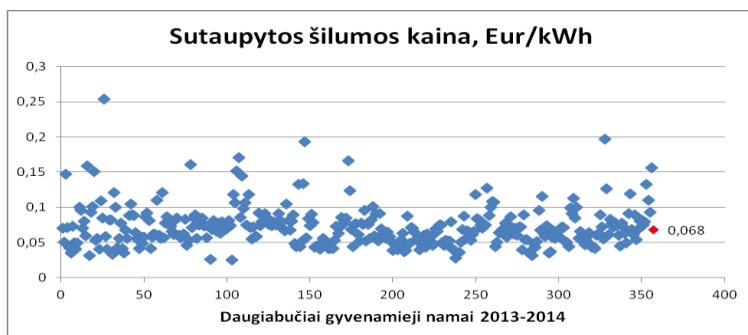
Tuo pačiu laikotarpiu nacionaliniu lygiu buvo įgyvendinti 304 projektai (3 pav.). Taip pat didžioji jų dalis įgyvendinta švietimo įstaigose – universitetuose, kolegijose, mokyklose ir darželiuose (195 projektai). Kiti projektai įgyvendinti sveikatos apsaugos įstaigose (49 projektai), socialinės paskirties (42 projektai) ir viešosios bei administracinės paskirties įstaigose (18 projektų). Šiuose pastatuose stebima dar didesnė rezultatų sklaida. Sutaupytos energijos kaina kinta nuo beveik nulio iki 0,6 Lt/kWh, o šios kainos vidurkis yra 0,09 Lt/kWh.

Vertinant daugiabučių gyvenamuosius namus pasinaudota VŠĮ Būsto energijos taupymo agentūros (BETA) pateiktais duomenimis. Šių duomenų ypatumas yra tas, kad visi su energijos vartojimu susiję duomenys yra apskaičiuoti, o ne išmatuoti, kas nerodo realaus vartojimo ir sutaupymo (4 pav.). Taip pat nėra jokių duomenų apie komforto sąlygas prieš ir po modernizavimo (vidaus temperatūra, drėgmė ir CO₂ koncentracija patalpose), kurie padėtų įvertinti atnaujinimo įtaką vidaus mikroklimato kokybei. Neretai, ypač pirmojoje modernizavimo programoje, buvo apsiribojama minimalaus energijos taupymo priemonių paketo įgyvendinimu, t. y. langų pakeitimu, balkonų įstiklinimu ir sienų apšiltinimu, nesiimant ventiliacijos, šilumos regeneracijos ir kt. Tad pastatų naudotojai dažnai skųsdavosi pelėsiu, gry-

no oro trūkumu ir pan. Naujoji, šiuo metu įgyvendinama programa padidino privalomą priemonių paketą ir iš dalies šiuos trūkumus pašalina.



3 pav. ES remtų EE priemonių, įgyvendintų 2007–2013 m. valstybinių lygiu, vertinimas



4 pav. Sutaupytos šilumos kaina atnaujintuose daugiabučiuose namuose 2013–2014 m.

Skaiciuotinais dydžiais pagrįsta sutaupytos energijos kaina daugelyje projektų yra mažesnė už perkamos šilumos kainą. Vienok, šilumos suvartojimas, apskaičiuotas pagal pastatų energinio sertifikavimo tikslams sukurtą programą, daugeliu atveju yra didesnis už išmatuotą (realų). Nesant duomenų apie patalpose palaikomą temperatūrą, negalima teigti, kad skaičiavimo metodika yra neteisinga, kadangi apskaičiuojant šilumos poreikį joje naudojama norminė patalpų temperatūra.

Apskaičiuotų ir faktinių šilumos sąnaudų skirtumą parodo 4 lentelėje pateikti duomenys iš Kaune renovuotų pastatų. Šie duomenys nėra pakankami statistikai, tačiau gali būti tam tikra indikacija apie skaičiuotinių ir faktinių duomenų nesutapimo lygį.

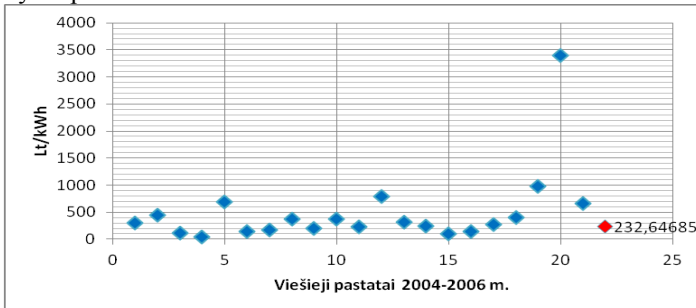
4 lentelė. Duomenys apie su ES parama įgyvendintus projektus Lietuvoje 2007–2013 metais

Eil. Nr.	Faktinės šilumos sąnaudos (3 metų vidurkis)	Skaičiuotinas šilumos poreikis	Skaičiuotinių ir faktinių šilumos sąnaudų skirtumas	Sertifikavimo metai
	kWh/m ²	kWh/m ²	(%)	
1	113,1	172	52%	2008
2	99,5	129	30%	2011
3	66,2	85	28%	2014
4	104,8	171	63%	2009
5	98,2	154	57%	2008
6	104,5	149	43%	2009
7	113,5	141	24%	2009
8	75,7	108	43%	2009
9	166,9	252	51%	2013
10	112,2	144	28%	2009
11	124,1	125	1%	2015
12	85,0	143	68%	2011
13	95,3	147	54%	2014
Vidurkis	104,5	147,7	42%	

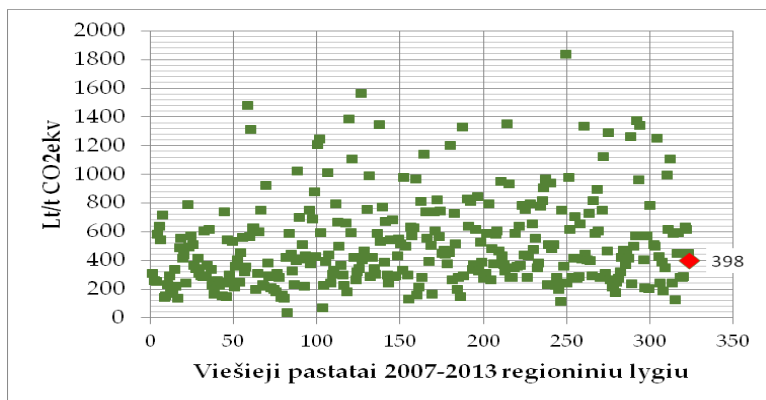
Taip pat reikėtų pažymėti, kad dauguma iš 4 lentelėje pateiktų skaičiavimų buvo atlikti naudojant senesnę sertifikavimo programos versiją. Pagal naujesnę programos versiją neatitikimas gaunamas mažesnis. Pavyzdžiui, 11 numeriu pažymėtas pastatas buvo sertifikuotas 2014 m. ir nesutapimas yra tik 1 %.

Išvengtų emisijų kaina.

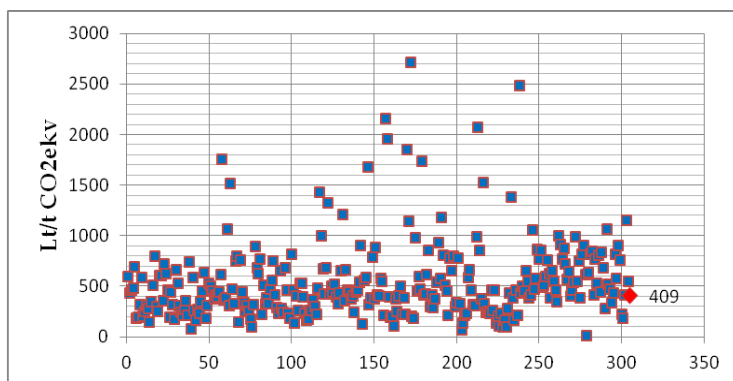
Analogiškai pagal 3 formulę apskaičiuota išvengtų CO₂ emisijų kaina pateikiama 5–6 pav. Nesant duomenų apie naudojamą kurą ir tikruosius emisijų dydžius, skaičiuojant buvo naudojamos gamtinių dujų, kaip tuo metu didžiausią dalį šilumos gamyboje sudarančio kuro, CO₂ emisijų reikšmės. Ši kaina pakankamai aukšta ir parodo, kad šiuo metu pastatų renovavimas nėra veiksminga priemonė mažinant šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas. Kita vertus, tai nebuvo pagrindinis šių investicijų tikslas. Palyginti, 1 t CO_{2ekv} emisijų kaina ATL sistemoje šiuo metu yra apie 7–8 eurus.



5 pav. Išvengtų ŠESD emisijų kaina viešuosiuose pastatuose 2004–2006 m.



6 pav. Išvengtų ŠESD emisijų kaina viešuosiuose pastatuose, modernizuotuose regioniniu lygiu 2007–2013 m.



7 pav. Išvengtų ŠESD emisijų kaina viešuosiuose pastatuose, modernizuotuose nacionaliniu lygiu 2007–2013 m.

Išvengtų ŠESD emisijų kaina yra daug didesnė už ATL sistemos rinkos kainas. Taigi, vien prekybos ATL leidimais sistema negali būti finansavimo pagrindu.

Išvados

1. Skatinimo priemonių efektyvumui vertinti nėra objektyvių duomenų. Paramą teikiančios institucijos vadovaujasi apskaičiuotais dydžiais.
2. Viešųjų pastatų atnaujinimo sparta yra nepakankama, lyginant su tikslu (kasmet atnaujinti 3 % bendro pastatų ploto).
3. Skaičiuotiniais dydžiais pagrįsta sutaupytos energijos kaina daugelyje projektų yra mažesnė už šilumos kainą.

4. Išvengtų ŠESD emisijų kaina daug didesnė už ATL sistemos rinkos kainas. Taigi, vien prekybos ATL leidimais sistema negali būti finansavimo pagrindu.

Literatūra

1. Energijos efektyvumo veiksmų planas. Vilnius, 2008.
2. S. Steinhilber, M. Ragwitz-Fraunhofer, et al. RE-Shaping: Shaping an effective and efficient European renewable energy market. Report: Indicators assessing the performance of renewable energy support policies in 27 Member States. October, 2011.
3. V. Martinaitis, A. Ragoža, I. Bikmanienė. Criterion to evaluate the “twofold benefit” of the renovation of buildings and their elements. Energy and buildings, 36 (2004) 3-8.
4. Directive of the European Parliament and of the Council of Energy Efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU, and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC. 2012/27/ES. 2012 December.

Assessment of effectiveness of energy efficiency measures in buildings

Summary

With regard to improve energy efficiency state forms it's energy strategy and implementation policy, defining promotion and support measures. There is lack of research investigating the effectiveness of implemented actions in terms of environmental and economic criteria. On the other hand, there is lack of objective info for wider research based on measured data. This paper provides initial assessment of energy efficiency improvement in public and bloc residential buildings implemented under programs partly funded by EU funds and Modernization program for multi-apartment houses.

Atsinaujinančių išteklių vartojimo didinimo priemonių vertinimas šilumos gamyboje

Aurimas Lisauskas, Vaclovas Kveselis, Eugenija Farida Dzenajavičienė
Lietuvos energetikos institutas

Įvadas. Lietuvai, kaip ir kitoms ES valstybėms-narėms, būtina įgyvendinti ES Direktyvas, tokias kaip Atsinaujinančių energijos išteklių direktyva 2009/28/EB, Tarybos direktyva 2010/75/ES dėl taršos integruotos prevencijos ir kontrolės (TIPK direktyva), Europos Parlamento ir Tarybos direktyva (ES) 2015/2193.

Viena šiuos tikslus įgyvendinančių priemonių yra iškastinio kuro pakeitimas atsinaujinančiais energijos ištekliais energiją generuojančiuose įrenginiuose. Lietuvoje pagrindinis atsinaujinančios energijos išteklius (AEI) yra biomasė, plačiausiai naudojama šilumai gaminti namų ūkiuose, CŠT sistemose ir pramonėje. Parama investicijoms teikiama CŠT ir pramonės katilinių konversijai, pritaikant jas naudoti biokurą. Tačiau paramos reikalingumas bei finansavimo intensyvumas ne visada yra pagrįstas objektyviais ekonominiais motyvais. Lėšos ir parama dažnai nukreipiama ne energijos vartojimo efektyvumui didinti, o šilumos gamybos kaštams, ir tuo pačiu, šilumos kainoms mažinti, ir ne visada atsižvelgiama į visus darnios plėtros ekonominius, aplinkosauginius ir socialinius aspektus.

Vertinimo kriterijai ir metodai. Dažniausiai AEI technologijų panaudojimo darnumas yra vertinamas kompleksiskai, naudojant daugiakriterinius metodus. Atsinaujinančių energijos išteklių panaudojimas daugeliu atveju vykdomas vietiniu lygiu ir nereikalauja centralizuotos techninės struktūros. Kaip mažos autonominės technologijos, jos gerai integruojamos į regioninės bei vietinės plėtros politiką, strategiją ir planus. Įvertinant autonominį atsinaujinančių energijos išteklių charakterį bei jų prieinamumą, atsinaujinanti energetika gali tapti veiksnium, skatinančiu ekonominę plėtrą regioniniu lygiu. Kiekviena valstybė vertina savo AEI priemonių įgyvendinimo efektyvumą pagal tuos kriterijus, kurie efektyviausiai atskleidžia konkrečios valstybės poreikius ir tikslus.

Su AEI priemonių įgyvendinimu susiję Lietuvos valstybės tikslai yra įvardyti Nacionaliniame atsinaujinančių išteklių energijos veiksmų plane, priimtame 2010 m. [1], ir šie tikslai nustatyti iki 2020 m. Jau 2015 m. LR Energetikos ministerija deklaravo, kad Lietuva viršijo atsinaujinančių energijos išteklių naudojimo rodiklį, nustatytą 2020 m. Deja, derėtų taip pat paminėti ir tai, kad šis rezultatas pasiektas daugiausia investicijomis į biokuro įrengimus CŠT sektoriuje, o elektros energijos ir transporto sektorių plėtra vis dar atsilieka. Transporto sektoriuje AEI dalis per pastaruosius porą metų netgi mažėja [2], tačiau čia įtakos turi visoje ES ir pasaulyje vykstantys procesai. Tokios plėtros vertinimas vykdomas per AEI insta-

liuotų galių ir pagamintos elektros bei šilumos augimą natūriniais dydžiais ir lyginant juos su nustatytais tikslais.

Kitas vertintinas rodiklis yra šiltnamio efektą skatinančių dujų (ŠESD) emisijų sumažėjimas, naudojant įrengtas AEI galias elektros energijai ir šilumai gaminti, palyginti su emisijomis, tą patį kiekį energijos gaminant iškastinį kurą naudojančiose kogeneracinėse jėgainėse ir katilinėse. Įdiegtų priemonių aplinkosauginį efektyvumą rodo CO₂ emisijų sutaupymo kaina, išreikšta €/tūkst. t CO₂ ek./MWh_{el}. Ši kaina apskaičiuojama naudojant VIAP lėšų dalį, mokamą per elektros energijos tarifus už energiją, pagamintą iš atsinaujinančių išteklių.

Kita vertus, taršos integruotos prevencijos ir kontrolės (TIPK) direktyva (2010/75/ES) sugriežtina teršalų, išmetamų iš didelių kurą deginančių įrenginių, maksimalias normas po 2016 m. Šie reikalavimai yra kur kas griežtesni už šiuo metu galiojančias normas: leidina sieros junginių (SO₂) koncentracija dūmuose mažinama 2–5 kartus, azoto oksidų (NO_x) – apie 2–3 kartus, griežtinamos ir kietųjų dalelių išmetimo normos. TIPK direktyvos įgyvendinimas ne tik pareikalaus naujų degiklių esamuose katiluose, bet reikės įdiegti ir gana brangius dūmų valymo technologinius įrenginius mazutą ir gamtines dujas deginančiuose energetikos objektuose. Mažiau teršalų turės būti išmetama ir iš biomasę deginančių katilų, bet tai pasiekti yra paprasčiau, nes jau dabar tokie įrenginiai turi kietųjų dalelių valymo filtrus, o išmetami dūmai gali būti „praplaunami“ kondensaciniuose ekonomaiizuose ar rekuperatoriuose.

Didžiosios elektrinės Vilniuje, Kaune ir Mažeikiuose privalės reikalavimus įgyvendinti ne vėliau kaip 2016 m., nes joms taršos reikalavimų įdiegimo terminas jau buvo atidėtas. Dėl šių reikalavimų reikia daug investicijų į išmetamų teršalų valymo įrengimus, arba, kaip alternatyva, įrengiamos biokuro kogeneracinės jėgainės, kurioms reikėtų dar daugiau investicijų. Antruoju atveju būtų sukurta naujų darbo vietų biokuro gamybos ir tiekimo veiklose.

Jeigu CŠT sektoriuje ir toliau išliktų esami šilumos generavimo įrenginiai ir būtų naudojamas tas pats kuras, tai apskaičiuotas bendras investicijų poreikis užtikrinant TIPK direktyvos reikalavimus yra vertinamas apie 1,98 mlrd. Lt [3].

Vertinant AEI priemones CŠT sektoriuje, taip pat pirmiausiai vertintini vykdyti projektai su ES Sanglaudos fondų parama, instaliuotos galios ir gaminamos energijos kiekiai. Parama investicijoms yra būtent tas faktorius, kuris atvedė sektorių į lyderio pozicijas, siekiant nacionalinių tikslų, įgyvendinant AEI priemones šilumos ir vėsumos sektoriuje. Pasibaigus pastariesiems 2015 m., biokuro dalis CŠT sektoriuje sieks beveik 60 % [4]. Pakankamai efektyviai biokuro projektų plėtra vyksta ir nepriklausomo šilumos tiekimo sektoriuje – pramonėje.

Vertinant paramą investicijoms, įvertintos paramos sumos AEI projektams, naujų įrenginių galios ir pagamintos energijos kiekiai Lietuvoje ir atskirose savi-valdybėse. Atliekant aplinkosauginį įvertinimą, pateiktas gamtinių dujų kuro sumažėjimas ir iš to sekantis šiltnamio dujų emisijų sumažėjimas, pereinant prie bio-

kuro. Tačiau dėl itin griežtų aplinkosauginių reikalavimų Lietuvoje įmonės, įgyvendinusios naujus projektus ir gerokai padidinusios naudojamo biokuro kiekius, susidūrė su rimta problema – pelenais. Šiuo metu katilinėse susikaupė dideli pelenų kiekiai, kurių dėl aplinkosauginių reikalavimų negalima vežti į atliekų sąvartynus [5].

Tarp socialinės naudos vertintinas naujų darbo vietų sukūrimas. Lietuvoje per 10 metų 2004–2014 m. dėl biokuro gamybos ir vartojimo darbo rinkoje sukurta 6,5 tūkstančiai darbo vietų. Įgyvendinus visus planuojamus projektus iki 2020 m. tokių darbo vietų bus sukurta 10 tūkstančių [4]. Deja, šio teiginio neįmanoma nei patvirtinti, nei paneigti, nes teikiant paraiškas paramai investicijoms nėra reikalavimo vertinti konkretaus rodiklio – sukurtų darbo vietų skaičiaus, todėl įmonės, ruošdamos paraiškas ir teikdamos rezultatus šio rodiklio ir nevertina. Vidutinė su ES paramos priemonių įgyvendinimu darbo vietos sukūrimo kaina yra 104–122 tūkst. Lt. Vidutinė vienos darbo vietos kaina, investuojant į infrastruktūrą, siekė apie 116 tūkst. Lt. Investicijos į infrastruktūrą pasižymėjo stipresniu multiplikavimo efektu, todėl vidutinė vienos ilgalaikės darbo vietos kaina čia buvo truputį mažesnė, lyginant su kitais lėšų paskirstymo tipais [6].

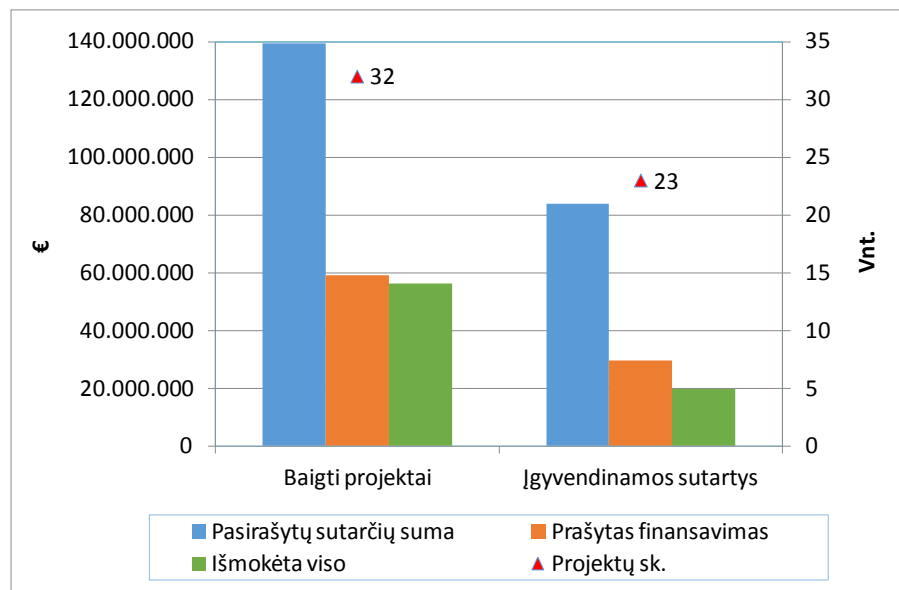
Vertintų projektų rezultatai. Šilumos gamybos sektoriuje atsinaujinantys energijos ištekliai yra didžiaja dalimi biomasė, o individualiuose pastatuose šilumos gamybai dar naudojama saulės ir geotermiškai energija. Pastarųjų naudojimo statistiniai duomenys yra itin riboti ir neprieinami, todėl savo darbe apsiribosime atsinaujinančių energijos išteklių (biomasės) naudojimo efektyvumu centralizuoto šilumos tiekimo sektoriuje, juolab, kad šių priemonių įgyvendinimas per pastaruosius 5 metus itin suaktyvėjo. Šių priemonių įgyvendinimas remiamas ir Europos Sąjungos Struktūrinių fondų lėšomis.

- ▶ Analizuoti projektai finansuoti 2009–2015 m.;
- ▶ Finansavimo šaltinis – Sanglaudos skatinimo veiksmų programa;
- ▶ Surinkti duomenys apie projektus:
 - CŠT sistemose;
 - Pramonės įmonėse;
 - Elektros energijos gamyba iš AEI.

Vykdytų projektų pasiskirstymas pagal technologijas. Lietuva, naudodamasi ES struktūrinių fondų parama, stengiasi sumažinti ekonominį ir socialinį atotrūkį nuo kitų ES šalių. Lietuvos verslo paramos agentūra (toliau agentūra), pavaldi Lietuvos Respublikos Ūkio ministerijai, administruoja struktūrinių fondų paramą šioms sritims: regioninei ir socialinei sanglaudai, energetikai, moksliniams tyrimams ir technologinei plėtrai, verslui, turizmui, kultūros paveldui ir gamtos išsaugojimui.

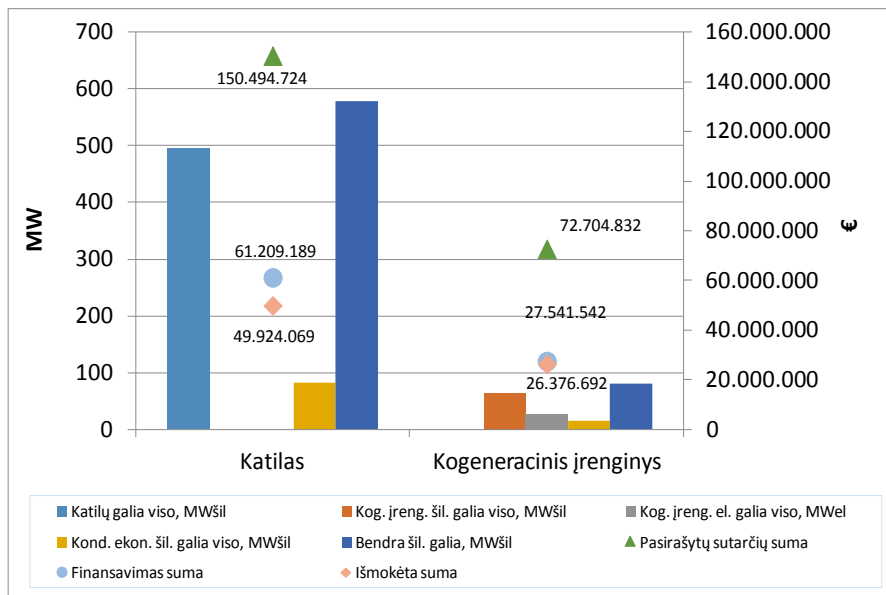
Vykdamas Sanglaudos veiksmų programą nuo 2009 m. pagal agentūros pateiktus duomenis finansuoti 32 ir įgyvendinami 23 projektai atsinaujinančių energijos išteklių panaudojimo šilumai ir elektros energijai gaminti (1 pav.). Šie projektai

vykdyti centralizuotos šilumos tiekimo sektoriuje ir pramonės įmonėse. Pateiktų projektų paraiškų suma viršija 220 mln. €, prašyta parama siekia – 90 mln. €, o gauta – 86 mln. €. Šiuo metu baigtų projektų suma siekia – 140 mln. €, o ES struktūrinių fondų paramos dalis – 56,4 mln. €.



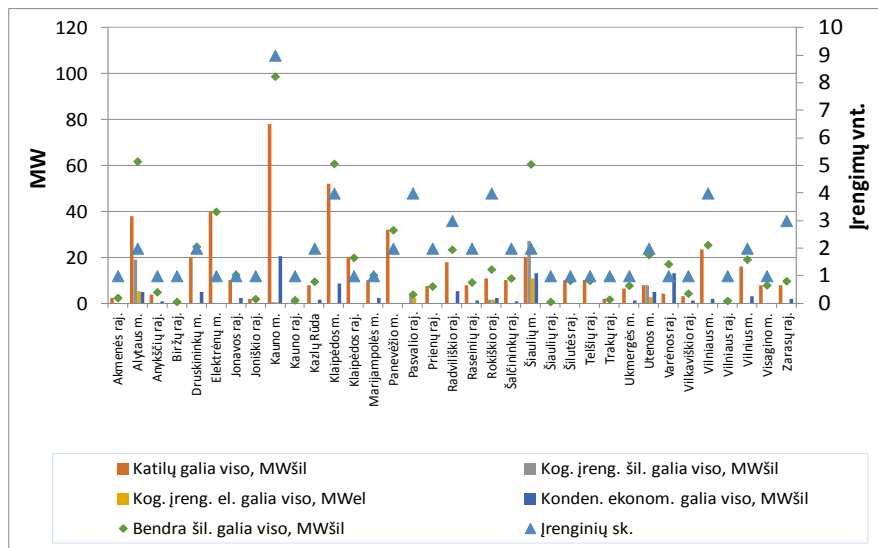
1 pav. Išmokėtos sumos baigtiems ir vykdomiems AEI projektams CŠT sektoriuje ir pramonėje

Finansuojant Atsinaujinančių energijos išteklių panaudojimo energijai gaminti projektus pakeisti 57 seni iškastinių kurų deginantys katilai ir pastatyta 12 kogeneracinių įrengimų. Įdiegtų naujų katilų šiluminė galia siekia 495 MW_{šil} ir 98 MW_{šil} kondensacinių ekonomaizerių, o kogeneracinių įrenginių atitintamai: 64 MW_{šil} ir 26 MW_{el} (2 pav.). CŠT ir pramonės įmonės pagal pateiktas projektų paraiškas prašė finansinės paramos naujiems katilams su kondensaciniais ekonomaizeriais 61,2 mln. € ir gavo 49,9 mln. €, o kogeneraciniams įrenginiams 27,5 mln. € ir gavo 26,4 mln. €. Atitinkamai sutarčių suma siekia 150,5 mln. € katilams ir 72,7 mln. € kogeneraciniams įrengimams.



2 pav. Instaliuotų biomasės katilų, kogeneracinių įrengimų galios ir gautos paramos sumos

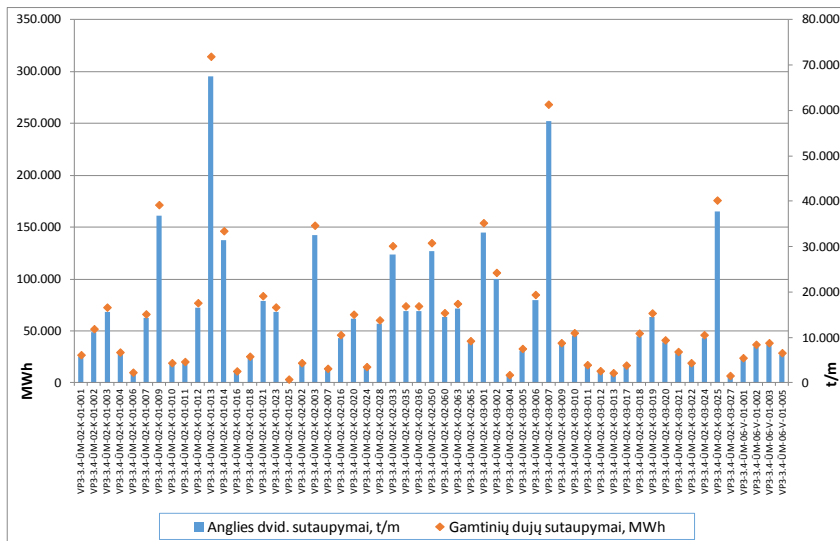
Lietuvos CŠT įmonės ir kiti ūkio subjektai, naudodamiesi ES struktūrinių fondų parama, įsigijo ir sumontavo 12 naujų kogeneracinių įrengimų (3 pav.). Didžiausios kogeneracinių įrenginių galios, siekiančios nuo 8 MW_{šil} ir 2,55 MW_{el}, sumontuotos Šiaulių, Alytaus, Utenos miestuose, o likusieji mažios galios įrengimai sumontuoti Pasvalio, Rokiškio, Šiaulių, Kauno, Biržų rajonuose ir Vilniaus mieste. Vidutiniškai sumontuota po 2 įrengimus savivaldybėse, kurios gavo ES struktūrinę paramą. Naujų įrengimų gausa pasižymi Kauno, Klaipėdos, Vilniaus miestai bei Pasvalio, Rokiškio, Zarasų rajonai. Dauguma finansuotų projektų buvo skirti įrengti vandens šildymo katilus su kondensaciniais ekonomais. Konkurencinių principų pritaikymas CŠT sistemoje, kai šilumos tinklų operatorius yra savivaldybės įmonė, tiekianti energiją vartotojams, nulėmė sąlyginai didelį įrengimų skaičių ir galią, kuri yra tiekama į centralizuotus šilumos tinklus Kauno ir Klaipėdos miestuose. Kaune 9 įrengimai ir 78 MW_{šil} šiluminės galios, o Klaipėdoje atitinkamai 4 vnt. ir 52,4 MW_{šil}. Kondensaciniai ekonomais daugeliu atvejų sumontuoti kartu su vandens šildymo katilais ir didelės galios kogeneraciniais įrengimais.



3 pav. Atsinaujinančios energijos gamybos įrengimų pasiskirstymas pagal savivaldybes

Energetikos agentūros pateiktame įvykdytų projektų sąrašė daugeliu atvejų buvo keičiami seni gamtinėmis dujomis kūrenami įrengimai į naujus biomasės katilus ar kogeracinius įrengimus [20]. Įdiegti biomasės įrengimai sumažins anglies dvideginio išmetimą į apinką kasmet iki 0,78 mln. t/m., o gamtinių dujų suvartojimas sumažės iki 3,5 mln. MWh/m. (4 pav.). Vertinant gamtinių dujų ir biomasės 2015 m. kainų skirtumą finansinis sutaupymas kasmet siektų iki 38,3 mln. €. Anglies dvideginio išmetimų sumažėjimo finansinę naudą vertinti yra sudėtinga, nes CO₂ taršos vienetų kaina priklauso nuo rinkos kainos, ir esant mažai kainai rinkoje, taršos leidimų pardavimas neturės daug įtakos projekto pajamoms.

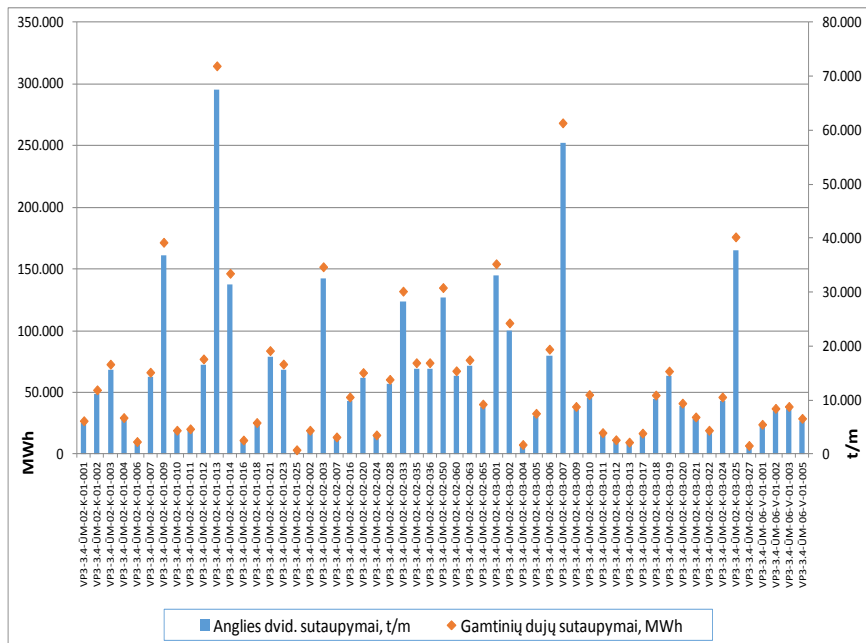
Vykdytų projektų ES paramos finansinis intensyvumas daugeliu atveju neviršija 2 mln. € projektui. Daugumos projektų suma neviršija vidutiniškai 4 mln. €, o gauta parama siekia apie 50 proc.



4 pav. Planuojama sumažinti CO₂, ir sumažėjęs gamtinių dujų vartojimas

Išsiskiria keli projektai: termofikacinės elektrinės Šiaulių, Alytaus, Utenos miestuose ir Pasvalio rajone pramonės įmonėje „Kurana“. Finansinės paramos skirta Šiauliuose statomai elektrinei sudarė – 5,2 mln. €, Alytaus – 3,9 mln. €, Utenos – 4,5 mln. € ir UAB „Kurana“ – 5,2 mln. € (5 pav.). Išskirtinis atvejis yra biomasės katilo įdiegimas Elektrėnuose. Šio projekto vertė siekia net 18,3 mln. €, o skirta ES parama tik 1,4 mln. €. Elektrėnuose vykdytas biomasės katilo įdiegimo projektas yra vienas brangiausių dėl savo didelės 40 MW_{šil} šiluminės galios. Vykdyti projektai bendrai pasidalino 80,5 mln. € finansinės paramos iš Sanglaudos skatinimo veiksmų programos skirtos ES paramos.

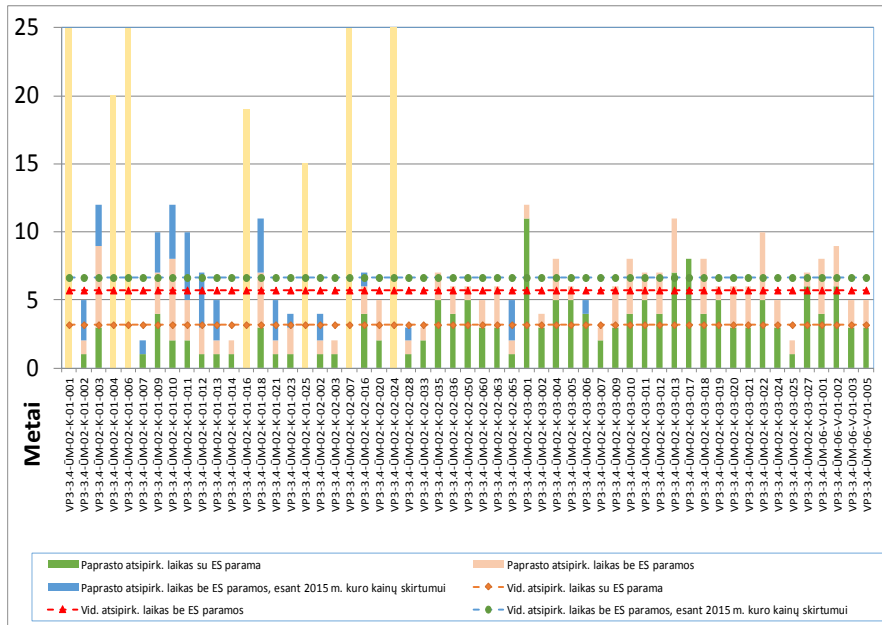
Vertinti projektų atsipirkimo laikotarpius gana sudėtinga dėl trūkstamos informacijos: nėra aišku, kiek energijos jau patiekė ir dar patiekės į ČST sistemą naujai įdiegtas įrengimas; sudėtinga be įmonių pateiktos informacijos išskirti eksploatacijos išlaidas kiekvienam įrengimui atskirai, lyginant su iki tol eksploatuotu įrengimu; nėra viešai prieinama informacija apie paskolos aptarnavimo kaštus, nes kai kurie projektai skirti komercinei veiklai ir tik dalis energijos bus parduota į tinklus ar galutiniams vartotojams.



5 pav. Vykdytų projektų paramos intensyvumas

Įvykdytų projektų paprastas atsipirkimo laikotarpis (toliau atsipirkimo laikas) vertinamas per kiek metų projektas sugebės sugeneruoti investuotą pinigų sumą be paskolos aptarnavimo kaštų, a) dėl gamtinių dujų ir biomasės kuro kainų skirtumo įvertinus gautą ES paramą, b) neįvertinus ES paramos, c) jei būtų negavę ES paramos priėmus 2015 m. kuro kainų skirtumą.

Agentūros perskirstytą ES paramą gavusių projektų pradžia buvo skirtinga ir dalis projektų pradėjo energijos gamybą nuo 2011 m., o kiti tik nuo 2015 m. Eksploatavimo pradžia yra svarbi atsipirkimo laikotarpiams dėl buvusio didelio gamtinių dujų kuro kainų kitimo, ir tuo pačiu biokuro ir gamtinių dujų kainų skirtumo 2011–2014 m. Vertinant projektų atsipirkimo laikotarpius, pašaliname geltonai pažymėtus grafike (6 pav.) – pramonės įmonių, aplinkosauginius, bei projektus, kuriuose energijos gamyba naudojama savo reikmėms. Skaičiavimai rodo, jog projektų, gavusių ES paramą bei pradėjusių gamybą nuo 2013 m., kai kuro kainų skirtumas siekė net 29 €/MWh, atsipirkimo laikotarpis yra mažesnis negu vidutinis projektų atsipirkimas, su ES parama siekiantis 3,2 m. Projektai gavę paramą ir pradėję veiklą nuo 2015 m., esant kuro kainų skirtumui tik 10,8 €/MWh, atsipirkimo laikotarpis siekia 5 ir daugiau metų. Išsiskiria tik vienas Elektrėnų biomasės katilo 40 MW_{šil} projektas, kurio atsipirkimo laikas vertinamas 11 metų.



6 pav. Vykdytų projektų paprastieji atsipirkimo laikotarpiai, metais įvertinus gamtinių dujų ir biokuro kainų skirtumą

Vertinant atsipirkimo laiką be ES paramos, projektų vidutinis atsipirkimo laikotarpis siekia 6 metus. Šį atsipirkimo laikotarpį viršija projektai, pradėję tiekti energiją galutiniams vartotojams 2015 m., kai kuro kainų skirtumas beveik tris kartus mažesnis negu 2013 m.

Projektai negavę finansinės paramos ir esant kuro kainų skirtumui 10,8 €/MWh (2015 m.), vidutiniškai atsipirktų per beveik 7 metus. Mažesnis kuro kainų skirtumas prailgintų atsipirkimo laiką projektams, pradėtiems eksploatuoti 2012–2014 m., o vėlesnių projektų atsipirkimo laikas liktų tas pats.

Išvados

1. Vertintini projektų paprasto atsipirkimo laikotarpiai a) suteiktus ES paramą, b) negavus ES paramos ir c) esant 2015 m. kuro kainų skirtumui be ES paramos.
2. Dauguma projektų būtų atsipirkę ir be ES paramos per mažesnę nei 10 metų laikotarpį dėl gamtinių dujų ir biomasės kainų skirtumo.
3. Projektų, gavusių paramą, vidutinis paprastasis atsipirkimo laikotarpis siekė 3,2 m.

4. ES parama suteikė galimybę mažinti šilumos kainą galutiniams vartotojams. Parama vertinama kaip teigiamas socialinis aspektas.

Literatūra

1. Nacionalinis atsinaujinančių išteklių energijos veiksmų planas. Vilnius, 2010.
2. EM 2015-10-20 pranešimas, kad Lietuva jau viršijo atsinaujinančių energijos išteklių naudojimo rodiklį, nustatytą 2020 metams.
3. Energetikos ministerija. (2009). Šalies savivaldybėse esamų atsinaujinančių energijos išteklių (biokuro, hidroenergijos, saulės energijos, geoterminės energijos) ir komunalinių atliekų panaudojimas energijai gaminti. LEI, galutinė ataskaita.
4. V. Ramanauskas. Biokuras Lietuvos energetikoje. Lietuvos biomasės energetikos asociacijos LITBIOMA pranešimas seminare „Biokuras Lietuvos energetikoje: kur plėtros ribos“. Lietuvos mokslų akademija, Vilnius. 2015-10-29.
5. K. Buinevičius. Biokuras Lietuvos energetikoje. UAB „Enerstena“ Mokslinių tyrimų ir vystymo centro pranešimas seminare „Biokuras Lietuvos energetikoje: kur plėtros ribos“. Lietuvos mokslų akademija, Vilnius. 2015-10-29.
6. BPD vertinimų apžvalga. LR finansų ministerija ir UAB „Ekonominės konsultacijos ir tyrimai“, 2010.

Assessment of the actions to increase the use of RES in heat generation

Summary

There is often lack of objective data for assessment of the effectiveness of support. Info on biomass conversion project is disseminated by Lithuanian Business Support Agency, however, information on operation of installations, amounts of replaced fossil fuel, use of RES is available on company level only. This paper presents the initial assessment of the effectiveness of RES technologies development in heat generation, when projects implementation is supported by Lithuanian and EU funds.

TURINYS

1. ATSINAUJINANTYS ENERGIJOS IŠTEKLIAI IR BIOSFEROS APSAUGA

Rimvydas Ambrulevičius

Kietų dalelių emisijų matavimo gravimetriniu metodu taikymo ypatumai deginant biokurą 3

Valentinas Klevas, Lina Murauskaitė

Dalinio šilumos pasigaminimo savoms reikmėms panaudojant dujinį absorbcinį šilumos siurbį priešprojektinis ekonominis vertinimas 7

Jolita Baranauskienė, Kęstutis Buinevičius

Biokuro vandens šildymo katilo korozijos priežasčių tyrimas 13

Jolita Mockuvienė, Kristina Romančikaitė

Šiaudų kuro generuojamos katilo paviršių taršos priežasčių tyrimai 19

Ignas Ambrazevičius, Adolfas Jančauskas, Gediminas Kabišius

NO_x susidarymo, deginant baldų gamybos atliekas, tyrimai 26

Simas Klenauskis, Gediminas Kabišius

Ciklono skaitinis tyrimas, skirtas kietosioms dalelėms valyti dūmuose 34

Giedrius Gecevičius, Antanas Markevičius

Vėjo elektrinių parkų Baltijos šalyse efektyvumo tyrimas 41

Juozas Savickas, Vladislovas Katinas, Marijona Tamašauskienė

Biodujų ir biodegalų išteklių panaudojimo didinimo galimybių analizė 47

Dominykas Pabarčius, Titas Sereika, Kęstutis Buinevičius

Ekspperimentinių kietojo biokuro deginimo tyrimų analizė 53

Rolandas Paulauskas, Algis Džiugys, Nerijus Striugas

Granuliuotos biomasės terminės deformacijos pirolizės aplinkoje mechanizmas 60

Mantas Rubežius, Kęstutis Venslauskas, Žygimantas Kidikas

Žolinių energinių augalų naudojimas naftos angliavandeniliais užterštiems dirvožemiams valyti 68

Deimantė Čepauskienė, Nerijus Pedišius, Mantas Valantinavičius

Kuro, gaminamo iš medienos ir agromasės, pelenų lydumo tyrimas 73

2. BRANDUOLINĖ ENERGETIKA**Arvydas Galinis, Vidas Lekavičius**Kas neįvertinama nagrinėjant branduolinės energetikos perspektyvas
Lietuvoje? 80**Tadas Kaliatka, Hiroyasu Mochizuki**

Modeling of Station Blackout Accident in ABWR Reactor 89

Gintautas PoškasRadiologinio užteršimo vertinimas RBMK-1500 reaktoriaus kontrolės
ir apsaugos kanaluose 98**Liutauras Vasiliauskas, Linas Paukštaitis**

Naujos konstrukcijos ABWR kuro rinklės skaitinis tyrimas 104

3. ŠILUMOS IR MASĖS MAINAI**Nerijus Rinkevičius, Gintautas Miliauskas**Biokuro dūmų šilumos utilizavimo specifiška ir pernašos procesų
rekuperaciniuose kondensaciniuose ekonomizeriuose pažinimo
poreikis 113**Monika Maziukienė, Gintautas Miliauskas**Drėgno oro sraute slystančių vandens lašelių kondensacinio fazinių
virsmų režimo savitumai 120**Virginijus Ramanauskas, Gintautas Miliauskas**Išpurškiamo vandens parametrų įtaka lašelių šilumos ir masės mainams
biokuro dūmų šilumos utilizavimo technologijose 132**Mindaugas Aikas, Romualdas Kėželis, Mindaugas Milieška, Rolandas Uscila,
Viktorija Grigaitienė**Mineralinio pluošto gamybos iš stiklo juostų, panaudojant plazminę
technologiją, proceso vizualizacija 140**Edgaras Misiulis, Algis Džiugys, Robertas Navakas**Kraštinių sąlygų įtaka įtempių pasiskirstymui ir deformacijoms akies
arterijos skaitiniame modelyje 146

4. ŠILDYMAS, ŠILUMOS TIEKIMAS IR TERMOFIKACIJA

Stasys Šinkūnas, Mantas Morkvėnas, Juozas Gudžinskas, Romaldas Morkvėnas

Pastatų šildymo sistemų su individualiais šilumos punktais butuose darbo režimo optimizavimas taikant matematinius modelius 155

Vaclovas Kveselis, Eugenija Farida Dzenajavičienė, Aurimas Lisauskas

Energijos vartojimo efektyvumo didinimo priemonių pastatuose veiksmingumo vertinimas 164

Aurimas Lisauskas, Vaclovas Kveselis, Eugenija Farida Dzenajavičienė

Atsinaujinančių išteklių vartojimo didinimo priemonių vertinimas šilumos gamyboje 173