

Biomasės ir atliekų dujinimo tyrimai Lietuvoje: esama būklė ir ateities perspektyvos

Nerijus Striugas,

Anupras Šlančiauskas,

Kęstutis Zakarauskas,

Giedrius Stravinskas,

Rolandas Paulauskas,

Lina Vorotinskienė

*Lietuvos energetikos institutas,
Degimo procesų laboratorija,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas
El. paštas Nerijus.Striugas@lei.lt*

Lietuvoje biomasės dujinimo praktinis pritaikymas nėra žinomas. Lietuvos energetikos instituto (LEI) mokslininkai jau daugelį metų dirba biomasės ir kitų atliekų dujinimo srityje, sukūrė naudotų padangų dujinimo technologiją kalkėms gaminti, atliko kietų organinių atliekų, glicerolio dujinimo ir deginimo, biomasės dujinimo metu gautų dujų katalitinius valymo nuo dervų lašelių mokslinius tyrimus, sukūrė ir pramonėje plačiai pritaikė skystojo ir dujinio kuro deginimo įrenginius. Turima patirtis leido sukurti biomasės ir atliekų dujinimo technologiją, kurios pagrindinis uždavinys – biomasės dujinimo metu generuoti dujas, skirtas technologiniams procesams.

Šiame straipsnyje pateikiama pastarųjų dešimties metų LEI Degimo procesų laboratorijoje atliktų tyrimų apžvalga ir gauti pagrindiniai rezultatai vykdant eksperimentinius įvairios biomasės ir atliekų dujinimo tyrimus. Vykdytais darbais sukurti nesmulktintų naudotų padangų, granuluotos biomasės ir atliekų, taip pat sausinto nuotėkų dumblo dujinimo įrenginių prototipai. Gautos naujos mokslinių tyrimų žinios apie generuotų dujų sudėtį, jų kaloringumą ir fizikines savybes. Nustatytas įvairios biomasės ir atliekų dujinimo dėsningumas ir optimalios sąlygos, kurioms esant sukurta prototipu galima gauti kaloringiausias dujas. Surastos technologijos konstravimo ypatybės, valdymo savybės ir suformuluoti pasiūlymai didesnės galios įrenginiui. Įvardytos tolesnio įrenginio tobulinimo gairės. Straipsnyje įvertinama dujinimo technologijos dabartinė situacija ir perspektyvos Lietuvoje.

Raktažodžiai: biomasė, nuotėkų dumblas, naudotos padangos, dujinimas, sintetinės dujos, šilumos ir elektros gamyba

IVADAS

Vystantis bioenergetikai Lietuvoje kasmet vis daugiau sudeginama ir kietojo biokuro. Medienos kuro deginimas mūsų šalyje išplito dėl jo pigumo ir didelių taršos nuolaidų skatinant vietinio atsinaujinančio kuro naudojimą. Geros kokybės medieną nesunkiai galima sudeginti ekologiškai ir

efektyviai. Šiam kurui deginti daugiausia naudojama ardyninė pakura. Didesnės galios katilai turi verdančio sluoksnio tipo pakuras. Tačiau kokybiškos medienos kurui ilgai pradžiai pradės trūkti, atsiradus daugiau atliekinės biomasės ar kitų organinių atliekų, kurių tiesioginis deginimas sukels daugiau rūpesčių nei naudos. Viena iš galimybių tokioms atliekoms utilizuoti ir šilumai bei elektrai gaminti

yra dujinimas (angl. *gasification*). Dujinimas nėra deginimas, tai terminis žaliavos skaidymas iki paprasčiausių dujinių junginių – anglies monoksido, vandenilio, metano ir pan. Šios dujos toliau gali būti naudojamos tiesiogiai deginti, šilumai ir elektrai gaminti ar chemijos pramonei.

Lietuvoje biomasės dujinimo praktinis pritaikymas nėra žinomas. Juolab ir pagrindinius tyrimus šioje srityje atlieka nedidelė grupė mokslininkų. Matydami problemas ir ateities perspektyvas LEI Degimo procesų laboratorijos mokslininkai nuo 2004 m. ėmė tyrinėti organinių junginių turinčių atliekų dujinimo technologijas. Pirmųjų tyrimų užuomazga tapo darbas drauge su AB „Naujasis kalcitas“, kuriame bendrai buvo kuriama nesmulkintų naudotų padangų dujinimo technologija siekiant pritaikyti generatorines dujas kalkių deginimo krosnyje ir taip sumažinti priklausomumą nuo gamtinių dujų bei atpiginti kalkių gamybą. Lygiagrečiai bandymams su kietosiomis medžiagomis, tyrinėtas ir skystųjų atliekų, būtent biodyzelino gamyboje gaunamo glicerolio, panaudojimas dujinimui [1, 2].

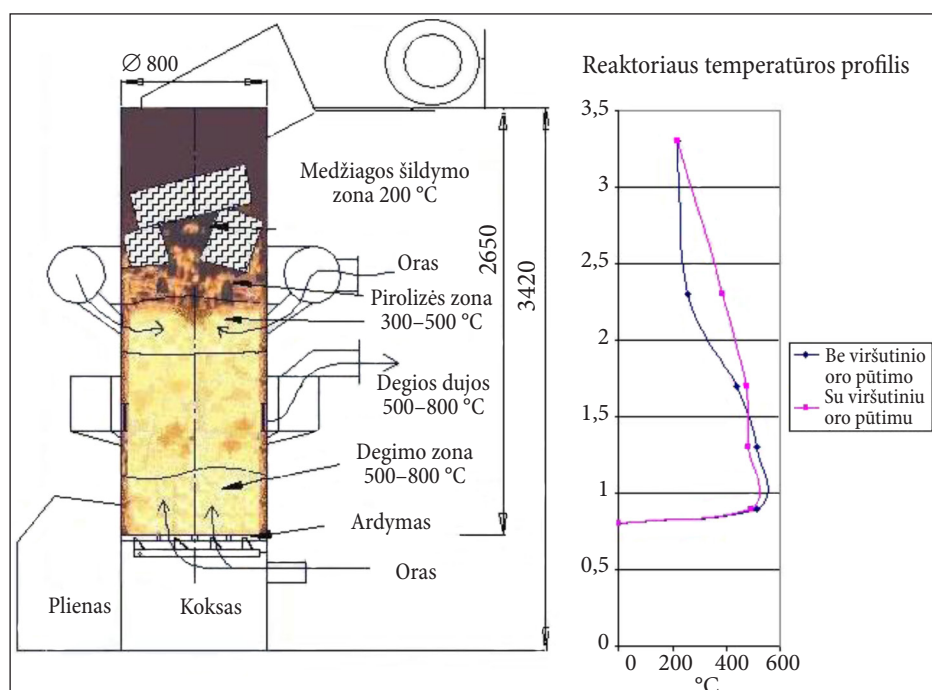
Tęsiant dujinimo procesų tyrimų kryptį, vykdyti dar trys dideli projektai, kurie sprendė atskiras dujinimo proceso problemas: šilumos rekuperavimo ir deginimo įrenginių sukūrimą siekiant pakeisti gamtines dujas žemo kaloringumo dujomis [3], biomasės dujinimo proceso optimizavimą kaloringoms

dujoms gaminti [4] bei sausinto nuotėkų dumblo terminio skaidymo technologijos sukūrimą [5, 6].

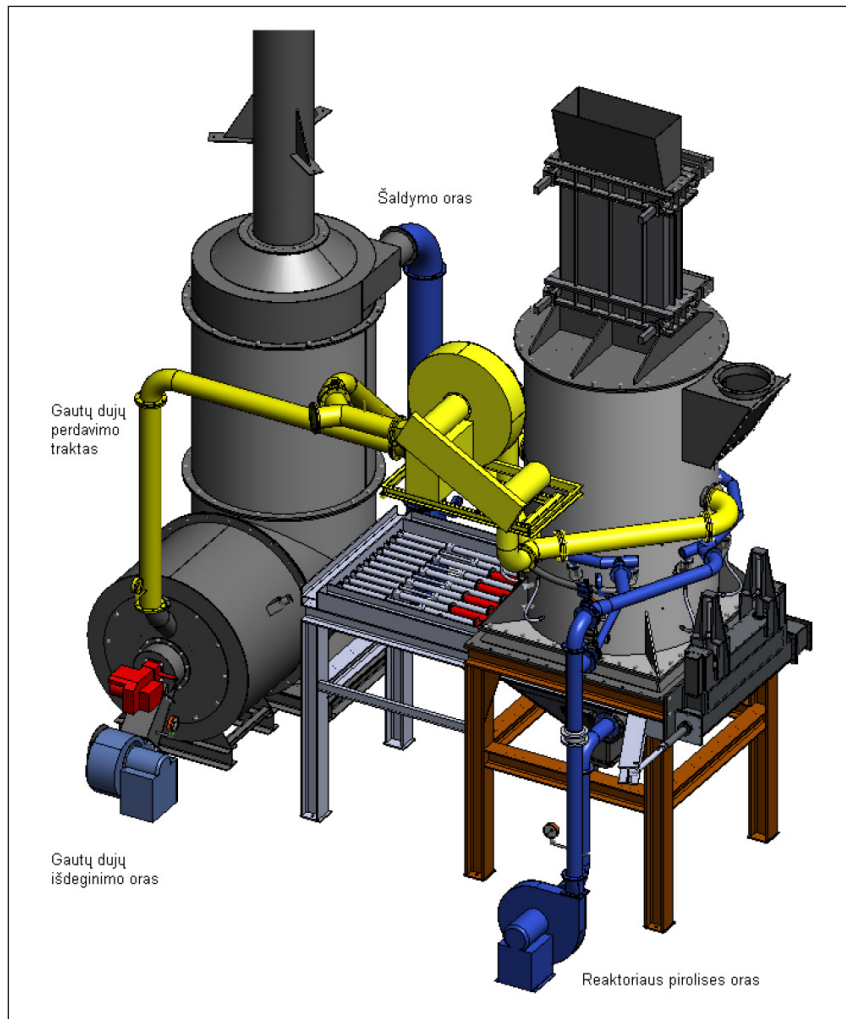
Šiame straipsnyje pateikiama atliktų tyrimų apžvalga ir pagrindiniai rezultatai bei įvertinamos dujinimo technologijos perspektyvos Lietuvoje.

NESMULKINTŲ NAUDOTŲ PADANGŲ DUJINIMO TECHNOLOGIJA

Bendradarbiaujant su AB „Naujasis kalcitas“ sukurta technologija, leidžianti iš nesmulkintų naudotų padangų gauti generatorines dujas, skirtas deginti kalkių deginimo krosnyje, ir taip sumažinti priklausomumą nuo iškastinio kuro bei atpiginti kalkių gamybą. Pradiniai moksliniai tyrimai, prasidėję prieš dešimtmetį, išsiplėtė iki bendro, Europos Sąjungos struktūrinių fondų finansuojamo, projekto tema „Aukšto kaloringumo medžiagų ir atliekų dujųofikavimo technologijos, mažinančios sąnaudas kurui, sukūrimo ir pritaikymo gamyboje moksliniai tyrimai“ (BPD2004-ERPF-3.1.7-06-06/0017-06). Šio projekto naujumas – įrenginyje vykdomas greitas medžiagos dujinimas ~1 000 °C temperatūroje, kurio metu dujų generavimas vyksta iš padangos paimant tik lakiąsias medžiagas. Likutis, koksas ir plieniniai padangų kordai pašalinami nesuirę. Projekto vykdymo metu pagamintas ir išbandytas eksperimentinis laboratorinis bei pilotinis technologijos įrenginys (1 ir 2 pav.). Pilotinio įrenginio



1 pav. Laboratorinio padangų dujinimo stendo schema ir temperatūros profilis reaktoriuje

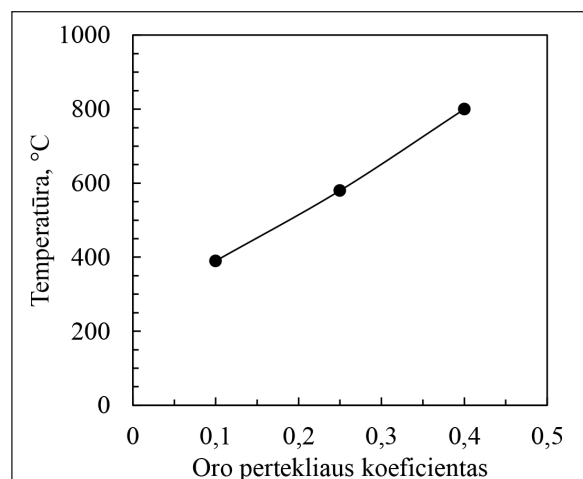


2 pav. Pilotinis 3 MW galios naudotų padangų dujinimo įrenginys

projektinė galia ~3 MW pagal generuotas dujas, dujų kaloringumas 5 MJ/Nm³, išeinančių dujų temperatūra ~600 °C. Šio projekto metu atlikti tyrimai ne tik su padangomis, bet tirtos kitos medžiagos, kurias taip pat būtų galima panaudoti kurui: mediena, durpės ir tekstilės atliekos (medvilnė, vilna, viskozė ir jų mišiniai).

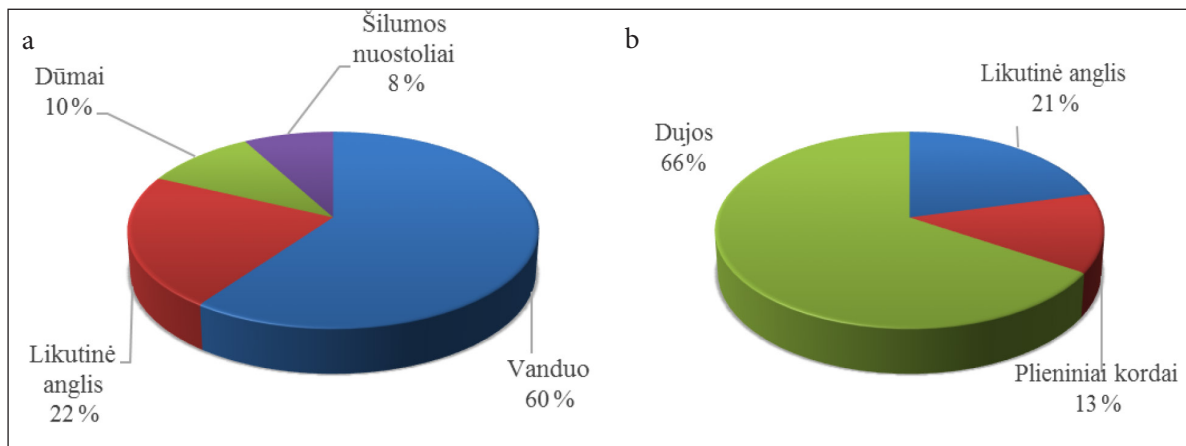
Pirminiai eksperimentiniai bandymai prasiėjo dujinimo įrenginio optimizavimo tyrimais. Bandymai buvo atliekami keičiant oro pertekliaus koeficientą (α) nuo 0,1 iki 0,4 (3 pav.) ir padangų kiekį nuo 60 iki 200 kg/h.

Nustatyta, kad geriausiai dujinimo sistema dirbo, kai $\alpha = 0,24$ ir paduodant 135 kg padangų per valandą. Dirbant šiuo režimu bendras visos sistemos šiluminis našumas siekė 1 200 kW, arba 2 400 kW/m² ardymo ploto, arba 900 kW/m³ reaktoriaus tūrio. Apskaičiuota, kad vandeniui perduota 60 % padangoje esamos energijos, kuri išsiskirtų visiškai sudeginus padangas. Likusios anglies



3 pav. Oro pertekliaus koeficiento α įtaka degimo zonos temperatūrai

ir plieno atliekos buvo atskirtos ir pasvertos. Iš gautų rezultatų sudaryti medžiagų ir energijos balansai (4 pav.). Paveiksle pateikti rezultatai, gauti

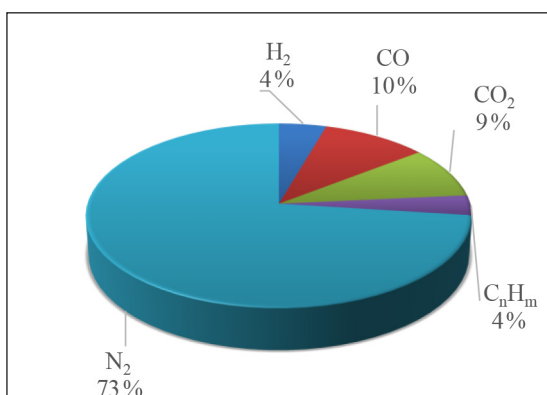


4 pav. Padangų dujinimo įrenginio energijos (a) ir medžiagų (b) balansas dujinant 135 kg/h naudotų padangų

nusistovėjus šiluminiam įrenginio režimui, kai katilė ištekancio vandens temperatūra nebesikeičia. Dujinimo reaktoriaus darbo režimas nusistovi praėjus valandai po paleidimo, o vandens šildymo katilo – per 1,5 val.

Iš dujinimo reaktoriaus ištekanciu dujų sudėtis pateikta 5 pav. Lygiagrečiai matuota ir aukštesniųjų, aplinkos temperatūroje besikondensuojančių, angliavandenilių (dervų) koncentracija. Nustatyta, kad šių junginių koncentracija generatorinėse dujose svyravo nuo 14 iki 48 g/m³. Koncentracijų pokytis priklauso nuo padangos įmetimo į reaktorių laiko. Nustatyta, kad daugiausia dervų ir dujų iš padangos išsiskiria praėjus maždaug vienai minutei nuo įmetimo į reaktorių.

Palyginimui galima pateikti kitų autorių rezultatus [7, 8], kuriais nustatyta, kad, atsižvelgiant į oro pertekliaus koeficientą H_2 , koncentracija svyravo nuo 1 iki 4 %, CH_4 nuo 1 iki 6 %, CO – 5 %.



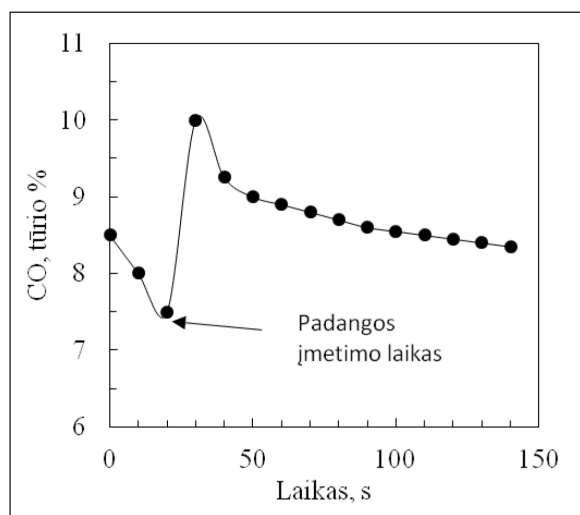
5 pav. Padangų dujinimo įrenginyje gautų dujų sudėtis

Padangų dujinimo metu oro pertekliaus koeficientui esant 0,24 gautų dujų ir dervų bendras vidutinis kaloringumas siekia 3,5 MJ/m³. Panašus rezultatas (4 MJ/m³ prie $\alpha = 0,25$) gautas dujinant 2 kg/h padangų trupinius (0,5–2 mm skersmens) [8]. Šiame tyrime nuostoliams kompensuoti reaktoriaus korpusas buvo šildomas elektros spirale ir tiekiamas pašildytas oras. Literatūroje [9] pažymima, kad gautos dujos yra 5 MJ/m³, kai $\alpha = 0,21$. Šiame darbe dujinta 3 t/h padangų, oras degimui buvo tiekiamas pašildytas. Nuostolių į aplinką mažinimas sudaro galimybes gauti kaloringesnes dujas. Šioms dujoms sudeginti reikia papildomai 0,7 m³ oro. Literatūroje [10, 11] pažymima, kad atliekant tyrimus 0,47 t/h našumo reaktoriuje, kai $\alpha = 0,1$, gautų dujų kaloringumas buvo 12,3 MJ/m³. Mūsų bandymų metu, kai $\alpha = 0,1$, kaloringumas siekė apie 7–12 MJ/m³, tačiau šiuo atveju apie 10 % padidėja liekančios anglies kiekis, sumažėja reaktoriaus temperatūra ir našumas, dujų sudėtis tampa nepastovi. Žemesnėse temperatūrose pagaminama mažiau dujų ir daugiau dervų, kurių padavimas į katilą ir sudeginimas tampa sudėtingas. Padangų kordo plienas neatsikaitina, lieka kietas ir jo ištraukimas iš reaktoriaus komplikuoatas. Optimali reaktoriaus temperatūra yra 550–800 °C. Šioje temperatūroje dūmų kanalai lieka švarūs, kordo vielos minkštos, lengvai pašalinamos. Aukštesnėse temperatūrose (per 800 °C), kai $\alpha = 0,4$, gauta daugiau dujų, dervų beveik nelieta, kadangi sunkieji angliavandeniliai skyla į dujinius produktus, gautų dujų kaloringumas sumažėja iki 2 MJ/m³. Šiuo atveju didesnė dalis

kuro sudega reaktoriuje, o didėjant temperatūrai kaloringumas toliau mažėja. Degimo zonoje pradeda lydėtis šlakas, kuris užkemša oro pūtimo angas, ir darbo metu sunku jį pašalinti.

Nustatyta, kad gautų generatorinių dujų degimo temperatūra, kai $\alpha = 1$, $t_o = 0$ °C, $t_d = 0$ °C, būtų apie 1 360 °C. Deginant mazutą kalkių krosnyje fakelo temperatūra palaikoma apie 1 850 °C. Norint išlaikyti panašų darbo režimą, reikėtų dujas pašildyti iki 500–800 °C. Pažymėtina, kad iš dujinimo reaktoriaus ištekantių dujų temperatūra yra artima reikalingai dujų temperatūrai.

Padangų dujų gaminimosi dinamika buvo sekama matuojant CO kiekio pokyčius, atsižvelgiant į metamų padangų dažnumą. Padangų dujose CO kiekis siekia iki 10 %, kai reaktoriuje temperatūra pakyla iki 1 000 °C ir, sulėtėjus padangų metimui, sparčiau deginama anglis. Vidutinis CO kiekis dujose yra 5 %. Dujų išsiskyrimo dinamikai nustatyti pasirinktas CO koncentracijos matavimas (6 pav.). Iš šio paveikslo matyti CO koncentracijos dujose kitimas laiko atžvilgiu: įmetus padangą vyksta intensyvus dujų išsiskyrimas. Tuo pačiu momentu suintensyvėja ir degimas. Bendroji situacija pasireiškia tuo, kad pradinėje dujinimosi stadijoje degimo temperatūra nukrinta, bet greitai atsistato ir pasiekia maksimumą. Galiausiai dujų išsiskyrimo intensyvumas sumažėja ir pradeda labiau degti anglis. Po to vėl metama padanga, ir ciklas kartojasi.



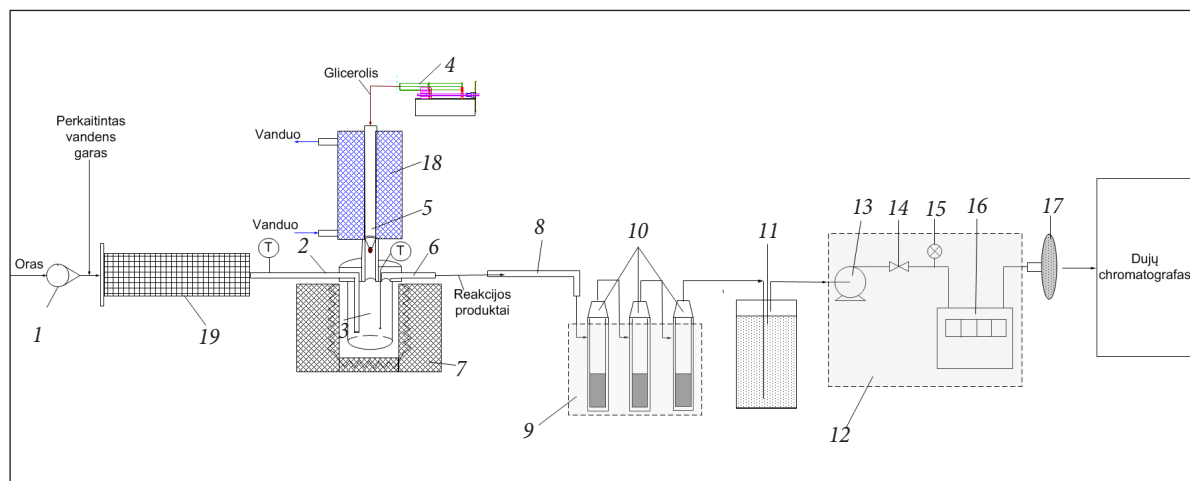
6 pav. Padangų dujinimo įrenginyje vykstančių CO dujų išsiskyrimo dinamika

VANDENILIO GAVYBOS, TERMIŠKAI SKAIDANT GLICEROLIO FRAKCIJĄ, TYRIMAS

Biodyzelino gamybos metu susidaro šalutinis produktas glicerolis. Pagaminus 1 toną biodyzelino susidaro apie 106 kg glicerolio. Skatinant biokuro naudojimą transporte, atsirado šios biotliekos perteklius, jų tolesniam panaudojimui nuolatos ieškoma naujų būdų. Viena iš alternatyvų yra glicerolio frakcijos terminis skaidymas siekiant gauti dujas, kurios būtų praturtintos vandeniliu (H_2).

Eksperimentiniai glicerolio frakcijos dujinimo tyrimai atlikti specialiai sumontuotame tyrimų stende, kurio schema pateikta 7 pav. Darbo metu tirti skirtingos glicerolio frakcijos dalinės oksidacijos ir autoterminės konversijos procesai įvertinant tiekiamo oksidatoriaus (oro ir oro + vandens garų) įtaką vandenilio kiekiui reakcijos produktuose, esant nekintamai 920 ± 37 °C reakcijos temperatūrai. Eksperimentiniams bandymams buvo naudojamos keturios skirtingos sudėties glicerolio frakcijos: grynas glicerinas, dvi glicerolio frakcijos, paimtos iš vienos didžiausių Lietuvoje biodyzelino gamyklų UAB „Rapsoila“ skirtingų technologijų, bei glicerolio ir mazuto emulsija, pagaminta Aleksandro Stulginskio universiteto Aplinkos technologijos cheminių ir biocheminių tyrimų laboratorijoje (1 lentelė).

Eksperimentinių bandymų metu tirtas dujinių reakcijos produktų H_2 , CO, CH_4 , C_2H_4 ir C_2H_2 koncentracijų kitimo priklausomumas nuo oro pertekliaus koeficiento, kitusio nuo 0 iki 0,5, kai reakcijos temperatūra 920 ± 37 °C. Nustatyta, kad daugiausia vandenilio generuotose ir staiga atšaldytose dujose susidaro esant mažam kuro ir oro santykiui α . Didėjant α vis didesnė dalis kuro sueikvojama, o vandenilio bei kitų kaloringų dujų koncentracija mažėja. Piroлизės atveju, kai $\alpha = 0$, daugiausia, 22,4 tūrio %, vandenilio susidaro termiškai skaidant vidutinio grynumo glicerolio frakciją. Šiek tiek mažesnis, 22,1 tūrio %, H_2 kiekis buvo gautas ir iš visiškai švaraus komercinio glicerino. Iš biodyzelino gamybos technologijos paimto mažo grynumo glicerolio, kuriame yra didelis vandens kiekis, atveju gaunama mažesnė, 16,3 tūrio %, vandenilio išėiga. Atsiradus glicerolio frakcijoje daugiau



7 pav. Glicerolio frakcijos terminio skaidymo eksperimentinis stendas: 1 – rotametas; 2 – oro tiekimo atvamzdis; 3 – reakcijos kamera; 4 – švirkštinis siurblys; 5 – glicerolio dozatorius; 6 – reakcijos produktų atvamzdis; 7 – elektrinė kaitinimo kamera; 8 – vandeniu šaldomas dujų pasiurbimo zondas; 9 – Peltier šaldymo įrenginys; 10 – stikliniai kondensatoriai; 11 – silikagelio absorberis; 12 – aspiratorius; 13 – membraninis siurblys; 14 – srauto reguliatorius su rotametru; 15 – skaitmeninis termometras; 16 – tūrinis skaitiklis; 17 – „Tedlar“ dujų maišelis; 18 – vandeniu šaldoma kamera; 19 – šildoma oro vandens garų maišymosi kamera

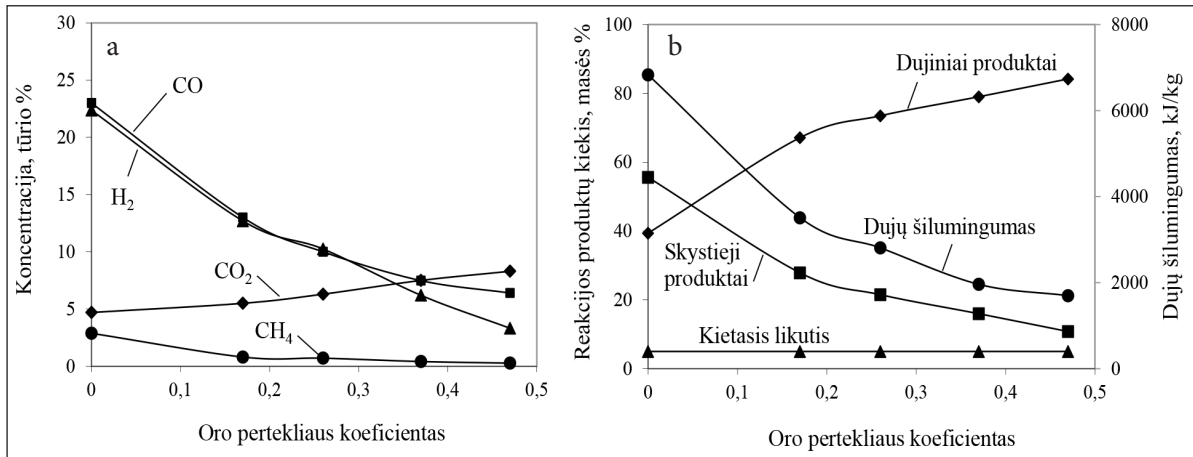
priemaišų, glicerolio ir mazuto emulsijos atveju susidaro tik 16 tūrio % vandenilio. Anglies monoksidas yra antras iš pagrindinių reakcijos produktų. Kai $\alpha = 0$, reakcijos produktų sudėtyje maksimalus CO kiekis buvo 23 tūrio %, kuris susidarė skaidant vidutinio grynumo glicerolio frakciją. Toliau buvo skaidomas grynas glicerinas – 22,3 tūrio %, žemo grynumo glicerolis – 17 tūrio % ir emulsija – 16,5 tūrio %. Didėjant deguonies kiekiui visų keturių medžiagų terminio skaidymo metu gautų CO koncentracijų kitimo pobūdis išlieka panašus ir tolygiai mažėja. Kaip ir vandenilio atveju, išryškėja priemaišų, esančių

glicerolio frakcijose, įtaka: didėjant vandens bei kitų angliavandenilių kiekiui CO koncentracija mažėja.

Mažėjant oro pertekliaus koeficientui reakcijos produktuose aptinkamas didelis lengvųjų angliavandenilių, daugiausia CH_4 ir C_2H_4 , kiekis. Nustatyta, kad glicerolio mišiniuose esančios priemaišos stabdo lengvųjų angliavandenilių susidarymą. Kaip keičiasi dalinės vidutinio grynumo glicerolio frakcijos oksidacijos pagrindinių dujinių komponentų koncentracijos, galutinių reakcijos produktų kiekis ir dujų šilumingumas, pavaizduota 8 pav.

1 lentelė. Eksperimentiniams tyrimams naudota skirtingos koncentracijos glicerolio frakcijos sudėtis

Sudėtis	Grynas glicerinas	Vidutinio grynumo glicerolis	Mažo grynumo glicerolis	Glicerolio–mazuto emulsija
Glicerolis, masės %	98	88	80	27
Metanolis, masės %	–	0,2	0,5	8
Vanduo, masės %	2	4,8	9	13
Na_3PO_4 , masės %	–	9	9	–
Laisvosios riebalų rūgštys, masės %	–	2	1,5	–
Mazutas, masės %	–	–	–	27
RRME, masės %	–	–	–	20
PAM, masės %	–	–	–	2,5
Muilas (K^+), masės %	–	–	–	2



8 pav. Dalinės vidutinio grynumo glicerolio frakcijos oksidacijos reakcijos produktų kiekis:

a – dujinių reakcijos produktų koncentracijos priklausomumas nuo oro pertekliaus koeficiento, kai $T = 920 \pm 37$ °C; b – reakcijos produktų kiekis ir dujų šilumingumas, kai $T = 920 \pm 37$ °C

Siekiant nustatyti vandens garų įtaką reakcijos produktų išeigai, eksperimentiniams autoterminės konversijos bandymams buvo pasirinkta vidutinio grynumo glicerolio frakcija. Daugiausia vandenilio susidaro esant mažam kuro ir oro santykiui. Ryškiausia vandens garų įtaka galutinių reakcijos produktų išeigai matoma atlikus eksperimentinius bandymus, kai $\alpha = 0$ (vandens garų reformingo reakcija). Pirolizės atveju ($\alpha = 0$ ir $H_2O/C = 0$) nustatyta vandenilio koncentracija siekė 22,4 tūrio %. Pateikus vandens garų į reakciją ($H_2O/C = 1$), vandenilio koncentracija reakcijos produktuose padidėjo iki 25 tūrio %. Toliau keliama vandens garų kiekį H_2 koncentracija tik mažėjo: kai $H_2O/C = 3,7$, tai $H_2 = 23$ tūrio %, kai $H_2O/C = 5,2$, tai $H_2 = 22,5$ tūrio % ir galiausiai padidinus iki $H_2O/C = 9,2$, H_2 kiekis sumažėjo iki 19,9 tūrio %. Didinant garų kiekį, proporcingai trumpėja reakcijos greitis, todėl didėja medžiagų nesureagavimo lygis ir mažėja vandenilio koncentracija galutiniuose reakcijos produktuose. Didinant tiekiamo oro kiekį prie visų H_2O/C santykio reikšmių, H_2 koncentracija tolygiai mažėjo.

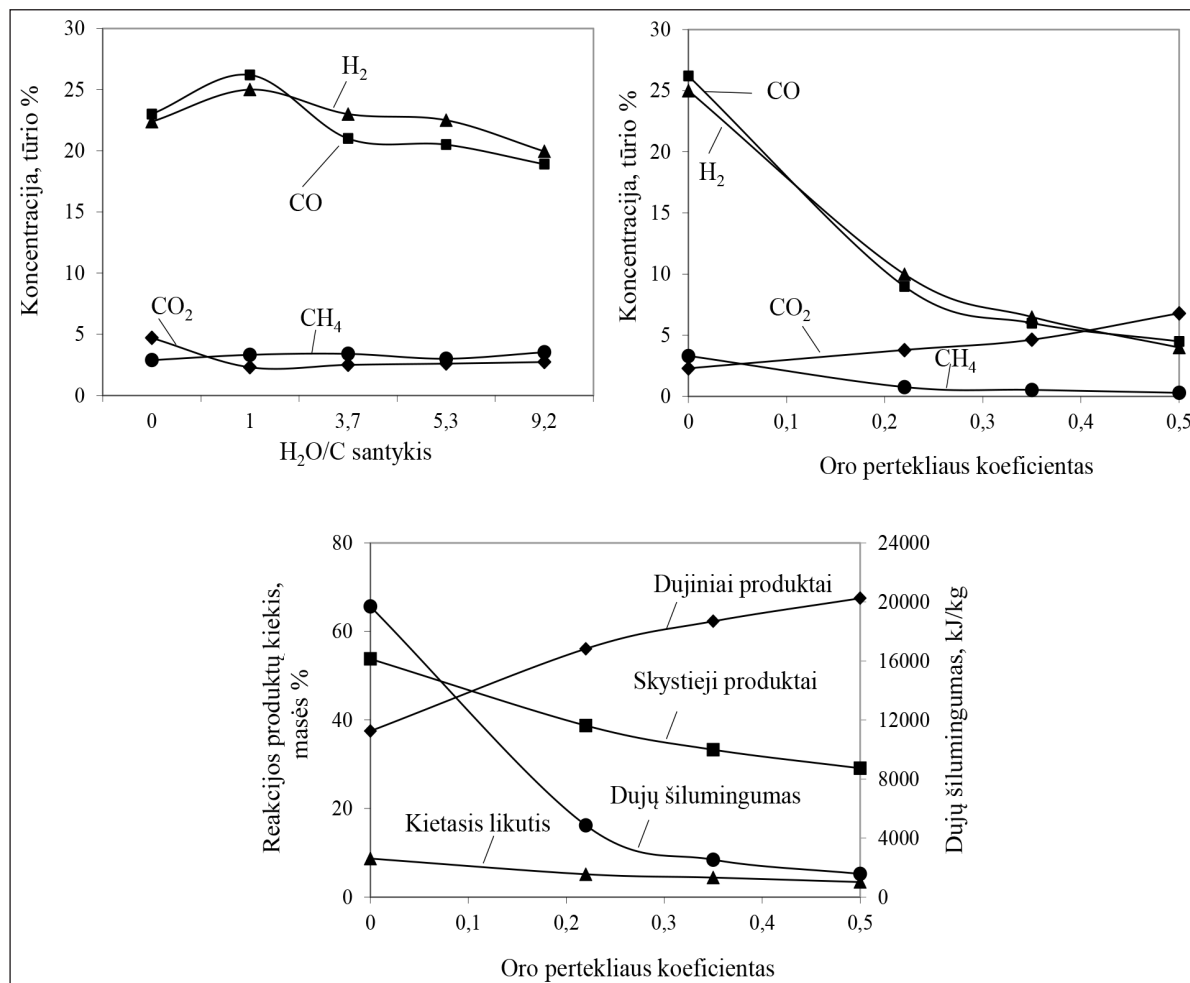
Kai $\alpha < 0,17$, anglies monoksido kiekis didėja iki $H_2O/C = 1$, toliau didėjant vandens kiekiui CO kiekis mažėja. Kai $\alpha > 0,17$ CO, koncentracija dalinės glicerolio oksidacijos atveju ($H_2O/C = 0$) tampa didžiausia, o pateikus vandens garų ji sumažėja (9 pav.), taip pat didėja ir CO_2 kiekis reakcijos produktuose. Deguonies padidėjimas galėjo sukelti lokalios temperatūros reaktoriaus viduje padidėjimą, tai paskatintų CO konversiją. Taip

pat neatmestinas ir CO sumažėjimas dėl jo oksidacijos reakcijos su deguonimi, patekusių iš oro.

Didinant vandens garų kiekį nustatytas lengvųjų angliavandenilių susidarymo kilimas. Daugiausia metano ir etileno susidarė esant didesniai vandens garų kiekiui. Vandens garų įtaka akivaizdi ir susidarant acetileno dujoms: kol vyko tik angliavandenilių garų reformingo reakcija, šių dujų kiekis didėjo, tačiau iš dalies oksidavus glicerolį C_2H_2 mažėjo. Galima teigti, kad vandens garų įvedimas į procesą sumažina acetileno susidarymą.

Nustatyta, kad $H_2O/C = 1$ yra optimalus vidutinio grynumo glicerolio frakcijos autoterminės konversijos procesui. Tolesni skirtingos koncentracijos glicerolio autoterminės konversijos tyrimai buvo atliekami esant nekintančiai $H_2O/C = 1$ reikšmei. Kaip keičiasi autoterminės vidutinio grynumo glicerolio frakcijos konversijos pagrindinių dujinių komponentų koncentracijos, galutinių reakcijos produktų kiekis ir dujų šilumingumas pavaizduota 9 pav.

Biodyzelino gamyboje susidaręs šalutinis gamybos produktas glicerolis yra tinkama žaliava ne tik gryno vandenilio gavybai. Ištirtus glicerolio mišinių terminio skaidymo dujinius produktus galima pritaikyti ir antrosios kartos biokuro gamybai. Sujungus biodyzelino gamybos ir jo šalutinio produkto glicerolio panaudojimo antrosios kartos biokuro gamybai technologijas, būtų galima sukurti racionalų biokuro gamybos procesą.



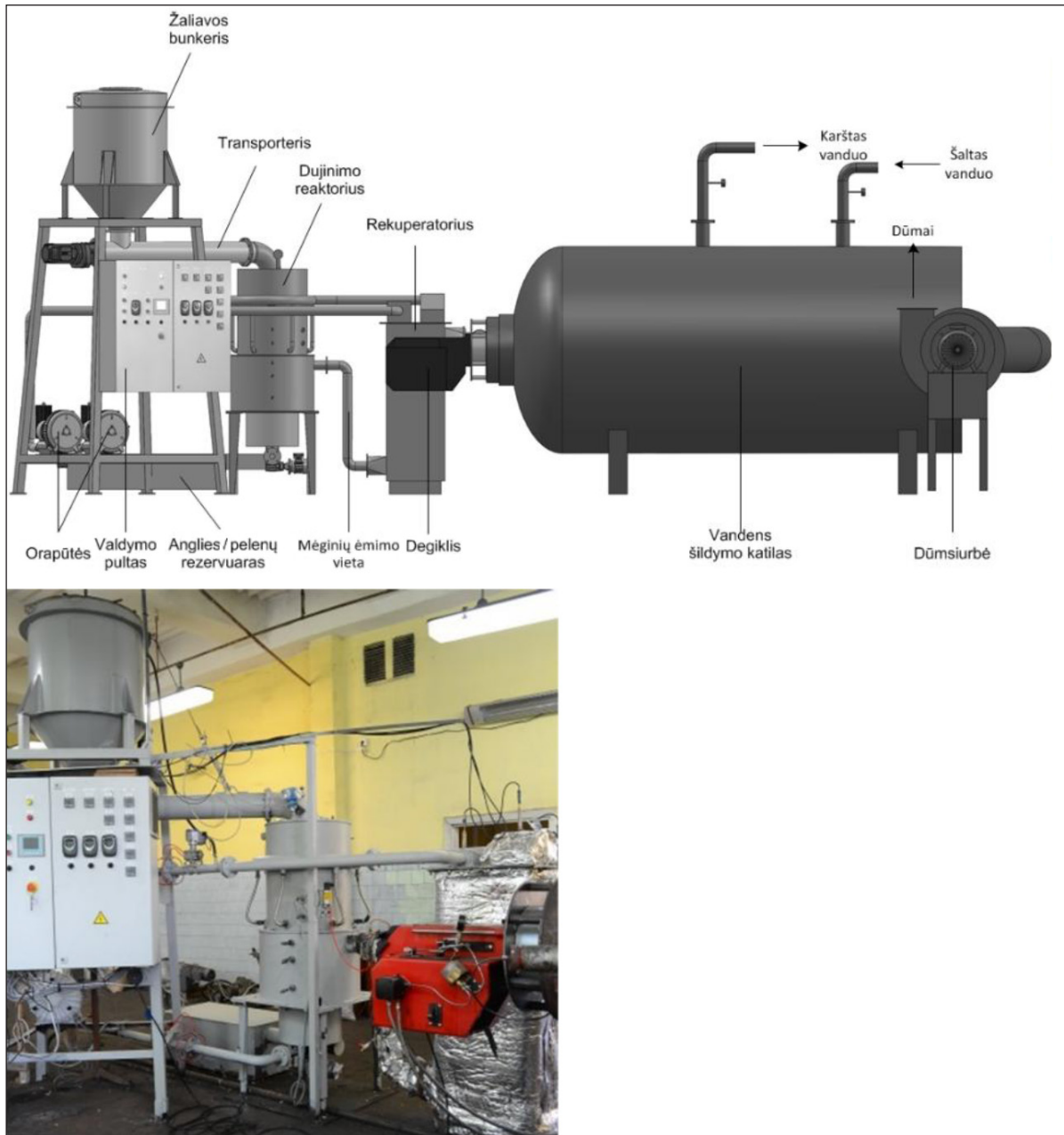
9 pav. Autoterminės vidutinio grynumo glicerolio frakcijos konversijos reakcijos produktų kiekis: a – dujinių reakcijos produktų koncentracijų priklausomumas nuo H₂O/C santykio, kai $T = 920 \pm 37$ °C ir $\alpha = 0$; b – dujinių reakcijos produktų koncentracijų priklausomumas nuo oro pertekliaus koeficiento, kai $T = 920 \pm 37$ °C ir H₂O/C = 1; c – reakcijos produktų kiekis ir dujų šilumingumas, kai $T = 920 \pm 37$ °C ir H₂O/C = 1

ĮVAIRIOS BIOMASĖS DUJINIMO TYRIMAI

Pastaruoju metu vis daugiau pramonės įmonių suinteresuotos atpiginti savo produkcijos savikainą, kurių didžiąją dalį sudaro energetiniai išteklių, dažniausiai gamtinės dujos. Gamtines dujas įmanoma pakeisti galimai pigesnėmis sintetinėmis dujomis, gautomis dujinant biomasę ar jos atliekas. Švirių sintezės dujų gamyba yra sudėtingas procesas, todėl tikslinga sukurti mažo našumo dujų generatorius (1–4 MW), skirtus sumažinti gamtinių dujų sunaudojimą pramonės įmonėse įprastose technologinėse krosnyse. Iš esamų mažos galios dujinimo įrenginių išskirtinas žemyn judančio (angl. *downdraft*) sluoksnio tipo dujinimo reaktorius. Žemyn judančio sluoksnio tipo dujinimo reaktoriuje skaidoma mediena pirrolizės

zonoje ~500–700 °C, kurioje susidaro kaloringos, iki 6 MJ/Nm³, dujos, susidedančios daugiausia iš CO, H₂, CO₂, CH₄ ir kitų C_nH_m angliavandenilių, N₂. Mažai pelenų turinti biomasė, pavyzdžiui, mediena, turi ~80 % lakiųjų medžiagų. Likusią dalį sudaro anglis ir drėgmė. Norint suskaidyti likutinę anglį, reikia aukštos temperatūros ir laiko. Taigi būtina sukurti papildomą įrenginį ar intensyvinti anglies oksidacinį procesą.

Biomasės dujinimo reaktoriaus sistema susideda iš trijų pagrindinių dalių: dujinimo reaktoriaus, šilumos rekuperavimo įrenginio ir gautų produktų deginimo įrenginio (10 pav.). Į dujinimo reaktorių iš viršaus sraigtiniu transporteriu tiekiamas kuras, kuris uždaramė tūryje slenka žemyn. Kuro lygis reaktoriuje sukurtu mechaniniu lygio matavimo įrenginiu palaikomas automatiškai ir yra pastovus.



10 pav. Biomasės dujinimo įrenginio prototipas ir nuotrauka

Oras paduodamas statmenai aplink degimo zoną, kur nedidelėje aukščio atkarpoje sukeliama reikiama temperatūra. Likusi anglis papildomai dujinama tiekiant antrinį – apatinį – orą. Dujinimo liekanos – anglis, pelenai – išimamos per judantį ardyną ir sandėliuojamos bunkeryje. Sugeneruotos dujos iš reaktoriaus teka per reaktoriaus apačioje esančią anglių ir izoliuotais vamzdžiais paduodamos į šilumos rekuperatorių dujinimui – reikalingam orui pašildyti. Iš dalies ataušintos generuotos dujos, ištekėjusios iš rekuperatoriaus, nukreipia-

mos į išdeginimo kameroje (vandens šildymo katile VK21) sumontuotą degiklį. Katile sumontuotas Bentone firmos skysto kuro degiklis B40A. Generuotoms dujoms įterpti į degiklį sumontuotos specialios angos.

Visas dujinimo procesas visiškai automatizuotas, o pagrindiniai technologiniai parametrai surenkami ir kaupiami kompiuteryje. Dėl skirtingų tirtųjų biomasės rūšių charakteristikų kiekvienai biomasės žaliavai procesas suderinamas atskirai: pagal nustatytas medžiagos charakteristikas

parenkamas dujinimui reikalingas pirminio ir antrinio oro kiekis, ardymo judėjimo ciklas, o pagal minėtus parametrus automatiškai priderinami kuro transporterio judėjimo dažnis, degimui reikalingas oro kiekis, trauka katile ir vandens debitas bei temperatūra.

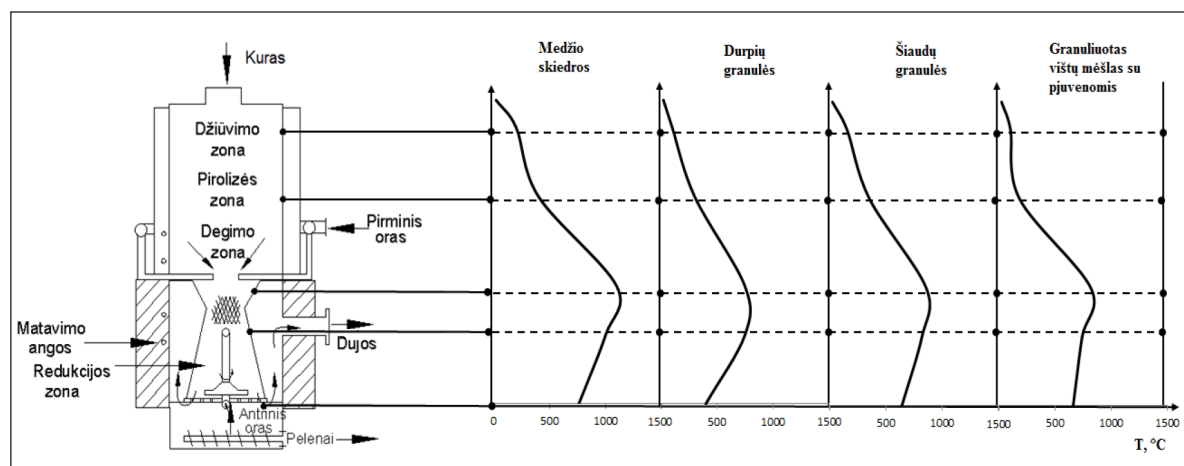
Eksperimentiniuose bandymuose naudota įvairi biomasa, kurios pagrindinės charakteristikos pateiktos 2 lentelėje, o išsami eksperimentinė metodika aprašyta ankstesniuose darbuose [4].

Optimizavus dujinimo procesą ir reaktoriui dirbant optimaliai galimu režimu buvo įvertinti pagrindiniai dujinimo įrenginio parametrai, nustatyta gautų dujų sudėtis reaktoriui dirbant su įvairiomis kuro rūšimis (11 pav., 3 lentelė). Vie-

nas iš pagrindinių dujinimo proceso parametru yra temperatūrinio režimo palaikymas. Kaip matyti 11 pav., temperatūrų laukai dujinant nevienodos sudėties ir gabaritinių matmenų kurą yra skirtingi: kaloringesnio, stambesnės frakcijos, mažiau pelenuų ir daugiau lakiųjų medžiagų turinčios žaliavos, medžio skiedrų, pasiekama aukštesnė dujinimo reakcijos temperatūra. Žinoma, kad kuo aukštesnė temperatūra, tuo daugiau susidaro dujinių produktų ir tuo intensyvesnis susiformavusios anglies dujinimo procesas bei mažesnis jo likutis pelenuose (3 lentelė). Kaip matyti iš pateiktų duomenų, medžio skiedrų kuro energijos konversija į dujų kuro energiją siekia 75 %, durpių atveju – 57 %, šiaudų – 62 %, paukštidžių atliekų – 68 %.

2 lentelė. Bandymuose naudotų žaliavų tyrimo rezultatai

Nr.	Parametras	Vienetai	Medžio skiedros	Durpių granulės	Šiaudų granulės	Granuluotas vištų mėšlas su pjuvenomis
1.	Drėgmės kiekis (%)	%	10,6	15,3	14,9	7,6
2.	Kuro viršutinis šilumingumas (kJ/kg)	MJ/kg	17,3	17,1	16,2	16,8
3.	Peleningumas (%)	%	0,8	9,5	5,4	13,5
4.	Lakiųjų medžiagų kiekis	%	75,8	53,6	62,5	64,2
5.	Nelakiosios anglies kiekis	%	12,8	21,6	17,1	15,3
6.	Anglies (C) kiekis (sausai masei)	%	48,77	50,10	39,6	43,98
7.	Vandenilio (H) kiekis (sausai masei)	%	5,85	5,59	5,60	5,16
8.	Deguonies (O) kiekis (sausai masei)	%	44,58	31,51	39,6	30,98
9.	Azoto (N) kiekis (sausai masei)	%	0,05	1,43	0,78	4,63
10.	Sieros (S) kiekis (sausai masei)	%	0,01	0,17	0,08	0,75
11.	Kuro dalelių matmenys	mm	20–50	8	8	8



11 pav. Biomės dujinimo reaktoriaus temperatūrų laukai

3 lentelė. Masės ir energijos srautai dujinant skirtingas žaliavos rūšis

Nr.	Parametras	Vienetai	Medžio skiedros	Durpių granulės	Šiaudų granulės	Granuluotas vištų mėšlas su pjuvenomis
1.	Kuro kiekis	kg/h (kW)	61 (277)	64 (292)	54 (232)	43 (190)
2.	Oro kiekis	m ³ /h	61	57	49	55
3.	Dujų kiekis	m ³ /h (kW)	120 (208)	103 (155)	90 (133)	104 (124)
4.	Pelenų / anglies kiekis	kg/h (kW)	3 (16)	10 (69)	6 (41)	4,5 (23)
5.	Dervų kiekis	g/m ³ (kW)	4 (5)	15 (17)	9 (9)	6 (7)
6.	Rekuperatoriuje atgautas šilumos kiekis	kW	9,7	5	6,6	8,3

Nustatyta, kad visišką anglies išdujinimą pasiekti tame pačiame įrenginyje yra sudėtinga ir neefektyvu. Pavyzdžiui, didinant oro kiekį ir keičiant temperatūrą dėl pilnesnio generuotų dujų oksidavimo mažėja kietojo kuro energijos transformavimo į dujinio kuro energiją efektyvumas. Didinant anglies buvimo laiką redukciniame zonoje dėl žaliavos smulkėjimo reaktoriuje didėja slėgis, mažėja paduodamos žaliavos kiekis, taip pat generuotų dujų kiekis, sudėtis ir šilumingumas.

Kita minėtina priežastis, dėl ko mažėja proceso efektyvumas, yra paduodamos žaliavos dydis. Medžio skiedrų dalelių dydis svyravo nuo 20 iki 50 mm. Laisvai sukritusios dalelės neužpildo viso reaktoriaus tūrio, ir atsiranda plyšiai tarp dalelių. Esant bent menkiausiai viršslėgiui reaktoriaus viduje, visos dalelės yra tolygiai ir visiškai apiplaunamos generuotų dujų. Į erdves tarp dalelių patekęs dujų ir oro mišinys reaguoja išskirdamas šilumą, kurios reikia vykdyti anglies dujinimo reakcijas.

Dujinant smulkių dalelių kurą (granules), išauga hidraulinis sluoksnio pasipriešinimas. Tai riboja papildomo oksidatoriaus kiekio įvedimą, kita vertus, generuotos dujos pradeda tekėti kanalais, kurie atsiranda dėl netolygaus sluoksnio pasipriešinimo. Todėl anglies dujinimo reakcijos paviršiaus plotas sumažėja, tai lemia didesnę jo išėigą „pelenuose“ ir konversijos efektyvumo sumažėjimą.

Optimizavus dujinimo reaktoriaus režimus kiekvienai kuro rūšiai, atskirai nustatyta vidutinė gautų dujų sudėtis ir apskaičiuotas jų kaloringumas (4 lentelė). Pagrindiniai dujinio produkto degieji komponentai yra H₂ (10,8 MJ/m³), CO (12,6 MJ/m³), CH₄ (35,8 MJ/m³), C₂H₆ (64,3 MJ/m³), C₂H₂ (56,0 MJ/m³), C₃H₈ (91,2 MJ/m³). Bendras gautų dujų kaloringumas keičiasi atsižvelgiant į gautų dujų sudėtį. Iš gautų rezultatų matyti, kad kuo daugiau generuotose dujose yra nesikondensuojančių angliavandenių, tuo didesnis mišinio kaloringumas. Vandens ir anglies monoksido koncentracijų

4 lentelė. Dujų sudėtis dujinant skirtingas žaliavos rūšis

Nr.	Parametras	Vienetai	Medžio skiedros	Durpių granulės	Šiaudų granulės	Granuluotas vištų mėšlas su pjuvenomis
1.	Vandenilis (H ₂)	%	16,1	14,0	14,2	14,5
2.	Azotas (N ₂)	%	44,0	54,4	55,2	53,4
3.	Metanas (CH ₄)	%	4,6	4,5	4,4	1,2
4.	Anglies dioksidas (CO ₂)	%	10,0	10,0	10,0	13,5
5.	Anglies monoksidas (CO)	%	25,0	17,0	16,0	17,3
6.	Etanas (C ₂ H ₆)	%	0,10	0,05	0,06	0,04
7.	Acetilenas (C ₂ H ₂)	%	0,10	0,08	0,09	0,05
8.	Propanas (C ₃ H ₈)	%	0,10	0,02	0,03	0,01
9.	Dujų apatinis šilumingumas	MJ/m ³	6,8	5,4	5,3	4,2
10.	Dujų kiekis 1 MWh šilumos gauti	m ³ /1 MWh	530	670	686	850
11.	Stechiometrinis oro kiekis degimui	m ³ /m ³	1,46	1,18	1,16	0,89

įtaka nėra didelė. Gautų dujų energetinė vertė kelis kartus mažesnė už visuotinai įprastų gamtinių dujų. Vadinasi, siekiant sugeneruoti tą patį šilumos kiekį, reikia pateikti ir kelis kartus didesnę sintetinių dujų kiekį. Taigi esami deginimo įrenginių degikliai, skirti gamtinėms dujoms deginti, nebus pajėgūs užtikrinti to paties šiluminio našumo, todėl juos reikėtų pritaikyti naujai kuro rūšiai. Oro kiekis, reikalingas sudeginti 1 m³ generuotų dujų, šiek tiek skiriasi nuo gamtinėms dujoms sudeginti reikalingo oro kiekio. Todėl bendras deginių srautas per deginimo įrenginį mažai pasikeis: nuo 1,1 karto medžio skiedrų, iki 1,5 vištų mėšlo. Žinoma, kad didėjant deginių kiekiui mažėja adiabatinė degimo temperatūra, taip pat šilumos mainų efektyvumas, o tai turi įtakos ir deginimo įrenginio efektyvumui. Parinkus optimalų gamtinių ir generuotų dujų mišinio santykį, minėtų problemų galima išvengti.

Eksperimentinių tyrimų metu sukurto dujinimo reaktoriaus generuotos dujos buvo deginamos vandens šildymo katile VK-21, kuriame sumontuotas Bentone firmos skystojo kuro degiklis. Pritaikius degiklį generuotoms dujoms deginti, išmatuotos deginių emisijos (5 lentelė). Dėl sąlyginai mažo katilo našumo ir didelio oro pertekliaus koeficiento, atsižvelgiant į pradinės žaliavos rūšį, tyrimų metu nustatytas NO_x kiekis išmetamuosiuose dūmuose kito nuo ~680 iki 2 200 mg/m³. Pažymėtina, kad suderintame katile optimalus deguonies kiekis dūmuose retai viršija 3 %. Vadinasi, NO_x kiekis dūmuose būtų iki trečdaliai mažesnis (5 lentelė). Pagal esamus normatyvinius dokumentus, šiuo metu naudojamų bei naujai įrengtų biokurą deginančių įrenginių NO_x koncentracija dūmuose negali viršyti 750 mg/Nm³, tačiau nuo 2020 m. ES numatoma nauja direktyva, kurioje įvardijama ribinė vertė bus griežtesnė ir sieks 650 mg/Nm³.

VANDENVALOS NUOTEKŲ DUMBLO DUJINIMO TYRIMAI

Biomasė ir nepavojingos atliekos sudaro didžiąją atsinaujinančiųjų energijos išteklių dalį. Daugiausia naudojama medienos ir jos atliekų, populiarija ir biodegalai. Vis plačiau pradedamos naudoti įvairios atliekos, pavyzdžiui, komunalinės ar nuotekų dumblas. Plečiantis nuotekų surinkimo ir valymo infrastruktūrai, proporcingai didėja ir šių atliekų kiekis. Lietuvoje per metus susidarancio sauso nuotekų dumblo kiekis siekia iki 50 tūkst. tonų sausos medžiagos. 2007–2013 m. Lietuvoje buvo kuriama nuotekų dumblo tvarkymo infrastruktūra. Jos tikslas – apie 80 % Lietuvoje susidarancio dumblo, pritaikius modernias technologijas, tvarkyti pūdymo, džiovavimo ir kompostavimo įrenginiuose [12]. Mažuose miestuose (regionuose) vyrauja kompostavimo, o didžiuosiuose – pūdymo ir džiovavimo technologijos. Gaunamas džiovintas, granuliuotos formos nuotekų dumblas. Kuriant nuotekų dumblo tvarkymo infrastruktūrą nebuvo išspręstas termiškai išdžiovinto ir granuliuoto dumblo iš dumblo apdorojimo įrenginių naudojimas. Nuo 2015 m. sausio 1 d. nuotekų dumblo nebegalima išvežti į sąvartynus. Apie 60 % džiovinto nuotekų dumblo dabar yra sukaupta saugojimo aikštelėse, ir šie kiekiai nuolat didėja. Toks nuotekų dumblo tvarkymas pradeda kelti grėsmę aplinkai ir prieštarauja darnios plėtros principams, todėl ieškoma efektyvių būdų nuotekų dumblui panaudoti. Viena iš utilizavimo alternatyvų galėtų būti dujinimo procesas. Taikant šią technologiją iš dumblo būtų išskiriamas vertingas produktas – degiosios dujos, kurias galima būtų panaudoti elektros ar šilumos, reikalingos dumblui džiovinti, gamybai.


5 lentelė. Dūmų dujų sudėtis deginant skirtingas žaliavos rūšis

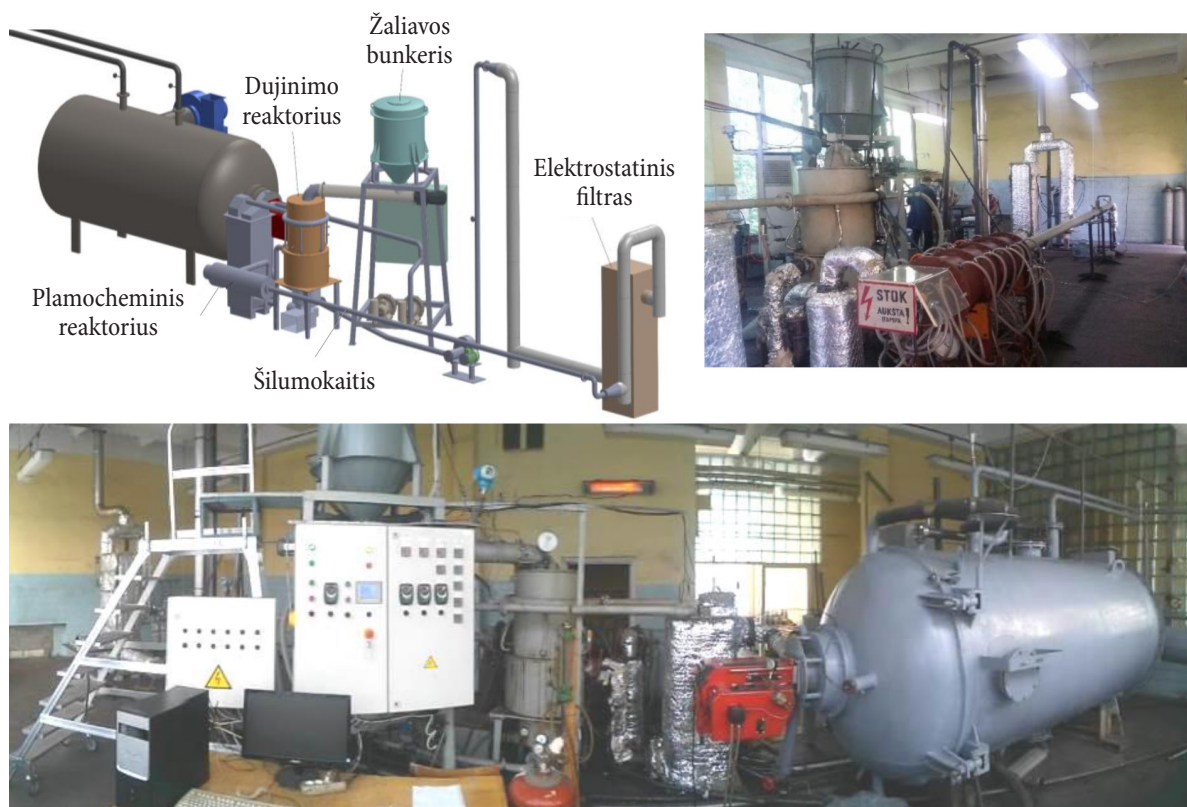
Nr.	Parametras	Vienetai	Medžio skiedros	Durpių granulės	Šiaudų granulės	Granuliuotas vištų mėšlas su pjuvenomis
1.	Šiluminis katilo apkrovimas	kW	250	260	210	175
2.	Deguonies kiekis (O ₂)	%	12,9	13,7	13,9	14,4
3.	Anglies monoksidas (CO)	mg/m ³	<300			
4.	Anglies dioksidas (CO ₂)	%	4,8	4,3	4,2	3,9
5.	Azoto oksidai (NO _x)	mg/m ³ / (mg/m ³ @ 3% O ₂)	680 / (307)	1100 / (450)	890 / (350)	2200 / (820)
6.	Sieros dioksidas (SO ₂)	mg/m ³ / (mg/m ³ @ 3% O ₂)	–	76 / (30)	–	780 / (286)

Nuotėkų dumblas yra sudėtinga žaliava tiek tiesioginiam jo deginimui, tiek dujinimui. Anksčiau tyrimais nustatyta, kad paruošta granuliuota žaliava lengviau patenka į dujinimo reaktorių, tačiau dujinimo proceso efektyvumui turi neigiamo poveikio [4]. Dujinimo metu susidaro kieto (metalų ir anglies junginys) kokso gabaliukai, kuriuos tolimesnėje reaktoriaus zonoje dujinti pasidaro itin sudėtinga. Be to, tokie gabaliukai linkę įstrigti judamose reaktoriaus dalyse ir / ar mechanškai jas paveikti. Negraniuotas sausinto nuotėkų dumblo ir medienos granuliuotą mišinį termiškai skaidomas tolygiau, susidariusios kokso dalelės yra trapesnės ir lengviau pašalinamos iš dujinimo reaktoriaus. Nustačius, kad granuliuotą dumblo ir medienos pjuvenų mišinį sudėtinga dujinti, šiame darbe eksperimentiniai bandymai vykdyti tik maišant džiovintą nuotėkų dumblą su medienos granulėmis santykiu 30/70 masės % (žr. 6 lentelė).

Pagrindiniai eksperimentinio stendo komponentai: dujinimo reaktorių, plazmocheminis reaktorių, aušintuvas, elektrostatinis filtras (ESF) ir vandens šildymo katilas (12 pav.). Eksperimentiniai bandymai prasideda paruošto mišinio užpildymu į bunkerį. Kadangi bunkeris yra riboto tūrio, tai vienam eksperimentiniam bandymui užpildoma ~200 kg paruošto mišinio. Šio mišinio kiekio, atsižvelgiant į dujinimo reaktoriaus našumą, užtenka iki 4–5 valandų darbui. Iš sandariai uždaryto bunkerio sraigtiniu transporteriu žaliava tiekama į dujinimo reaktorių. Dujinimo reaktoriuje vykstantys procesai ir bandymo eiga išsamiau aprašyti ankstesniame darbe [4]. Susidariusios generatorinės apie 600 °C temperatūros dujos patenka į cikloną, kuriame sugaudoma dalis kartu su dujomis išnešamų anglies dalelių. Iš ciklono karštos generatorinės dujos patenka į plazmocheminį reaktorių. Plazmos šaltiniu pasirinktas kintamos 30–80 kW galios vienos

6 lentelė. Nuotėkų dumblo ir medienos granuliuotų charakteristikos

Parametras	Sausintas nuotėkų dumblas / medienos granulės
	
Sudėtis, masės %	30/70
Komponentinė sudėtis, masės %	
Drėgmė	4,0/5,2
Lakiosios medžiagos	51,1/79,2
Nelaki anglis	13,9/15,2
Pelenai	31,0/0,4
Elementinė sudėtis, masės % (sausam kurui)	
Anglis	40,05/49,20
Vandenilis	5,15/6,20
Deguonis	16,27/44,04
Azotas	5,85/0,08
Siera	1,55/0,06
Chloras	0,13/0,02
Aukštutinis šilumingumas (MJ/kg)	17,3/19,0
Žemutinis šilumingumas (MJ/kg)	16,8/18,8
Pelenų lydymosi temperatūra, °C	1 106/1 315
Dalelių dydis, mm	3–10/8



12 pav. Sausinto nuotekų dumblo dujinimo technologijos schema ir nuotraukos

kameros linijinis atmosferinio slėgio plazmos generatorius su karštu katodu ir laiptuotu anodu [13]. Kitos charakteristikos: elektros srovė 120–200 A, įtampa 240–380 V, oro debitas nuo 5 iki 15 g/s, oro temperatūra iš plazmos generatoriaus 2 500–3 700 K, greitis 400–1 000 m/s. Į plazmotrono kamerą pro izoliacinius žiedus tangentiškai įpučiamas oras, o jo ištekėjime oro plazmos srautas maišomas su generuotų dujų srautu, tiekiamu iš dumblo dujinimo įrenginio. Iš plazmocheminio reaktoriaus apdorotos karštos ~1 000 °C generatorinės dujos patenka į vandeniu aušinamą šilumokaitį. Šilumokaityje dujos ataušinamos iki ~300 °C temperatūros. Atvėsintos dujos toliau tiekiamos į elektrostatinį filtrą (ESP), kuriame iš dujų srauto atskiriamos ir surenkamos kietosios dalelės. Ištekėjusios iš elektrostatinio filtro išvalytos kaloringos sintetinės dujos ventiliatoriumi transportuojamos sudeginti į vandens šildymo katilą. Susidarę degimo produktai traukos ventiliatoriumi išmetami į atmosferą. Dujinimo procesas visiškai automatizuotas, o pagrindiniai technologiniai parametrai surenkami ir kaupiami kompiuteryje.

Nusistovėjus dujinimo proceso parametrams pagal pateiktas metodikas imami mėginiai. Dujų sudėtis už dujinimo reaktoriaus ir kiti technologiniai parametrai pateikti 7 lentelėje. Kaip matyti iš lentelėje pateiktų koncentracijų verčių, po dujinimo įrenginio dujinių produktų sudėtis yra artima standartinei dujų sudėčiai, gaunami dujinant įvairias žaliavas šio tipo dujinimo įrenginyje [4]. Tačiau po plazmos reaktoriaus dujinių produktų sudėtis šiek tiek keičiasi: H_2 koncentracija sumažėja vidutiniškai nuo 14,62 iki 12,58 tūrio %, CO atitinkamai 22,20–22,04 tūrio %, CH_4 – nuo 2,37 iki 0,72 tūrio %, CO_2 – nuo 10,30 iki 8,62 tūrio %, o kiti nustatyti lengvieji angliavandeniliai, pavyzdžiui, acetilenas, etanas ar propanas, praktiškai išnyksta. Papildomai įvedus juos oro plazmos srautui generuoti, balastinio azoto koncentracija padidėja nuo 48,80 iki 56,02 tūrio %.

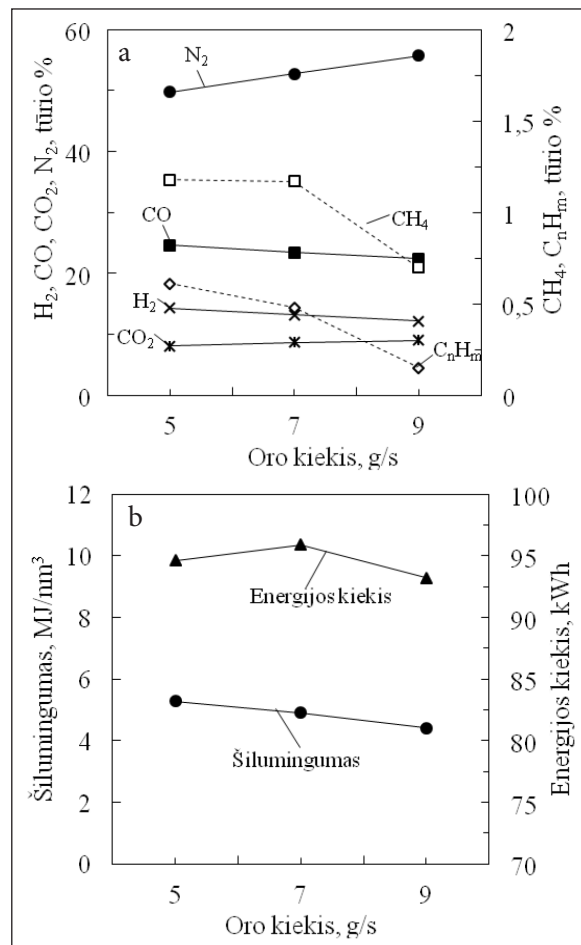
Keičiant oro kiekį plazmos generatoriuje, dujų sudėtis taip pat keičiasi. 13 pav. pavaizduotas generatorinių dujų sudėties už plazmocheminio reaktoriaus priklausomumas nuo oro kiekio, tiekiamo į plazmotroną. Kaip matyti iš pateikto paveikslo, didėjant tiekiamo oro kiekiui degiųjų

7 lentelė. Nuotėkų dumblo ir medienos granuliu mišinio dujinimo proceso pagrindiniai parametrai

Parametras	Po plazmocheminio reaktoriaus	
Po dujinimo įrenginio		
Žaliavos kiekis, kg/h	19	19
Oro kiekis, Nm ³ /h:	32,6	52
pirminis	20	20
antrinis	1	1
tretinis	11,6	11,6
į plazmocheminį reaktorių	–	19,4 (7 g/s)
Oro pertekliaus koeficientas	0,36	0,58
Dujų kiekis, Nm ³ /h	50	70
Dujų kiekis, Nm ³ /kg	2,63	3,68
Vidutinė dujų sudėtis, tūrio % (sausos dujos)		
H ₂	14,62	13,19
CO	22,20	23,42
CH ₄	2,37	1,17
C ₂ H ₂	0,11	0,01
C ₂ H ₆	0,13	0,01
C ₃ H ₈	0,03	–
CO ₂	10,30	8,72
N ₂	48,80	52,75
Dujų žemutinis šilumingumas, MJ/Nm ³	5,28	4,91
Dervų koncentracija dujose, g/Nm ³	2,03	0,08
Kietųjų dalelių koncentracija prieš ESF, mg/Nm ³	270	
Kietųjų dalelių koncentracija po ESF, mg/Nm ³	60	
Kokso kiekis, kg/h	3,4	
Anglies kiekis kokse, masės %	46,6	
Šaltų dujų efektyvumas, %	74,3	65,0
Karštų dujų efektyvumas, %	83,2	81,7

dujų koncentracija šiek tiek sumažėja, o balastinių azoto dujų kiekis išauga. Didžiausias pokytis nustatytas metano, etano, etileno, acetileno dujų. Pavyzdžiui, metano koncentracija sumažėja nuo 3,7 tūrio % iki 1,18; 1,17 ir 0,7 tūrio %, atitinkamai tiekiant 5, 7 ir 9 g/s oro. Tai paaiškinama tuo, kad patiekus daugiau oro vyksta generuotų dujų oksidacija, dėl ko kyla temperatūra ir vyksta papildomas lengvųjų angliavandenilių terminis skaidymas. Dėl šių priežasčių po plazmochemi-

nio reaktoriaus skaičiuotinas susidariusių dujų šilumingumas sumažėja. Vidutinis dujų šilumingumas, esant 5 g/s oro kiekio, siekia 5,28 MJ/m³, 7 g/s – 4,91 MJ/m³, o padidinus oro kiekį iki 9 g/s sumažėja iki 4,41 MJ/m³ (13 pav.). Tačiau nepaisant sumažėjusio dujų šilumingumo iš plazmocheminio įrenginio išteka didesnis generuotų degių dujų kiekis, nei susidarę dujinimo įrenginyje (7 lentelė). Taigi dujų energijos kiekis išauga. Energijos kiekis, išeinantis su dujomis iš plazmocheminio reaktoriaus, nevertinant fizinės šilumos ir padidinus oro kiekį per plazmocheminį reaktorių nuo 5 iki 7 g/s, padidėja nuo ~94,6 iki ~95,8 kWh, tačiau dar padidinus iki 9 g/s, jau sumažėja iki 93,2 kWh. Toliau didinant oro kiekį į plazmocheminį reaktorių bendras susidariusių dujų kiekis didės, tačiau jų šilumingumas mažės, ir energetiniu požiūriu technologinis darbo režimas nebus optimalus.



13 pav. Dujinių reakcijos produktų kitimas, atsižvelgiant į oro kiekį, tiekiamą į plazmotroną

Vykdamas nuotėkų dumblo dujinimo tyrimus nustatyta dervų koncentracija po dujinimo įrenginio buvo $2,03 \text{ g/Nm}^3$. Susidariusios dervos kartu su dujiniais produktais iš dujinimo įrenginio patenka į plazmocheminį reaktorių, kuriame dalis dervų aukštoje temperatūroje suskaidoma ir iš dalies oksiduojama. Nustatyta, kad dervų koncentracija po plazmocheminio reaktoriaus sumažėja iki $0,29 \text{ g/Nm}^3$, kai reaktoriaus ilgis siekia $1\,000 \text{ mm}$, ir iki $0,09 \text{ g/Nm}^3$, prailginus plazmocheminį reaktorių iki $1\,500 \text{ mm}$.

Atliktais tyrimais nustatyta, kad visišką anglies išdujinimą pasiekti tame pačiame įrenginyje yra labai sudėtinga ir praktiškai neįmanoma: didinant oro kiekį ir keliant temperatūrą, kuro energijos transformavimas į dujinio kuro energiją efektyvumas mažėja dėl pilnesnio generuotų dujų oksidavimo; didinant anglies buvimo laiką redukcinėje zonoje, didėja slėgis reaktoriuje, mažėja paduodamos žaliavos kiekis, taip pat generuotų dujų kiekis, sudėtis ir šilumingumas. Kaip keičiasi susidariusios anglies kiekis dujinant įvairią žaliavą bei nuotėkų dumblo mišinius, buvo tyrinėta ankstesniame darbe [4]. Didžioji dalis kokso – $3,4 \text{ kg/h}$ (~17 masės % nuo pradinės žaliavos kiekio) – patenka į peleninę. Kita dalis kietųjų medžiagų išnešama kartu su dujinių produktų srautu, iš kurių didžioji dalis sulaikoma ciklone $0,3 \text{ kg/h}$ ir ESF $0,019 \text{ kg/h}$. Likusi dalis – $0,005 \text{ kg/h}$ (kietųjų dalelių koncentracija 60 mg/Nm^3) – po elektrostatinio filtro išnešama su išvalytomis dujomis į deginimo įrenginį.

Pagal dujinimo technologijos eksperimentinių bandymų rezultatus atlikti visos technologijos masės ir energijos balanso skaičiavimai. Kaip pasiskirsto masės ir energijos srautai atskiruose technologinės linijos mazguose, matyti 14 pav. pateiktoje schemeje. Iš 19 kg/h sausinto nuotėkų dumblo (30 %) ir medienos granuliu (70 %) mišinio galima pagaminti iki $109,9 \text{ kWh}$ energijos generuotų dujų arba iki $127,5 \text{ kWh}$ karšto vandens. Žinant įtekančius ir ištekančius energijos srautus, galima apskaičiuoti dujinimo technologijos naudingo veikimo koeficientą. Nustatyta, kad šaltų dujų efektyvumas $\eta = 74,3 \%$, dirbant be plazmocheminio įrenginio, ir $\eta = 65,0 \%$, dirbant su plazmocheminiu įrenginiu. Didžiausi energijos nuostoliai būtų susiję su energijos netekimu aušinant dujas. Deginant dujas šilumos generatoriuje ir generuojant karštą vandenį ar kitą šilumos ne-

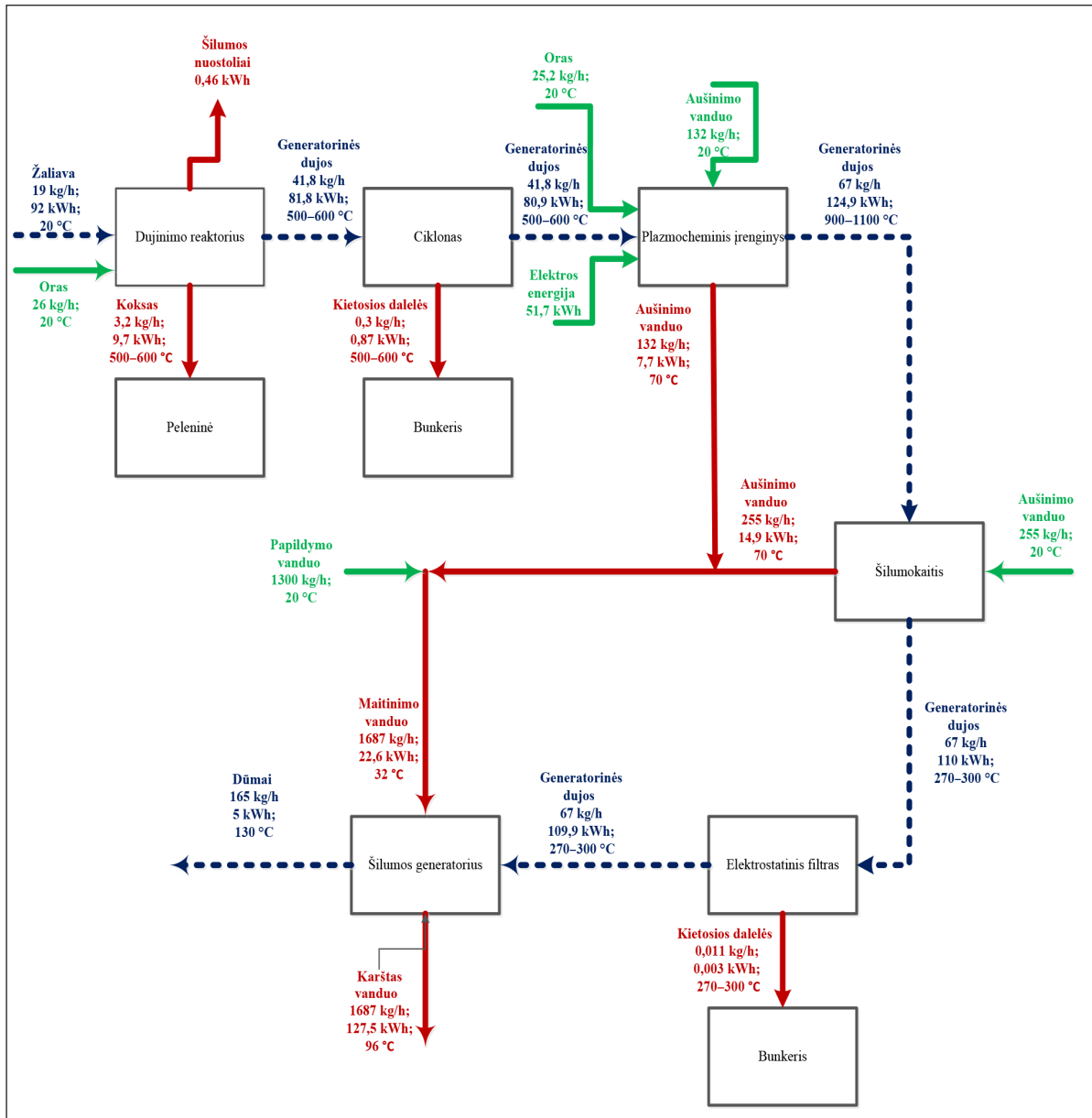
šęją, dujinimo įrenginio naudingo veikimo koeficientas išaugtų iki $\eta = 83,2 \%$ dirbant be plazmocheminio įrenginio, o su juo $\eta = 81,7 \%$.

DUJINIMO TECHNOLOGIJOS PERSPEKTYVOS LIETUVOJE

Terminis biomasės ir atliekų dujinimas yra viena perspektyvių technologijų, iš dalies sprendžiančių aplinkosaugines problemas, susijusias su šiltnamio dujų emisijomis, susidarančiomis deginant iškastinį kurą. Dujinimo technologija santykinai sena. Pirmiausia gautos dujos buvo naudojamos gatvėms apšviesti. Vėliau, XX a. pradžioje, pritaikyta ir išbandyta technologija transportui, tačiau dėl išpopuliarėjusių skystojo kuro rūšių ji neprigijo. Dujinimo technologijos populiarumas tiesiogiai susijęs su naftos ar įprastinio kuro krizėmis, pavyzdžiui, Antrojo pasaulinio karo metu labai trūko degalų, 1970–1980 m. buvo naftos krizė, šiuo metu didelis dėmesys skiriamas atsinaujinančiai energetikai.

Pasaulyje sukurta įvairiausių dujinimo technologijų (stacionaraus, judančio ar verdančio sluoksnio, srovinio ir plazminio tipo reaktoriai), tačiau pagrindinė jų paskirtis išlieka ta pati – skystųjų ar kietųjų medžiagų konversija siekiant gauti dujinius produktus. Gauti dujiniai produktai daugiausia susideda iš anglies monoksido, vandenilio, anglies dioksido, metano ir azoto dujų, o atsižvelgiant į naudojamo kuro rūšį gali susidaryti nedidelės koncentracijos įvairiausių azoto, sieros ar kitų junginių. Gautas dujų mišinys pagal poreikį gali būti panaudotas įvairiais būdais ir įvairiems tikslams: šilumos ir elektros gamybai, įvairiausių cheminių medžiagų gamybai, sintetinio biokuro gamybai ar atskirų dujas sudarančių komponentų atskyrimui bei tiksliniam jų panaudojimui.

Pastarąjį dešimtmetį dujinimo įrenginių skaičius gerokai išaugo. Pasaulyje skaičiuojamos 272 dujinimo jėgainės su 686 dujinimo reaktoriais ir statomos 73 jėgainės su 238 dujinimo reaktoriais [14]. Šiuo metu Kinija yra didžiausia dujinimo reaktorių eksploatuotoja. Ši šalis, turėdama didžiausias anglių atsargas, sėkmingai panaudoja šį kurą ir chemikalams gaminti iš sintezės dujų, o biomasę ir atliekas kol kas užima tik nedidelę dalį – ~15 %. Planuojama, kad iki 2019 m. dujinimo jėgainių pasaulyje turėtų padvigubėti. Stebint pasaulines tendencijas matyti, kad didėja



14 pav. Sausinto nuotėkų dumblo dujinimo technologijos masės ir energijos srautai

tiek didelės (siekiančios 100 MW galios), tiek mažos modulinės dujinimo jėgainės (ne daugiau 1 MW_{el}). Didžiosios daugiausia skirtos iškastiniam kurui perdirbti, o mažosios – biomasei ir atliekoms utilizuoti bei energijai gaminti. Vien Vokietijoje nuo 2000 iki 2010 m. pastatyta per 50 naujų medienos dujinimo įrenginių, kurių elektrinis galingumas siekia 10–270 kW_{el}. Kitose Europos šalyse galima suskaičiuoti per 20 biomasės dujinimo jėgainių, iš kurių 16 yra mažos galios, skirtos kombinuotai šilumos ir elektros gamybai, 4 kombinuotam degimo procesui ir 2 cheminių reagentų gamybai [15].

Iki šiol Lietuvoje dujinimo įrenginių praktinio pritaikymo nėra žinoma, nepaisant medienos karbonizacijos įrenginių ar pavienių entuziastinių bandymų pritaikyti senąją technologiją savo interesams. Juolab kad tik nedidelė mokslininkų grupė dirba šioje srityje. Kas gi stabdo tokių perspektyvių įrengimų atsiradimą? Didesnės galios (>100 MW) dujinimo įrenginių, skirtų gaminti įvairius chemikalus ar biodegalus, Lietuvos pramonė sunkiai pajėgia pastatyti. Jeigu finansiškai ir galėtų pasistatyti, tačiau be subsidijavimo tokios jėgainės dažniausiai nėra rentabilios ir paprasčiausiai investuoti į tokias technologijas tampa

neefektyvu. Mažos galios (iki 1 MW_{el}) kogeneracinės jėgainės Lietuvoje turėtų būti perspektyvios, bet jų taip pat nėra įdiegta. Europos ir kitų šalių patirtis rodo, kad mažosios biomasės dujinimo kogeneracinės jėgainės dažnai naudojamos decentralizuotose vietovėse, kur reikalingas šilumos, elektros ar net šalčio generavimas. Kaip žinome, Lietuvoje šilumos tiekimas daugelyje miestų ar miestelių yra centralizuotas ir tiekiamas iš didesnių katilinių. Tokiose katilinėse daugiausia sumontuoti vandens šildymo katilai, kurie pakankamai efektyviai sudegina kietąjį biokurą ir generuoja šilumos energiją karšto vandens pavidalu. Statyti dujinimo įrenginius efektyvu tik ko- ar trigeneracijos atveju. Tada palyginti brangesnė investicija atsiperka greičiau. Tačiau Lietuvos atveju elektros generacija nėra patraukli dėl per žemų jos supirkimo kainų. Valskybinės kainų ir energetikos kontrolės komisijos 2016 m. kovo 4 d. duomenimis, elektros energijos, pagamintos biomasės jėgainėse, supirkimo tarifas siekia tik 0,077 Eur/kWh, kai Vokietijoje 0,14 Eur/kWh, Italijoje 0,22 Eur/kWh, Čekijoje 0,28 Eur/kWh [16]. Pavyzdžiui, net ir Latvijoje dėl pakankamai didelio elektros supirkimo tarifo, 0,14 Eur/kWh, per pastaruosius keletą metų pastatytos bent penkios mažos dujinimo jėgainės, generuojančios iki 500 kWh_{el} galios. Investicija į tokias jėgaines siekia iki 4 700 Eur/kW_{el}, o parduodama elektra ir šiluma – 0,02 Eur/kWh [17]. Vadinas, elektros supirkimo tarifui esant artimam 0,14 Eur/kWh, dujinimo jėgainės tampa ekonomiškai rentabilios.

Kaip parodė atlikti moksliniai tyrimai, papildoma alternatyva dujinimo įrenginiams atsirasti Lietuvoje, galėtų būti atliekų utilizavimas. Taikant šį termocheminį procesą būtų galima generuoti dujas iš atliekų, kurios yra netinkamos ar jų negalima tiesiai deginti esamuose deginimo įrenginiuose. Papildomas mokestis už atliekų utilizavimą įgalintų greitesnę investicijų grąžą. Taip pat yra specifinių pramonės įmonių (stiklo, plytelių, statybinių medžiagų gamybos ir kt.), kurios eksploatuoja technologines krosnis. Šios įmonės priverstos naudoti brangias gamtines dujas ar kitą iškastinį kurą, bet ne biokurą. Sukurti biomasės dujinimo įrenginiai leidžia tokiose įmonėse diegti biokuro dujinimo technologijas ir gauti kaloringas dujas, kurias galima naudoti kaip alternatyvą visiškai ar iš dalies pakeičiant brangias gamtines dujas.

IŠVADOS

Atliktais tyrimais nustatyta, kad termocheminis dujinimo procesas yra efektyvus būdas iš įvairios biomasės ir atliekų gauti kaloringas dujas, tinkančias tiesiogiai deginti įvairiose pramonės krosnyse, deginimo įrenginiuose gaminant šilumos ir elektros energiją, panaudoti alternatyvaus biokuro gamybai ar išgauti grynas dujas. Gautos naujos mokslinių tyrimų žinios apie generuotų dujų sudėtį, jų kaloringumą ir fizikines savybes. Nustatytas įvairios biomasės ir atliekų dujinimo dėsningumas bei optimalios sąlygos, kurioms esant su sukurtu prototipu galima gauti kaloringiausias dujas. Surastos technologijos konstravimo ypatybės, valdymo savybės ir suformuluoti pasiūlymai didesnės galios įrenginiui. Įvardytos tolesnio įrenginio tobulinimo gairės.

Gauta 2016 06 30
Priimta 2016 10 20

Literatūra

1. Striūgas N., Stravinskas G. Vandens gavyba termiškai skaidant glicerolio frakciją. *Energetika*. 2007. Nr. 1. P. 10–14.
2. Striūgas N., Stravinskas G. Vandens gavyba termiškai skaidant skirtingos koncentracijos glicerolio frakciją su daline oksidacija. *Energetika*. 2007. Nr. 3. P. 84–89.
3. Striūgas N. Granuliuotos biomasės dujinimo technologijos taikymo šilumos gamybai tyrimas. *Šilumos energetika ir technologijos – 2013: konferencijos pranešimų medžiaga*, Kauno technologijos universitetas, 2013 sausio 31 – vasario 1 d. Kaunas: Technologija, 2013. P. 23–28.
4. Striūgas N., Zakarauskas K., Džiugys A., Navakas R., Paulauskas R. An evaluation of performance of automatically operated multi-fuel downdraft gasifier for energy production. *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 73. Iss. 1. P. 1149–1157.
5. Striūgas N., Pedišius N., Poškas R., Valinčius V. Development of innovative thermal decomposition technology and its application for utilization of sewage sludge *The 23rd European Biomass Conference and Exhibition. Session 2CO.2.3, June 1–4, 2015, Vienna, Austria*. P. 546–549.

6. Kavaliauskas Ž., Valinčius V., Stravinskas G., Milieška M., Striūgas N. The investigation of solid slag obtained by neutralization of sewage sludge. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2015. Vol. 65. No. 11. P. 1292–1296.
7. Sharma V. K. Et al. Disposal of waste tyres for energy recovery and safe environment-review. *Energy Conversion Management*. 1998. Vol. 39. No. 5/6. P. 511–528.
8. Leung Y. C., Wang C. L. Fluidized bed gasification of waste tire powders. *Fuel Processing Technology*. 2003. Vol. 84. P. 176–196.
9. Leung Y. C., Wang C. L. Kinetic study of scrap tire pyrolysis and combustion, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1998. Vol. 45. P. 153–169.
10. Schmidthals H., Rose D. Untersuchngen zur thermischen Nutzung stückiger Sekundärbrennstoffe im Zementbrennprozess. Teil 1. *ZKG International* 1999. Vol. 52. No. 2. P. 88–97.
11. Schmidthals H., Rose D. Untersuchngen zur thermischen Nutzung stückiger Sekundärbrennstoffe im Zementbrennprozess. Teil 2. *ZKG International* 2001. Vol. 54. No. 4. P. 180–188.
12. Lietuvos Respublikos Vyriausybės nutarimas „Dėl valstybinio strateginio atliekų tvarkymo 2014–2020 metų plano patvirtinimo“ 2014 m. balandžio 16 d. Nr. 366. *TAR*, 2014-04-30, Nr. 4989.
13. Valinčius V., Krušinskaite V., Valatkevičius P., Valinčiute V., Marcinauskas L. Electric and thermal characteristics of the linear, sectional dc plasma generator. *Plasma Sources Science and Technology*. 2004. No. 2. P. 199–206.
14. Gasification and biomass council. <http://www.gasification-syngas.org>
15. Molino A., Chianese S., Musmarra D. Biomass gasification technology: The state of the art overview. *Journal of Energy Chemistry*. 2016. Vol. 25. Iss. 1. P. 10–25.
16. Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija. www.regula.lt.
17. Latvian large wood gasification CHP plant pays off. 05.03.15. <http://www.holz-kraft.de/en/news/actual/729-05-03-15-latvian-large-wood-gasification-chp-plant-pays-off>

Nerijus Striūgas, Anupras Šlančiauskas, Kęstutis Zakarauskas, Giedrius Stravinskas, Rolandas Paulauskas, Lina Vorotinskienė

BIOMASS AND WASTE GASIFICATION IN LITHUANIA: STATE OF THE ART AND FUTURE PERSPECTIVES

Summary

The practical application of biomass gasification in Lithuania is not known. For many years, the scientists from Lithuanian Energy Institute (LEI) have been working in the field of biomass and other waste material gasification, leading to the development of scrap tire gasification technology, research of gasification and combustion of solid organic waste and glycerol and catalytic removal of tar compound from producer gas produced by biomass gasification, as well as developed and introduced for widespread application in industry the equipment for liquid and gaseous fuel combustion. The available experience facilitated the development of technology for biomass and waste material gasification whose main feature is to produce gas by biomass gasification for application in process technologies.

This article reviews the research carried out in the Laboratory of Combustion Processes at LEI for the last ten years and the main results of experimental research in gasification of various types of biomass and waste material. As an output of these activities, the prototype equipment was developed for gasification of intact scrap tires and pelletized biomass and waste material, including dried wastewater treatment sludge. Novel scientific knowledge was acquired about the composition of producer gas, its calorific value and physical properties. The features and optimum conditions have been identified for gasification of biomass and waste material in the developed prototypes leading to the generation of the most calorific gas. Design and control properties were identified, and proposals were drawn up for more powerful equipment. Proposals for further enhancements of the equipment were outlined. The article also estimates the present situation and prospects of gasification technologies in Lithuania.

Keywords: biomass, sewage sludge, waste tire, gasification, synthesis gas, heat and power production