

Elektrostatinio filtro efektyvumo tyrimas deginant biokurą mažos galios katile

Robertas Poškas,

Arūnas Sirvydas,

Jurgis Jankauskas

*Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinės inžinerijos
problemų laboratorija,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas
El. paštas Robertas.Poskas@lei.lt*

Lietuvoje pastaruosiu metu plečiamas biokuro naudojimas pramoninėse katilinėse, taip pat jis populiarėja ir mažos galios namų katilinėse (populiarios ne tik malkos, įvairūs briketai, bet ir medžio granulės). Pagrindinis šio kuro trūkumas, palyginti su dujiniu arba skystu kuru, yra gana didelė įvairių dydžių kietųjų dalelių emisija. Ilgalais aplinkos užterštumas šiomis dalelėmis sukelia sveikatos problemų. Elektrostatinis įvairių degimo produktų filtravimas yra patikimas būdas sumažinti šias teršalų emisijas.

Straipsnyje pateiktas elektrostatinio filtro, skirto valyti 50 kW katilo dūmus, laboratorinis efektyvumo tyrimas. Pasitelkus esamas rekomendacijas, Lietuvos energetikos instituto Branduolinės inžinerijos problemų laboratorijoje buvo suprojektuotas ir pagamintas elektrostatinis filtras. Jis išbandytas naudojant 3-ios klasės 50 kW galios katilą. Tyrimai parodė, kad išlydžio elektrodui esant neigiamam, o surinkimo elektrodui – teigiamam (*negative potential*), mažiausia įtampa, kuriai esant atsiranda vainikinis išlydis, yra apie 6 kV. Prie šios įtampos gaunamas 77 % filtravimo efektyvumas. Esant 12 kV įtampai, gaunamas apie 99 % efektyvumas. Kai išlydžio elektrodas yra teigiamas (*positive potential*), vainikinis išlydis įvyksta prie ~10 kV.

Raktažodžiai: elektrostatiniai filtrai, biokuras, kietosios dalelės, mažos galios katilai

ĮVADAS

Biokuras (mediena, šiaudai, grūdai ir kt.) yra gana plačiai naudojamas daugelyje šalių šilumai ir elektros energijai gaminti [1] ir yra laikomas atsinaujinančiu energijos ištekliu [2], darančiu mažiausią poveikį aplinkai, dėl to jo suvartojimas didėja ne tik naujai, bet ir anksčiau pastatytose rekonstruojamose katilinėse Lietuvoje [3].

Pagrindinė biokuro rūšis Lietuvoje yra mediena, kurios naudojimas pastarąjį dešimtmetį sparčiai augo ir 2014 m. sudarė apie 1 ktne [4].

Pastaruosiu metu įvairus medienos kuras taip pat yra gana populiarus ne tik pramoninėse katilinėse, bet ir namų ūkiuose (malkos, įvairūs briketai, medžio granulės) [3]. Kadangi šis kuras yra laikomas atsinaujinančiu energijos ištekliu, tai ir pagal tarptautinį susitarimą CO₂, išsiskyres deginant biokurą, nėra laikomas šiltnamio efektą sukeliančiomis dujomis [2]. Tačiau vienas pagrindinių šio kuro trūkumų, palyginti biokurą su dujiniu ar skystuoju kuru, yra gana dideli kietųjų dalelių (KD) išmetimai į aplinką. Daugėjant biokurą deginančių įrenginių (katilinės, privatūs namai),

didėja ir KD emisijos. Pavojingiausias yra kietosios dalelės, ypač KD_{2,5} ($d \leq 2,5 \mu\text{m}$). Šios dalelės itin mažos ir gali prasiskverbti į kvėpavimo sistemą. Jos tokios smulkios, jog gali patekti ir į kraujotakos sistemą ar net vidaus organus. Ilgalais KD poveikis sukelia sveikatos problemų – dažniausiai pneumoniją, kardiovaskulines ligas ar net ankstyvą mirtį [5–7].

Europos Tarybos direktyvoje [8] nurodyta, kad: „Valstybės narės imasi būtinų priemonių užtikrinti, kad KD₁₀ koncentracijos aplinkos ore neviršytų nurodytų ribinių verčių“ bei „Veiksmų planais dėl KD₁₀, parengtais vadovaujantis Direktyvos 96/62/EB 8 straipsniu, ir bendrąja KD₁₀ koncentracijų aplinkos ore mažinimo strategija siekiama sumažinti ir KD_{2,5} koncentracijas“. Nors ir nėra griežtų reikalavimų KD emisijoms iš mažos galios katilų, tačiau tokių katilų vis daugėja (katilinės, privatūs namai ir pan.), dėl to neišvengiamai gali padidėti ir oro tarša kietosiomis dalelėmis. Aplinkosaugos problemoms tampant vis aktualesnėmis, pradėta koordinuoti reikalavimus mažųjų katilų įrangai, įskaitant biomase kūrenamus katilus [2]. Europos standartizacijos komitetas standartu EN 303-5:2012 [9] nustatė reikalavimus iki 500 kW nominaliosios galios kietu kuru kūrenamiems katilams. Šio standarto tikslas yra didinti katilų efektyvumą ir taip mažinti emisijas (taip pat ir kietųjų dalelių).

Gana efektyviai KD galima sugaudyti (nusodinti) elektrostatiniais filtrais (nusodintuvais). Elektrostatiniai filtrai (ESF) plačiai taikomi didelės galios katilinėse, tačiau kol kas retai – mažos galios katilinėse [10]. Pastarojo tipo katilinėse pirmenybė teikiama paprastiems, kompaktiškiems ir nebrangiems sprendimams siekiant išvengti su biokuro deginimu susijusių oro taršos problemų. Darbe [10] kaip tik spjėtos šios problemos naudojant pačių autorių sukonstruotą elektrostatinį filtrą. Kietųjų dalelių „gamybai“ naudotas biokuru kūrenamas katilas, kurio šiluminė galia – 100 kW. Atlikti eksperimentai parodė, kad gali būti pasiektas didesnis kaip 70 % bendras kietųjų dalelių sugaudymo efektyvumas.

Kitame darbe [11] nurodyta, kad Švedijoje daugėja mažų biokuru kūrenamų katilinių ir atsiranda poreikis naudoti rentabilius įrenginius, ypač smulkioms kietosioms dalelėms sugaudyti. Vienas tokių metodų galėtų būti elektrostatinis filtras. Darbe aprašomi nedidelės kainos gamyklinio elektrostatinio filtro bandymai, kurių metu buvo atlikti

sugaudymo efektyvumo tyrimai. Viengubo filtro atveju 0,04–0,12 μm kietųjų dalelių diapazone nustatytas sugaudymo efektyvumas siekė 30 ir 40 %, o dvigubo filtro atveju tame pačiame dalelių dydžio diapazone 55 ir 65 %.

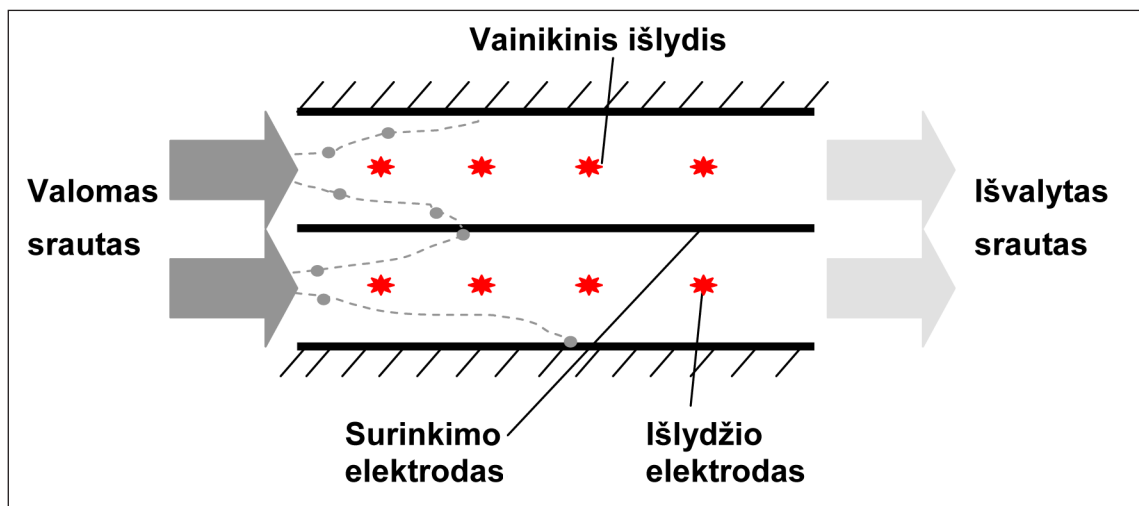
Darbe [12] pateikti rezultatai, gauti bandant specifinę elektrostatinio filtro konstrukciją. Čia įvertintas šio ESF sugaudymo efektyvumas bei elektrinės savybės. Analizuotas skirtingos geometrijos ir elektrodų išdėstymas siekiant sukurti sistemą, kurią būtų galima įdiegti ir į jau sukonstruotus įrenginius. Tiriamojo filtro sugaudymo efektyvumas buvo daugiau kaip 80 %, o patobulinus elektrodų formą sugaudymo efektyvumas padidėjo iki ~90 %. Įrodyta, kad net esant kritiniam dalelių dydžiui (apie 0,1 μm) galima pasiekti didelį sugaudymo efektyvumą. Darbe pasiektas dalelių emisijos sumažėjimas buvo daug didesnis nei tai galima buvo pasiekti toliau tobulinant degimo kokybę.

Šiame straipsnyje pateikiami Lietuvos energetikos instituto Branduolinės inžinerijos laboratorijoje suprojektuoto ir pagaminto ESF, skirto mažos galios katilams, tyrimo rezultatai.

ELEKTROSTATINIŲ FILTRŲ TAIKYMAI IR VEIKIMO PRINCIPAS

Deginant bet kokį organinį kurą (įskaitant biokurą), degimo produktuose atsiranda įvairūs kiekiai skirtingų dydžių kietųjų dalelių. Kaip minėta, šios dalelės yra pavojingos gyvajai gamtai ir žmonių sveikatai. Todėl prieš išleidžiant degimo produktus į atmosferą jie turi būti valomi iki leistinų normų. Šiuo metu yra didelis dūmų valymo priemonių pasirinkimas, tačiau elektrostatiniai filtrai pasižymi itin dideliu efektyvumu (iki 99 %) ir galimybe sugaudyti filtruojamajame sraute labai mažo skersmens ($\leq 1 \mu\text{m}$) kietąsias daleles vartodami mažai elektros energijos.

Paprastai elektrostatinų filtrų konstrukcija yra sudaryta iš n skaičiaus nuosekliai arba lygiagrečiai sujungtų sekcijų, per kurias teka valomas srautas. Kiekvienoje i -tojoje sekcijoje (1 pav.) yra k_i jonizuojančiųjų elektrodų ir surinkimo elektrodų, kurių plotas A_i . Kiekvienos i -tosios sekcijos efektyvumas priklauso nuo srauto greičio u , srauto temperatūros t , kietųjų dalelių savitosios elektrinės varžos ρ , elektrinio lauko stiprumo E_p , kuris priklauso nuo įtampos sekcijoje U_p , ir išlydžio bei surinkimo elektrodų geometrijos. Galimi du įtampos



1 pav. Supaprastinta dalelių surinkimo įelektrinant elektriniu lauku schema

poliarumo elektrostatiniame filtre atvejai: išlydžio elektrodai teigiami, surinkimo elektrodai neigiami arba išlydžio elektrodai neigiami, surinkimo elektrodai teigiami. Elektrostatiniai filtrai taip pat paprastai turi surinkimo elektrodų nuvalymo ir teršalų surinkimo sistemas. Pagal surinkimo elektrodų valymo būdą elektrostatiniai filtrai skirstomi į sauso ir šlapio tipo. Sauso tipo filtruose surinkimo elektrodai valomi mechaniškai – vibruojant, daužant ir pan. Šlapio tipo filtruose – valoma ant surinkimo elektrodų paduodant vandenį.

Sausi ESF naudojami pramonėje, naftos perdirbimo procesuose bei įvairių kuro rūšių katilinėse. Šlapi ESF dažniausiai naudojami tais atvejais, kai yra agresyvi aplinka, t. y. kai susiduriama su sieros rūgšties garais, deginant koksą, dervai valyti, deguonies prisotintose krosnyse, aliuminiui gaminti ir t. t.

Net ir ore iš esmės yra mažai ($1/\text{mm}^3$ eilės) [13] laisvųjų elektronų ir teigiamai jonizuotų molekulių, atsirandančių dėl kosminės spinduliuotės. Tad erdvėje tarp elektrodų pasiekus pakankamai aukštą elektrinio lauko stiprumą, prie išlydžio elektrodo prasideda smūginė dujų jonizacija.

Smūginės dujų jonizacijos metu, kai vyksta išlydis, prie neigiamo elektrodo (surinkimo elektrodas yra teigiamas) laisvieji elektronai, toldami nuo aktyviojo elektrodo, praranda greitį (dėl elektrinio lauko nevienalytiškumo) ir dalis jų prisijungia prie neutralių dujų molekulių – susi-

daro neigiami dujų jonai. Neigiami dujų jonai, judėdami link teigiamo elektrodo, susiduria su teršalų dalelėmis ir absorbuojasi jų paviršiuje, suteikdami joms neigiamą elektros krūvį. Įelektrintos kietosios dalelės, gavusios elektros krūvį, nusėda ant surinkimo elektrodo ir išsielektrina.

Kai išlydžio elektrodas yra teigiamas, o surinkimo elektrodas neigiamas, prie išlydžio elektrodo iš neutralių dujų molekulių yra išplėšiami elektronai ir sukuriama teigiami dujų jonai, kuriuos pagreitina elektrinis laukas. Pagreitę teigiami jonai susiduria su teršalų dalelėmis ir absorbuojasi jų paviršiuje. Taip dalelės, gavusios elektros krūvį, keliauja link neigiamo surinkimo elektrodo ir prie jo prilimpa. Ten iš aukštos įtampos šaltinio gauna trūkstantus elektronus ir išsielektrina.

Be smūginio jonizacijos mechanizmo, dar yra difuzinis, kai dujų jonai nusėda ant teršalų dalelių paviršiaus dėl jonų šiluminio judėjimo. Abu įelektrinimo būdai veikia vienu metu, tačiau smūginis įelektrinimas pasireiškia labiau, kai dalelės yra didesnės nei $1\ \mu\text{m}$, difuzinis – jei mažesnės nei $0,2\ \mu\text{m}$. $0,2\text{--}1\ \mu\text{m}$ dydžio dalelėms efektyvūs abu mechanizmai [13]. Susidarant neigiamiems dujų jonams, jonizacijos energija yra proporcinga dujų elektronų giminingumui gaunant teigiamus jonus – energija proporcinga jonizacijos laipsnio kvadratui [14]. Todėl teigiamiems jonams susidaryti reikia didesnės energijos, kuri gaunama iš elektrinio lauko, ir reikia stipresnio elektrinio lauko (aukštesnės įtampos) negu neigiamų jonų atveju.

ESF KONSTRUKCINIAI SKAIČIAVIMAI

Ši metodika skirta plokštelių ESF konstrukcijos elementų parinkimui skaičiuoti, tačiau leidžia apytiksliai įvertinti ir vamzdinius ESF.

Norint nustatyti greitį (dalelių migravimo greitį), kuriuo dalelė po įelektrinimo keliauja iki surinkimo elektrodo, taikoma formulė [15]:

$$W = \frac{qE_p}{6\pi\mu r}, \quad (1)$$

čia: $q = f$ (kietųjų dalelių savitosios elektrinės varžos, kietųjų dalelių įelektrinimo tikimybės ir t. t.) – dalelės elektrinis krūvis (C), E_p – įelektrinimą dalelę veikiantis laukas (V/m), μ – dinaminė klampa (Pa·S), r – dalelės spindulys (μm).

Elektros krūvis, kurį įgauna dalelė veikiamą elektrinio lauko, aprašomas lygtimi [15]:

$$q = (3\pi\epsilon_0 E_0) d_p^2, \quad (2)$$

čia: ϵ_0 – dielektrinė konstanta, E_0 – dalelę įelektrinančio elektrinio lauko stipris (V/m), d_p – dalelės skersmuo μm .

E_p priklauso nuo įtampos ir surinkimo bei įelektrinimo elektrodų išdėstymo; E_0 priklauso nuo pridėtos įtampos ir surinkimo bei išlydžio elektrodų išdėstymo, dujų molekulių jonizacijos energijos ir įtampos poliarumo.

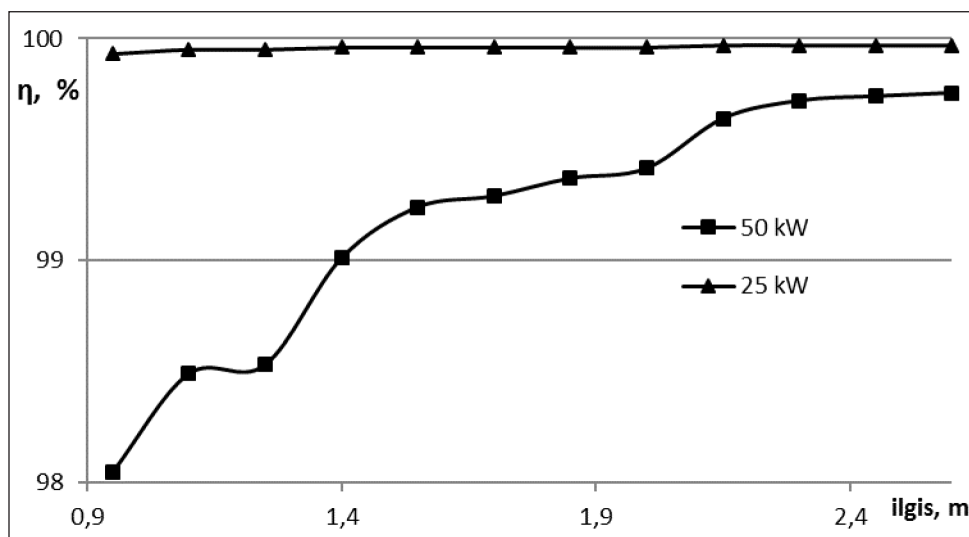
Dalelių sugaudymo efektyvumą aprašo Deutsch-Anderson lygtis [15–17]:

$$\eta = 1 - e^{-w(A/Q)}, \quad (3)$$

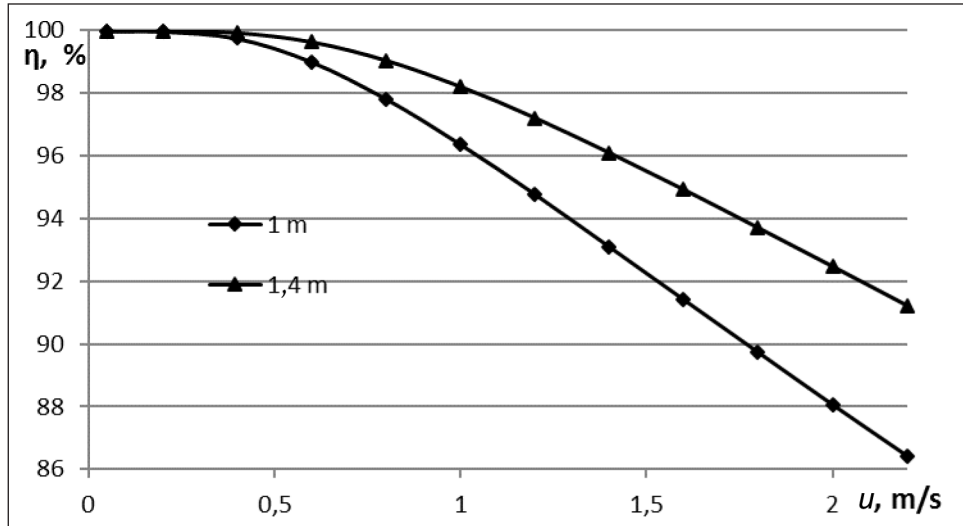
čia: η – ESF surinkimo efektyvumas, w – dalelių migracijos greitis (m/s), A – efektyvus ESF surinkimo plokštės plotas (m^2), Q – dujų debitas per ESF (m^3/s).

Pasinaudodami anksčiau aprašytomis lygtimis ir įvertindami elektrinio lauko stiprumus pagal žinomą įtampą ir elektrodų išdėstymo geometriją sekcijose, skaičiuojame filtro efektyvumus esant įvairioms pradinėms sąlygoms. Kietųjų dalelių sugaudymo efektyvumo priklausomumas nuo filtro ilgio parodytas 2 pav. Nuo 25 iki 50 kW katilo galiai modeliuotas efektyvumas yra ne mažesnis nei 98 %. Tuo tikslu pasirinkus 10,8 kV įtampą teigiamo poliarumo išlydžio elektrodai, plokštelinio filtro surinkimo elektrodų aukštį 0,14 m ir keičiant filtro ilgį nuo 1 m iki 2,6 m buvo suskaičiuoti efektyvumai. 2 pav. parodyta, kad 50 kW galios atveju reikiama efektyvumą atitinka filtras, kurio ilgis 1,4 m. Palyginimui parodyta, kaip keisis filtro darbas, jei katilas bus 25 kW galios. Parodyta, kad 25 kW galios katilui jau prie filtro ilgio 0,9 m gauname 99,9 % efektyvumą.

Kietųjų dalelių filtravimo efektyvumo priklausomumas nuo srauto greičio parodytas 3 pav. Matome, kad katilo galiai esant 50 kW, pageidaujamas 98 % filtravimo efektyvumas gaunamas, kai filtro ilgis yra 1,4 m. Palyginimui skaičiuoti filtro efektyvumai, kai filtro ilgis 1,2 ir 1,0 m.



2 pav. Kietųjų dalelių filtravimo efektyvumo priklausomumas nuo filtro ilgio



3 pav. Kietųjų dalelių filtravimo efektyvumo priklausomumas nuo filtruojamojo srauto greičio esant skirtingiems filtro ilgiams

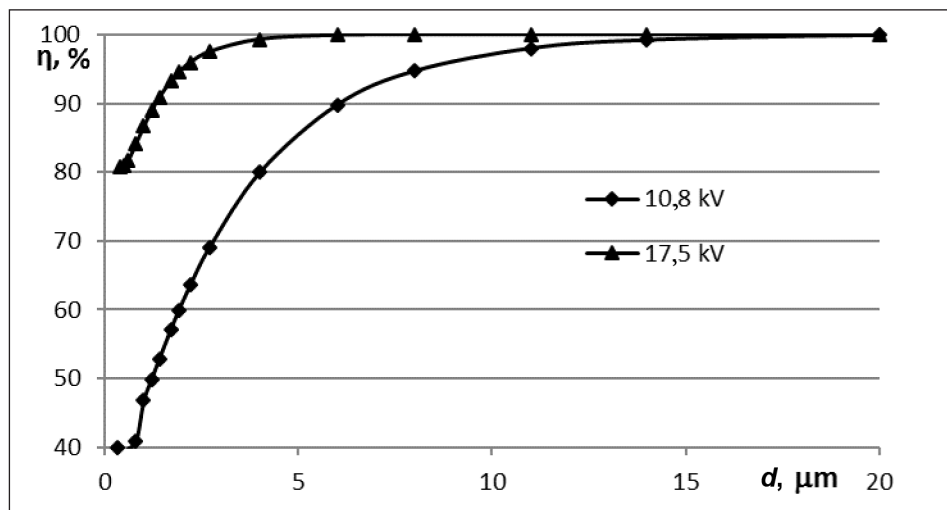
Parodyta, jog abiem atvejais, esant tam pačiam srauto judėjimo greičiui (1,03 m/s), negaunamas reikiamas filtravimo efektyvumas.

Anksčiau minėto 1,4 m ilgio filtro filtravimo efektyvumo priklausomumas nuo dalelių dydžio parodytas 4 pav. Mažas daleles sugaudyti yra sunkiau, nes jos dėl savo mažo dydžio įelektrini- mo procese sukaupia mažiau elektrinio krūvio. Dėl to jas elektrinis laukas veikia silpniau. Matome, kad didėjant filtrui paduodamai įtampai nuo 10,8 iki 17,5 kV, su ne mažesniu kaip 90 % efektyvumu sugaunamos nuo 7 iki 2,5 μm skersmens dalelės.

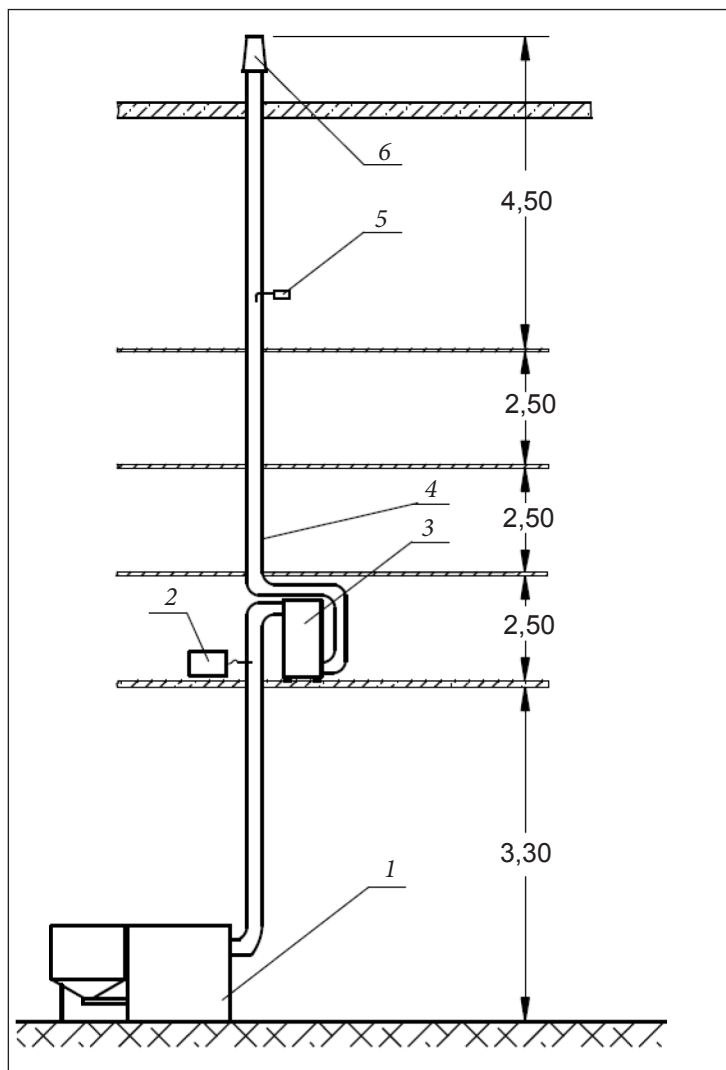
EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA

Eksperimentinis ruožas, kuris buvo naudojamas elektrostatinio filtro savybėms tirti, parodytas 5 pav. Dūmai ($\sim 177 \text{ m}^3/\text{h}$) su juose esančiomis kietosiomis dalelėmis iš automatinio medienos granules deginančio katilo (50 kW) patenka į ESF, pastarajame nusodinamos KD, po to išvalyti dūmai per kaminą ($\varnothing 180 \text{ mm}$) išmetami į aplinką.

Elektrostatinį filtrą sudaro metalinis rėmas, kuriame sumontuoti du nusodinimo ($d = 0,12 \text{ m}$, $l \approx 1 \text{ m}$) ir du išlydžio elektrodai. Išlydžio



4 pav. Kietųjų dalelių filtravimo efektyvumo priklausomumas nuo dalelių diametro



5 pav. Eksperimentinio ruožo schema: 1 – kietojo kuro katilas; 2 – dūmų sudėties matuoklis; 3 – elektrostatinis filtras; 4 – kaminas; 5 – kietųjų dalelių matuoklis; 6 – dūmtraukis

elektrodams naudota 0,2 mm skersmens nichromo viela. Išlydžio elektrodai sujungti su aukštos įtampos šaltiniu, kuriuo įtampą galima keisti nuo 0 iki 30 kV. Apačioje įrengtas bunkeris pelenams surinkti.

Išmatavus ESF voltamperinę charakteristiką paaiškėjo, kad jai galima taikyti modifikuotą Townsendo lygtį, kuri dažnai taikoma elektrostatinių filtrų voltamperinėms charakteristikoms aprašyti [18]. Pagal išmatuotą voltamperinę charakteristiką nustatyta, kad įtampa, kuriai esant atsiranda vainikinis išlydis, yra lygi 6 kV.

Kietųjų dalelių kiekis dūmuose buvo matuojamas KD matuokliu, galinčiu nustatyti kietąsias daleles, kurių skersmuo nuo 0,4 iki 300 μm . Toks kietųjų dalelių pasiskirstymo dūmtakyje pagal jų skersmenį nustatymo metodas yra vadinamas spektriniu metodu. KD matuoklio veikimas pa-

grįstas infraraudonųjų spindulių išsklaidymu. Infraraudonuosius spindulius išsklaido KD, judėdamos per matavimo zoną. Kiekviena dalelė, judėdama per matavimo zoną, generuoja elektrinį impulsą, proporcingą sferinės dalelės skersmeniui. Jei dalelė yra ne sferinė, tada impulso dydis priklauso nuo to, kaip dalelė yra orientuota matavimo zonoje. Taigi, šiuo įrenginiu yra matuojamas tik vienas dalelės matmuo. KD matavimai buvo atliekami po 2 min. (nesiskyrė nuo matavimų, kurie truko 5 min., todėl pasirinktas trumpesnis matavimų laikas).

KD matavimo įranga (matavimo galvutė) sumontuota atstumu, ne mažesniu kaip 5 hidrauliniai skersmenys, dūmų tekėjimo kryptimi už bet kokios kliūtis esančios prieš ją (pvz., už elektrostatinio filtro). Už pačios matavimo galvutės dūmų srauto tekėjimo kryptimi atstumu, ne mažesniu kaip 2

hidrauliniai skersmenys, taip pat nebuvo jokių dūmų srauto tekėjimą trikdančių kliūčių.

Siekiant gauti reprezentatyvius rezultatus, atliekami keli kietųjų dalelių matavimai ir imamas jų vidurkis. Matavimų rezultatai išsaugomi kompiuteryje.

Katiliui pasiekus stabilų darbo režimą, pirmieji matavimai atliekami su išjungtu, po to su įjungtu ESF. Abiejų matavimų (be elektrostatinio filtro ir su juo) rezultatų palyginimas (pvz., dalelių kiekio pasiskirstymo priklausomumas nuo dalelių skersmens) leidžia nustatyti dalelių kiekių pokyčius ir įvertinti elektrostatinio filtro efektyvumą.

TYRIMŲ REZULTATAI

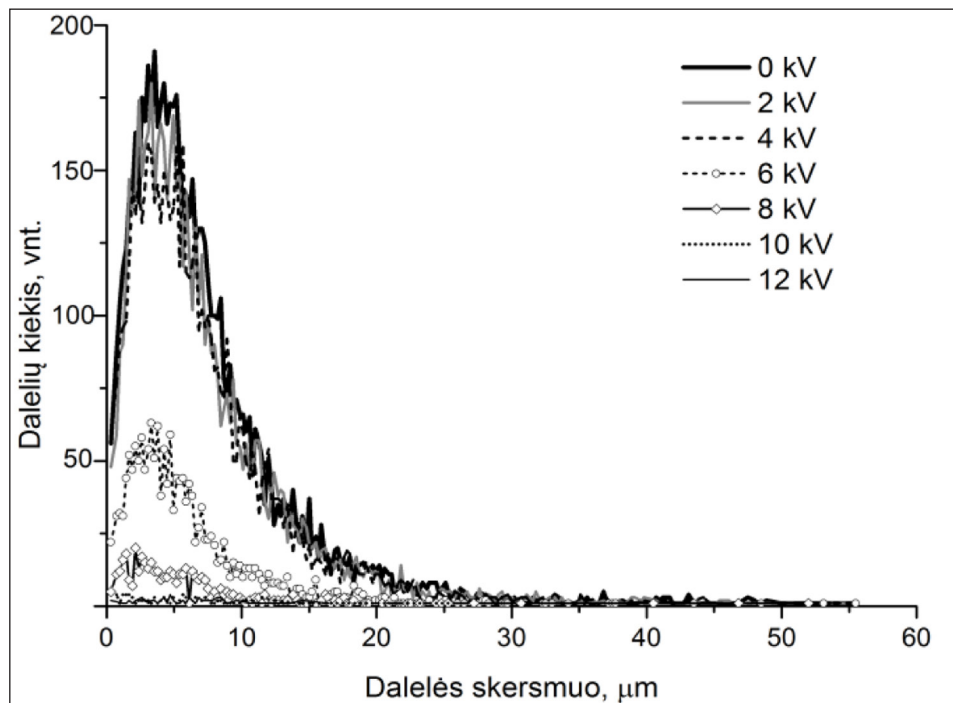
Kietųjų dalelių kiekio pasiskirstymo priklausomumas nuo įtampos ant ESF išlydžio elektrodo, kai išlydžio elektrodas yra neigiamas, parodytas 6 pav.

Kol įtampa nebuvo prijungta (0 V), nustatyta, kad dūmuose daugiausia yra dalelių, kurių skersmuo nuo 0,4 iki ~20 μm. Vyrauja dalelės, kurių skersmuo siekia ~4 μm. Kai įtampa ESF buvo padidinta iki 2 ar 4 kV, po filtro buvo nustatytas nedidelis KD kiekio sumažėjimas. Kai įtampa buvo 6 kV, t. y. įtampa, kuriai esant ant išlydžio elektrodo jau prasideda vainikinis išlydis, pastebėtas gana aki-

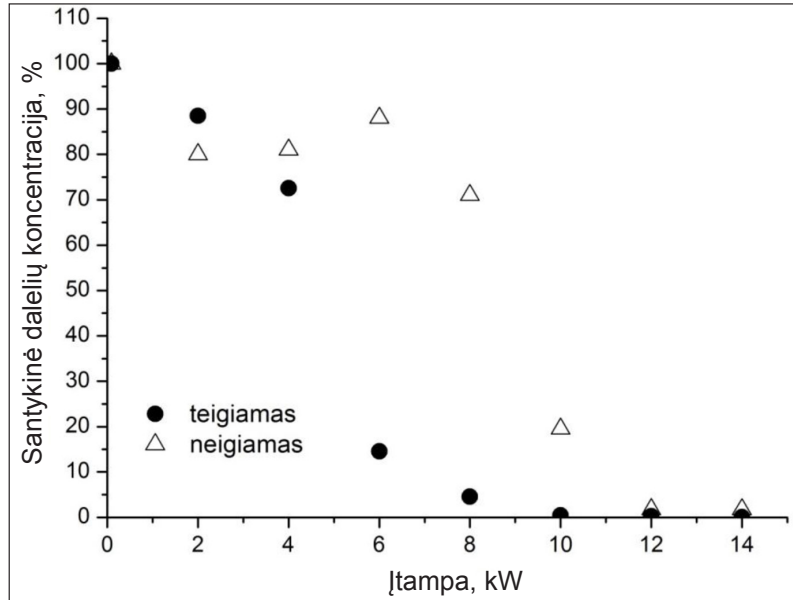
vaizdus KD kiekio sumažėjimas. Tolesnis įtampos didinimas iki 8 ar 10 kV rodo ženklų dalelių kiekio mažėjimo tendenciją. Kai įtampa buvo padidinta dar daugiau – iki 12 kV, tokio didelio KD kiekio mažėjimo efekto jau nebuvo gauta.

Apskaičiuotas santykinės dalelių koncentracijos kitimas, priklausomai nuo į ESF paduodamos įtampos, kai išlydžio elektrodas yra neigiamas, parodytas 7 pav. (taškai). Iš pradžių įtampos padidėjimas iki 4 kV leido sumažinti kietųjų dalelių koncentraciją apie 25 % (t. y. KD koncentracija buvo apie 75 %). Po to, įtampą padidinus iki 6 kV, t. y. iki minimalios įtampos, kuriai esant prasideda išlydis ant ESF išlydžio elektrodo, KD koncentracija sumažėjo iki 75 %, palyginti su matavimais, esant nuliniai įtampai. Įtampos padidėjimas iki 8 kV dalelių koncentraciją dar labiau sumažino (iki ~95 %). Kai įtampa buvo 10 ar 12 kV, dalelių koncentracija praktiškai nebekito ir buvo apie 0,3 %. Taigi, ESF panaudojimas leido sumažinti KD koncentraciją dūmuose daugiau nei 99 %.

Dalelių koncentracijos kitimas, atsižvelgiant į ESF paduodamą įtampą, kai išlydžio elektrodas yra teigiamas, parodytas 7 pav. (trikampiai). Kaip matyti, padidinus įtampą nuo 0 iki 6 kV, koncentracijos sumažėjimas yra labai nedidelis. Staičius koncentracijos mažėjimas stebimas 6–10 kV



6 pav. Kietųjų dalelių kiekio pasiskirstymo priklausomumas nuo įtampos ant ESF elektrodo

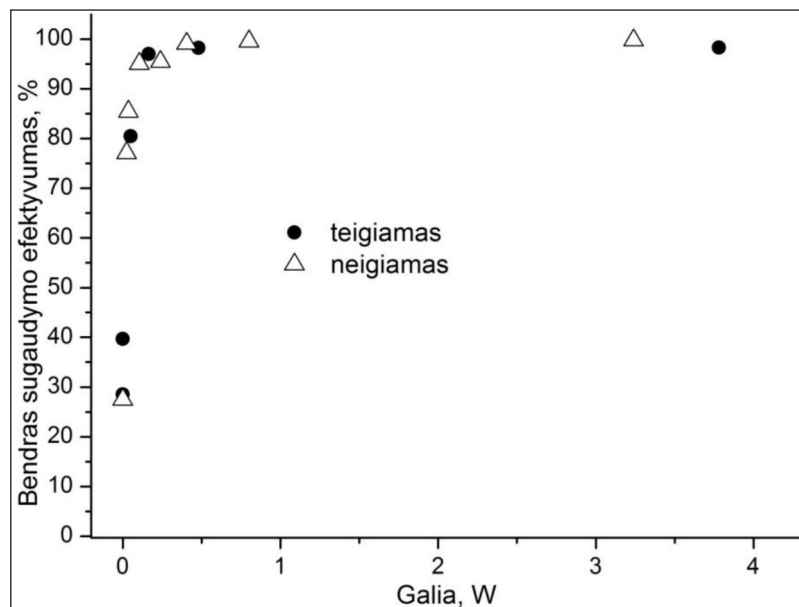


7 pav. Santykinės kietųjų dalelių koncentracijos kitimas atsižvelgiant į įtampą, paduodamą į ESF

intervale. Čia vainikinis išlydis yra prie ~10 kV. Toliau didinant įtampą prie 12–14 kV pasiekiamas ~98 % efektyvumas.

8 pav. pateiktas bendro sugaudymo efektyvumo, atsižvelgiant į ESF galią, kitimas. Bendras ESF sugaudymo efektyvumas skaičiuotas kaip sugaudymo efektyvumo vidutinė vertė, o ESF galia gauta sudauginus ESF išlydžio elektrodui tiekiamą srovę ir įtampą. Iki vainikinio išlydžio, nors galia

lygi ~0 W (t. y. srovė tokia maža, kad praktiškai yra neišmatuojama), maksimalus bendras ESF sugaudymo efektyvumas šiek tiek padidėja ir neigiamo potencialo atveju pasiekia ~30 %. Vainikinio išlydžio įtampos atveju (6 kV) galia buvo ~0,04 W, o bendras sugaudymo efektyvumas – beveik 85 %. Šiek tiek padidinus galią virš vainikinio išlydžio įtampos, sugaudymo efektyvumas siekė ~95 %. Toliau didinant galią gautas tik nedidelis sugaudymo



8 pav. Bendro dalelių sugaudymo efektyvumo priklausomumas nuo ESF galios neigiamo ir teigiamo potencialo atveju

efektyvumo padidėjimas. Net ir tada, kai galia buvo >3 W, sugaudymo efektyvumas neviršijo 99 %.

Atliekant bandymus su teigiamu potencialu gauti panašūs rezultatai, tik maksimalus sugaudymo efektyvumas buvo šiek tiek mažesnis ir neviršijo 98 %.

IŠVADOS

Atlikus elektrostatinio filtro efektyvumo tyrimus deginant biokurą mažos galios katile galima daryti tokias išvadas:

1. Minimali įtampa, kuriai esant atsiranda elektrodo vainikinis išlydis, yra apie 6 kV, kai išlydžio elektrodas yra neigiamas, ir apie 10 kV, kai išlydžio elektrodas yra teigiamas.

2. Kai elektrodų įtampa 12–14 kV, abiem atvejais yra pasiekiamas 98–99 % ESF efektyvumas.

PADĖKA

Tyrimus finansavo Lietuvos mokslo taryba pagal projektą ATE-02/2012 BOKONVERS.

Gauta 2015 03 12

Priimta 2015 11 25

LITERATŪRA

- Demibras A. Combustion systems for biomass fuel. *Energy Sources*. 2007. Vol. 29(4). P. 303–312.
- Biokuro naudotojo žinynas*. Tallinn University of Technology, 2007. 167 p.
- Vonžodas T., Pedišius N., Valantinavičius M. Mažos galios biokuru kūrenamų vandens šildymo katilų veikimo parametrų tyrimas. *Energetika*. 2013. Vol. 59(2). P. 93–109.
- Kuro ir energijos balansas 2014*. Lietuvos statistikos departamentas, 2015. 54 p.
- Zelikoff J. T., Chen L. C., Cohen M. D., Fang K., Gordon T., Li Y., Nadziejko C., Schlesinger R. B. Effects of inhaled ambient particulate matter on pulmonary antimicrobial immune defense. *Inhalation Toxicology*. 2003. Vol. 15(2). P. 131–150.
- de Hartog J. J., Hoek G., Peters A., Timonen K. L., Ibaldo-Mulli A., Brunekreef B., Heinrich J., Tiittanen P., van Wijnen J. H., Kreyling W., Kulmala M., Pekkanen J. Effects of fine and ultrafine particles on cardiorespiratory symptoms in elderly subjects with coronary heart disease: the ULTRA study. *American Journal of Epidemiology*. 2003. Vol. 157(7). P. 613–623.
- Brunekreef B., Holgate S. T. Air pollution and health. *Lancet*. 2002. Vol. 360 (9341). P. 1233–1242.
- Tarybos direktyva 1999/30/EB 1999 m. balandžio 22 d. dėl sieros dioksido, azoto dioksido, azoto oksidų, kietųjų dalelių ir švino ribinių verčių aplinkos ore.
- LST EN 303-5:2012. Šildymo katilai. 5 dalis. Rankomis ir automatiškai pakraunami kietojo kuro šildymo katilai, kurių vardinė šiluminė galia iki 500 kW. Terminija, reikalavimai, bandymai ir ženklavimas.
- Intra P., Limueadphai P., Tippayawong P. Particulate emission reduction from biomass burning in small combustion systems with a multiple tubular electrostatic precipitator. *Particulate Science and Technology*. 2010. Vol. 28(6). P. 547–565.
- Pettersson J., Strand M., Lin L. Charging- and removal efficiency of an ESP in a 250 kW biomass boiler. *Proceedings of the XII International Conference on Electrostatic Precipitation, ICESP Nürnberg*. 2011.
- Schmatloch V., Rausch S. Design and characterisation of an electrostatic precipitator for small heating appliances. *Journal of Electrostatics*. 2005. Vol. 63(2). P. 85–100.
- Baltrėnas P., Bakas A., Kaulakys J. *Elektrostatiniai oro valymo filtrai*. Vilnius: Technika, 1998.
- Mizuno A. Electrostatic Precipitation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2000. Vol. 7(5). P. 615–624.
- Compliance Assistance Technical Manuals Series: Stationary Source Air Pollution Control Devices and Techniques. <http://www.arb.ca.gov/homepage.htm>
- EPA. PTI 413: Control of Particulate Matter Emissions, Chapter 9.
- Parker K. *Electrical Operation of Electrostatic Precipitators*. London, Blackie Academic & Professional, 1997.
- Leal Ferreira G. F., Oliveira O. N., Giacometti J. A. Point-to-plane corona: Current-voltage characteristics for positive and negative polarity with evidence of an electronic component. *Journal of Applied Physics*. 1986. Vol. 59(9). P. 3045–3049.

Robertas Poškas, Arūnas Sirvydas, Jurgis Jančiauskas

**INVESTIGATION OF THE EFFICIENCY OF
ELECTROSTATIC PRECIPITATOR WHEN
BURNING BIOFUEL IN A SMALL BOILER**

Summary

In Lithuania, the use of biofuel is currently increasing not only for centralized heat generation, but it is also a popular type of fuel for small-scale household furnaces. The main disadvantage of this type of fuel in comparison to combustion of gaseous or liquid fuels is rather high emissions of coarse, fine, and ultrafine solid particles. Long-term exposure to such types of par-

ticulate matters causes health problems. Electrostatic precipitation is a very reliable method to decrease particulate emissions from boilers, incinerators, and other industrial processes.

This paper presents the results of investigation of the electrostatic precipitator efficiency for a 50 kW boiler when burning biofuel. It was shown that the minimum voltage of the corona discharge is equal to 6 kV. At that voltage, a total collection efficiency of 77% was achieved. At the highest tested voltage (12 kV), the total collection efficiency was about 99%.

Key words: electrostatic precipitator, biofuel, fly ash particles, small boilers