

AGLOMERAVIMO PROCESAIŠ PAREMTŲ DUJŲ SRAUTO VALYMO TECHNOLOGIJŲ TAIKYMAS IR PALYGINIMAS

Stanislovas ZDANEVIČIUS¹, Aleksandras CHLEBNIKOVAS^{2*}

¹Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Mechanikos fakultetas,
Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra, Vilnius, Lietuva

²Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Mechanikos fakultetas,
Mechanikos mokslo institutas, Vilnius, Lietuva

*El. paštas aleksandras.chlebnikovas@vilniustech.lt

Gauta 2024 m. kovo 4 d.; priimta 2024 m. kovo 18 d.

Santrauka. Aplinkos oro kokybė yra laikoma vienu iš tvarios gyvensenos rodiklių. Kietosioms dalelėms šalinti plačiai taikomos tradicinės valymo technologijos, pagrįstos gravitaciniu, išcentrinu, elektrostatiniu ir kitais veikimo principais. Šios technologijos nėra efektyvios šalinant žmogui žalingas, ultrasmulkias, iki 1 μm , kietąsias daleles iš dujų srauto. Tokio tipo kenksmingus žmogui ir aplinkai smulkiųjų dalelių teršalus galima paveikti akustine ar elektros lauko aglomeracija. Vykstant aglomeracijai smulkios dalelės susijungia į didesnę, vientisą dalelę, kurią galima efektyviai nusodinti ir (arba) pašalinti iš dujų srauto tradicinėmis valymo technologijomis. Įvairiose pramonės šakose taikoma aglomeracija gali paversti dulkių frakcijas arba sunkiai apdorojamas medžiagas lengviau valdoma forma. Darbe analizuojamos aktualios, kenksmingiausios žmogui kietosios dalelės, kurių dydis yra nuo 2 μm iki 10 μm , taip pat įvairių aglomeracijos tipų taikymo būdai, kuriais apdorojamas pirminis dujų srautas prieš valymą paveikiant dujų sraute esančias smulkiasias daleles. Remiantis pasauline literatūra buvo aptartos įvairių tipų aglomeracijos technologijos.

Reikšminiai žodžiai: kietosios dalelės, akustinė aglomeracija, elektros lauko aglomeracija, dujų srautas.

1. Įvadas

Aplinkos oro kokybė yra laikoma vienu iš tvarios gyvensenos rodiklių. Vykstant pramonės revoliucijai absoliučios daugumos gamybos technologinių procesų metu susidaro kenksmingi žmogui ir aplinkai teršalai.

Smulkiadispersės kietosios dalelės (mažesnės nei 5 μm) (SDKD) ir ultrasmulkios kietosios dalelės (mažesnės nei 1 μm) (USKD) lengvai patenka į plaučius bei kvėpavimo takus. Kenksmingiausios žmogui kietosios dalelės, kurių dydis yra iki 2 μm (Brunetti et al., 2020; Fiordelisi et al., 2017).

Kietosioms dalelėms (KD) nusodinti plačiai taikomos tradicinės filtravimo technologijos, pagrįstos gravitaciniu, išcentrinu, elektrostatiniu ir kitais veikimo principais. Šiais principais veikiantys filtrai yra tinkami stambesnėms nei 2,5 μm KD šalinti (Yang et al., 2010). Susiduriama su problema, kad smulkiųjų frakcijų šalinimo iš dujų srauto efektyvumas nėra pakankamas, atsižvelgiant į rekomenduojamas emisijų normas ir ateities

perspektyvas mažinti šio pobūdžio taršą. Taip pat esamos technologijos nėra pritaikytos arba nėra efektyvios esant plataus diapazono ir (arba) didelės koncentracijos KD srautui, todėl yra būtinas pirminis užteršto dujų srauto valymas arba specialus apdorojimas prieš pasitelkiant jau minėtas plačiai taikomas filtravimo technologijas (Guo et al., 2017).

Tyrimo tikslas – išanalizuoti taikomus aglomeravimo metodus, jais paremtų technologijų privalumus ir trūkumus bei galimybes taikyti siekiant SDKD paveikti prieš dujų srauto valymo procesą.

2. Aglomeravimo technologijos

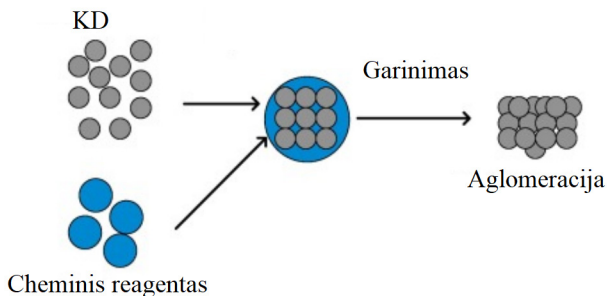
Siekiant pagerinti KD filtravimo efektyvumą galima pasitelkti įvairias aglomeracijos technologijas, kurios leidžia padidinti KD prieš joms patenkant į valymo įrenginius. Galimos aglomeracijos technologijos yra šios: elektros lauko aglomeracija (Jia et al., 2024; Thonglek & Kiatsiriroat, 2014), cheminė aglomeracija (Guo et al.,

2017; Liu et al., 2016), heterogeninė kondensacinė aglomeracija (Yang et al., 2010), turbulentinė aglomeracija (Chen et al., 2016; Sun et al., 2020) ir akustinė aglomeracija (Ng et al., 2017; Sheng & Shen, 2007).

Elektros lauko aglomeracijos procese dvifazį srautą sudarančiame dujų sraute tvyrančios kietosios aerosolio dalelės patenka tarp plokščių elektrodų, tarp kurių sukuriamas dvipolis elektrinis laukas, paduodant kintamąjį elektros įtampą, į lauką patekusios KD pradeda aglomeruotis. Aglomeracijos efektyvumą galima koreguoti keičiant paduodamos įtampos dydį, maitinimo įtampos dažnį ir reguliuojant pratekančio per įrenginį (aglomeratorių) dujų srauto greitį. Keičiant įrenginio parametrus buvo bandoma rasti didžiausią aglomeracijos efektyvumą (Jia et al., 2024).

Naudojant elektrostatinį lauką KD efektyviausiai aglomeruojasi nuo 200 nm iki 1 μm (Jaworek et al., 2018). Moksliniame tyrime (Lin et al., 2020) taip pat teigiama, kad elektros lauko aglomeracija yra efektyviausia nuo 100 nm iki 1 μm USKD. Elektros lauko aglomeraciją galima taikyti USKD 40,2 % efektyvumu, pasirinkus 45 Hz dažnį ir 9 kV/cm kintamos srovės lauką, efektyvius aglomeracijos ribos yra 0,1–20 μm KD.

Atliekant cheminio aglomeravimą į užterštą KD dujų srautą įpurškiamas cheminis reagentas (1 paveikslas). KD susidūrimui ir aglomeracijai skatinti pasitelkiami fiziniai ir cheminiai procesai. Taikant tokią cheminio aglomeravimo technologiją yra galimybė sulipinti KD į didesnius darinius (Bin et al., 2018; Guo et al., 2017).



1 paveikslas. Cheminio aglomeravimo principinė schema

Cheminės aglomeracijos sistema dažniausiai sudaryta iš cheminės aglomeracijos kameros, tiekimo sistemos, šildymo sistemos, purškimo pistoleto, tirpalo laikymo bako, oro kompresorius ir pastovaus srauto siurblio. Purškimo pistoletas sudarytas iš dvigubo srauto purškimo antgalio. Antgalyje sumaišomas cheminis reagentas ir suslėgtas oras. Antgalis pagamintas iš nerūdijančio plieno. Skysčiui ir dujoms transportuoti buvo naudojami du vamzdžiai. Vienas vamzdis buvo prijungtas prie tirpalo laikymo bako, o kitas – prie oro kompresoriaus. Šildymo sistema buvo naudojama dujų srautui šildyti nuo

50 °C iki 200 °C. Cheminis reagentas purškiamas į cheminės aglomeracijos kamerą, veikiant suslėgto oro jėga (0,8 MPa). Buvo pasirinkti šie reagentai: ksantano deriva ($C_{35}H_{49}O_{29}$, XTG), kapa karageninas ($C_{24}H_{36}O_{25}S_2$, KC), poliakrilamidas ($(C_2H_5ON)_n$, PAM), konjako gliukomananas ($(C_6H_{10}O_5)_n$, KGM), nejoninė aktyvioji paviršiaus medžiaga *Triton X-100* ($C_{34}H_{62}O_{11}$, TX-100), anijoninė aktyvioji paviršiaus medžiaga natrio dodecilo sulfatas ($C_{12}H_{25}SO_4Na$, SDS) ir chloridas (natrio chloridas, SDS) (Guo et al., 2017).

Norint įvertinti aglomeracijos poveikį skirtingoms cheminėms aglomeracijos priemonėms, garavimo temperatūra buvo nustatyta 150 °C (Bin et al., 2018).

Eksperimentinio tyrimo rezultatai parodė, kad natrio alginato tirpalas yra efektyviausias. Aglomeravimo efektyvumas nuo 0,1 iki 1 μm dydžio SDKD yra 62,9 % nepridedant cheminių medžiagų, o pridedant vandenį 68,1 %, pektiną 77,6 % ir natrio alginatą efektyvumas sudaro 82,8 % (Bin et al., 2018). Taikant cheminę aglomeraciją galima efektyviai aglomeruoti KD, kurių dydis yra nuo 0,03 iki 10 μm (Sun et al., 2019).

Heterogeninė kondensacinė aglomeracija susideda iš garų kondensato ir KD, taip yra sukuriamas aglomeruotas kietųjų dalelių aerosolis (Yang et al., 2010). Atliekant heterogeninės kondensacinės aglomeracijos tyrimus buvo naudojamos išmetamosios dujos, kurių tūrinis srautas yra $70 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$, jos buvo generuojamos anglimi kūrenamu katilu. Prieš patekdamos į cikloną, išmetamosios dujos pereidavo per specialų indą, kuriame naudojant maišyklę ir elektrinį šildytuvą buvo užtikrinta pastovi dalelių koncentracija ir dydžio pasiskirstymas bei reguliuojama išmetamųjų dujų temperatūra. Ciklone nuo išmetamųjų dujų buvo atskirtos dalelės, kurių dydis buvo didesnis nei 10 μm (Yang et al., 2010).

Heterogeninis kondensavimas kaip išankstinio kondicionavimo būdas ypač tinka dujų srautams, kuriuose yra daug drėgmės. Ši technologija idealiai tinka aukštos temperatūros ir didelės drėgmės užterštam dujų srautui aglomeruoti, pavyzdžiui, sudrėkusioms dulkėms šalinti. Atlikti tyrimai parodė, kad katilė susidarantys dūmai kartu neša pelenų KD, kurių dydis nuo 2,5 iki 10 μm. Po aglomeracijos bendras išmetamųjų dujų srauto KD tūris sumažėjo 57,64 %. Taikant šią technologiją galima efektyviai aglomeruoti nuo 0,2 iki 10 μm KD (Liu et al., 2017).

Kito tyrimo metu tirtos mažesnės USKD, kurių dydis buvo 1 μm, ir buvo pasiektas 15 proc. aglomeracijos efektyvumas (Xu et al., 2020).

Taikant turbulentinę aglomeraciją, kai skirtingų dydžių KD įgyja skirtingą greitį ir trajektorijas dėl greičio gradiento turbulentiame srauto lauke, jos susiduria ir aglomeruojasi (Sun ir kt., 2020).

Turbulentinei aglomeracijai reikalingas karštas dujų srautas, tiekiamas į sistemą iš dujinio šildytuvo, kurio temperatūra gali būti pakelta iki 300 °C, esant 300 Nm³/val. srautui. Akmens anglies KD buvo tiekiamos kieto aerosolio generatoriumi (SAG 410/U). Tada išmetamosios dujos pateko į turbulentinę aglomeracijos sistemą, smulkios KD dujų sraute aglomeravosi. Turbulentinė aglomeracijos sistema susideda iš kelių vožtuvų ir trijų eilių turbulentinių aglomeratorių. Reguluojant vožtuvus galima reguliuoti išmetamųjų dujų srautą. Tyrimo metu dujų greitis buvo palaikomas 10 m/sek. Išmetamųjų dujų temperatūrą prie turbulentinės aglomeracijos sistemos įėjimo nustačius 150°, mažesnių nei 1 μm dalelių skaičiaus koncentracija sumažėjo 30,4 proc. Taip pat efektyviai galima aglomeruoti nuo 1 iki 10 μm KD.

Akustinė aglomeracija – tai procesas, kuriam vykstant akustinės bangos paveikia ore sklindančių KD judėjimą ir skatina jų susidūrimus, dėl to susidaro aglomeratai. Susiformavę nauji KD dariniai ir toliau aglomeruojasi ir sukelia dalelių pakopinį augimą (Ng et al., 2017). Akustiniame lauke dalelės yra veikiamos skirtingų ortokinetinės ir hidrodinaminės sąveikos mechanizmų (2 paveikslas), o kiti efektai, tokie kaip akustinis srautas ir turbulencija, dar labiau skatina koaguliacijos procesą. Po susidūrimo dalelės greičiausiai sulips dėl netaisyklingų struktūrų susiliejimo ir tarpmolekulinių traukos jėgų. Dėl diferencinių skysčių ir inercijos jėgų akustinio lauko virpesiuose dalelės virpa skirtingomis amplitudėmis ir fazėmis. Santykiniai judesiai sukelia skirtingo dydžio dalelių susidūrimus (2 paveikslas) (Ng et al., 2017; Sheng & Shen, 2007).

Ortokinetiniai mechanizmai veikia tarp skirtingo dydžio dalelių, esančių atstumu, kuris yra maždaug lygus akustinio lauko poslinkio amplitudei, ir jų santykinis judėjimas iš esmės yra lygiagretus vibracijos kryptčiai (Sheng & Shen, 2007).

Hidrodinaminės sąveikos mechanizmas nusako susidūrimus, vykstančius dėl klampios dalelių ir jas supančios terpės sąveikos. Susidurti gali ir dalelės, kurias skiria daug didesnis atstumas nei jų akustinio poslinkio amplitudės. Spinduliuotės slėgio sąveika atsiranda dėl netiesinės sąveikos tarp krintančių ir išsibarsčiusių bangų, kurios padalija garso impulsą aplinkinėms KD. Dėl to skirtingose dalelės pusėse susidaro slėgio gradientai ir

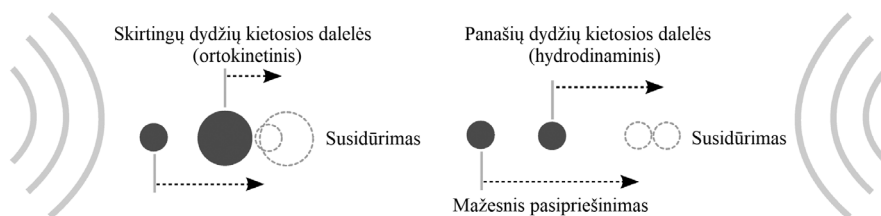
taip aplink KD susiformuoja traukos ir atstūmimo zonos (Hoffmann & Koopmann, 1997). Akustinis pažadinimo efektas lemia netiesinę išsklaidytų bangų sąveiką ir pasipriešinimo sumažėjimą, kuri patiria iš galo sklendžianti dalelė, keliaujanti link pirmaujančios dalelės. Dėl to iš paskos judanti dalelė didesniu greičiu priartėja prie pirmaujančios dalelės ir jos susidūrusios sulimpa (2 paveikslas). Šis poveikis yra reikšmingas KD aglomeracijai esant dideliame akustiniame intensyvumui ir panašaus dydžio dalelėms (Ng et al., 2017).

Pagrindinę akustinės aglomeracijos įrenginio dalį sudaro vėjo tunelis, aglomeracijos zona, filtras ir ventiliatorius tunelio gale. Vėjo tunelyje suprojektuotas reguliuojamas susitraukimas prie įėjimo, difuzoriaus išleidimo angoje, ir metro ilgio bandymo sekcija, kurios vidiniai matmenys yra 18,5 cm x 18,5 cm. Dujų srautą sukelia tunelio gale esantis ventiliatorius (FSA200/CM), kurio greitis valdomas dažnio keitikliu. Dujų srauto greitis bandymo sekcijoje matuojamas terminiu anemometru (TSI TA430), kuris taip pat gali matuoti temperatūrą. Šie matavimai stebimi prieš aglomeracijos zoną ir po jos. Dalelių skaičius prieš bandomuosius filtras ir po jų matuojamas naudojant aerosolių spektrometrą (GRIMM, 1.109). Spektrometras matuoja daleles nuo 0,25 μm iki 32 μm 31 dydžio kanalais ir yra sujungtas su kompiuteriu, kuriame veikia GRIMM spektrometras (Ng et al., 2017).

Aukšto dažnio (6,4 kHz) garso bangomis, kurių maksimalus garso slėgio lygis siekia 140 dB, galima paveikti 0,4–0,5 μm dydžio SDKD, judančias su dujų srautu akustiniame lauke, ir paversti jas 0,6–0,8 μm aglomeratais, pasiekiant iki 16 % efektyvumą. Naudojant akustinę aglomeraciją galima efektyviai aglomeruoti KD nuo 0,06 μm iki 0,8 μm (Ng et al., 2017). Didžiausias efektyvumas pasiekiamas, kai akustinio slėgio lygis yra labai siaurame dažnių diapazone nuo 150 iki 160 dB. Tačiau dar aukštesnio lygio garso bangoms reikia kur kas daugiau energijos ir jos sukelia didelę triukšmo taršą (Xu et al., 2023).

3. Aglomeravimo technologijų analizė

Atliekant elektros lauko aglomeracijos tyrimus buvo pastebėta, kad esant 30 kV maitinimo įtampai



2 paveikslas. Ortokinetiniai ir hidrodinaminiai mechanizmai (Ng et al., 2017)

aglomeracijos efektyvumas smarkiai sumažėja – nuo 64 % iki 42 %, kai srauto greitis padidėja nuo 1 m/s iki 5 m/s (Jia et al., 2024).

Dalelių krūvis, migracija ir elektrostatinė aglomeracija gali būti pagerinti padidinus elektrinio lauko intensyvumą, o dalelių susidūrimas gali būti sustiprintas padidinus dujų srauto greitį.

Dalelių aglomeracijos efektyvumas pagerėja padidėjus elektrinio lauko stiprumui (Chang et al., 2023). Taip pat aglomeracijos efektyvumas kyla, kai didėja bendra masės koncentracija ir dalelių buvimo laikas aglomeratoriuje (Hautanen et al., 2010). Stebint skirtingų dydžių kietąsias daleles buvo nustatyta, kad neturinčios krūvio kietosios dalelės lengvai paslysta per didesnes daleles; kai dalelėms yra suteikiamas skirtingo poliariškumo krūvis, jų susidūrimo tikimybė stipriai išauga (Xu et al., 2021).

Taikant elektros lauko aglomeraciją galima aglomeruoti USKD 40,2 % efektyvumu, o efektyvios aglomeracijos ribos yra nuo 0,1 iki 20 μm KD.

Vienas iš elektrostatinės aglomeracijos aparato trūkumų yra tai, kad negalima aglomeruoti didelės apimties dujų srauto. Šis nepriklausomas įrenginys turi daug apribojimų, o elektros sistemos valdymas reikalauja specialios kompetencijos (Bekkara et al., 2021; Feng et al., 2016; Gajbhiye et al., 2015; Guo et al., 2015).

Atliekant cheminės aglomeracijos tyrimą nustatyta, kad KGM ir KC reagentų mišinys turi pranašumą prieš atskirus KGM arba KC reagentus. Naudojant atskirus KGM ir KC reagentus KD šalinimo efektyvumas yra atitinkamai 34,7 % ir 47,1 %. O abiejų reagentų mišinio efektyvumas yra 59,3 % (Guo et al., 2017). Cheminė aglomeracija, naudojant natrio alginato reagentą, leido pasiekti puikius 82,8 % efektyvumo rezultatus aglomeruojant USKD, kurių dydis yra nuo 0,1 iki 1 μm (Bin et al., 2018). Taip pat efektyvi aglomeracija KD, kurių dydis yra nuo 0,03 iki 10 μm (Sun et al., 2019).

Heterogeninės kondensacinės aglomeracijos tyrimo metu pastebėta, kad po KD, kurių dydis nuo 2,5 iki 10 μm , aglomeracijos bendras išmetamųjų dujų srauto KD tūris sumažėjo 57,64 %. Taikant šią technologiją efektyviai aglomeruoti galima nuo 0,2 iki 10 μm dydžio KD (Liu et al., 2017), o USKD, kurių dydis buvo 1 μm , aglomeracijos efektyvumas buvo 15 % (Xu et al., 2020). Vienas iš pagrindinių šios technologijos pranašumų yra galimybė ją taikyti esant labai aukštai, iki 1000 °C, temperatūrai ir labai drėgnoje aplinkoje (de Best et al., 2008).

Atliekant turbulentinės aglomeracijos tyrimą, siekiant palyginti smulkiųjų dalelių aglomeracijos charakteristikas skirtinguose srauto laukuose, buvo atitinkamai išmatuota smulkių dalelių koncentracija prieš aglomeraciją ir po jos. Pradinis mažesnių nei 10 μm dalelių skaičius dujose buvo $9,03 \times 10^6$ dalelės/ cm^3 . Paveikus

dalelių srautą turbulentine aglomeracija, dalelių skaičiaus koncentracija sumažėjo iki $7,51 \times 10^6$ dalelių/ cm^3 , šis sumažėjimas sudarė 16,8 % viso šios dalelių frakcijos kiekio (Sun et al., 2020). Tyrimo metu gauti šie rezultatai: mažesnių nei 1 μm dalelių skaičiaus koncentracija sumažėjo 30,4 %, efektyvi aglomeracija vyksta tada, kai KD dydis yra nuo 1 iki 10 μm (Sun et al., 2019).

Akustinės aglomeracijos efektyvumą galima koreguoti keičiant bangų dažnį, jų intensyvumą ir dalelių buvimo laiką akustinėje kameroje, akustinio lauko poveikio dydis turi beveik tiesinį ryšį su dalelių dydžio augimu (Ng et al., 2017), o elektros lauko aglomeracijos efektyvumą galima koreguoti nustatant paduodamos įtampos dydį, paduodamos maitinimo įtampos dažnį ir reguliuojant pratekančio per įrenginį (aglomeratorių) dujų srauto greitį (Jia et al., 2024). Esant 0,4–0,5 μm dydžio SDKD galima pasiekti iki 16 % aglomeracijos efektyvumą. Didžiausias efektyvumas pasiekiamas, kai akustinio slėgio lygis yra labai siaurame dažnių diapazone nuo 150 iki 160. Tačiau dar aukštesnio lygio garso bangoms reikia kur kas daugiau energijos ir jos sukelia didelį triukšmo lygį (Xu et al., 2023).

Informacijos apie taikant šias technologijas patiriamus elektros nuostolius rasta labai mažai. Aglomeracijos technologijų analizė leidžia klasifikuoti ir selektyviai išskirti efektyviausius dalelių stambinimo metodus pirminiu užteršto dujų srauto paruošimo etapu, iki srauto valymo, bei nustatyti kiekvieno veikimo mechanizmo gebą ir apribojimus.

4. Išvados

1. Palygintas visų aglomeravimo technologijų USKD aglomeracijos efektyvumas, efektyvaus technologijų taikymo KD dydžių diapazonas.
2. Taikant elektros lauko aglomeraciją galima efektyviai aglomeruoti plačiausio diapazono KD, kurių dydis nuo 0,1 iki 20 μm , iš visų nagrinėjamų aglomeravimo technologijų, bet ši technologija turi trūkumą: negalima aglomeruoti didelės apimties dujų srauto.
3. Taikant cheminę aglomeraciją galima efektyviausiai aglomeruoti USKD, t. y. efektyvumas siekia 82,8 % naudojant natrio alginato reagentą.
4. Vienas iš pagrindinių heterogeninės kondensacinės aglomeracijos privalumų yra galimybė dirbti esant labai aukštai, iki 1000 °C, temperatūrai ir labai drėgnoje aplinkoje.
5. Taikant akustinę aglomeraciją, nustačius didesnę nei 160 dB akustinio slėgio lygį, išgauti garso bangoms reikia daug energijos; be to, jos sukelia didelį triukšmo taršą.

6. Atlikus turbulentinės aglomeracijos tyrimą gauti rezultatai parodė, kad mažesnių nei 1 μm dalelių koncentracija sumažėjo 30,4 %, efektyvi aglomeracija vyksta, kai KD dydis yra nuo 1 iki 10 μm .
7. Aptarti pagrindiniai kriterijai, turintys įtakos aglomeracijos efektyvumui.
8. Remiantis rezultatais, gautais analizuojant aglomeravimo technologijas, rekomenduojama šias išvadas pritaikyti atliekant tolesnius KD aglomeracijos tyrimus.

Literatūra

- Bekkara, F. M., Benmimoun, Y., Kheiter, A., Chelih, A., & Tilmatine, A. (2021). Electrostatic charge decay and filtration performance of nonwoven filters in the vicinity of grounded metal grids. *Journal of Electrostatics*, 110, Article 103554. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2021.103554>
- Bin, H., Yang, Y., Lei, Z., Ao, S., Cai, L., Linjun, Y., & Roszak, S. (2018). Experimental and DFT studies of PM2.5 removal by chemical agglomeration. *Fuel*, 212, 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.121>
- Brunetti, A., Macedonio, F., Cui, Z., & Drioli, E. (2020). Membrane Condenser as efficient pre-treatment unit for the abatement of particulate contained in waste gaseous streams. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), Article 104353. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104353>
- Chang, Y., Zhang, R., Shi, L., & Jia, P. (2023). Agglomeration characteristics of bipolar agglomerator with one power supply. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4459801>
- Chen, D., Wu, K., & Mi, J. (2016). Experimental investigation of aerodynamic agglomeration of fine ash particles from a 330 MW PC-fired boiler. *Fuel*, 165, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.036>
- de Best, C. J. J. M., van Kemenade, H. P., Brunner, T., & Obernberger, I. (2008). Particulate emission reduction in small-scale biomass combustion plants by a condensing heat exchanger. *Energy & Fuels*, 22(1), 587–597. <https://doi.org/10.1021/ef060435t>
- Feng, Z., Long, Z., & Mo, J. (2016). Experimental and theoretical study of a novel electrostatic enhanced air filter (EEAF) for fine particles. *Journal of Aerosol Science*, 102, 41–54. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2016.08.012>
- Fiordelisi, A., Piscitelli, P., Trimarco, B., Coscioni, E., Iaccarino, G., & Sorriento, D. (2017). The mechanisms of air pollution and particulate matter in cardiovascular diseases. *Heart Failure Reviews*, 22(3), 337–347. <https://doi.org/10.1007/s10741-017-9606-7>
- Gajbhiye, N., Eswaran, V., Saha, A. K., & Kumar, A. (2015). Numerical calculation of particle collection efficiency in an electrostatic precipitator. *Sadhana*, 40(3), 863–873. <https://doi.org/10.1007/s12046-015-0342-1>
- Guo, B., Yu, A., & Guo, J. (2015). Numerical modelling of ESP for design optimization. *Procedia Engineering*, 102, 1366–1372. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.268>
- Guo, Y., Zhang, J., Zhao, Y., Wang, S., Jiang, C., & Zheng, C. (2017). Chemical agglomeration of fine particles in coal combustion flue gas: Experimental evaluation. *Fuel*, 203, 557–569. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.05.008>
- Hautanen, J., Kilpeläinen, M., Kauppinen, E., Lehtinen, K., & Jokiniemi, J. (2010). Electrical agglomeration of aerosol particles in an alternating electric field. *Aerosol Science and Technology*, 22(2), 181–189. <https://doi.org/10.1080/02786829408959739>
- Hoffmann, T. L., & Koopmann, G. H. (1997). Visualization of acoustic particle interaction and agglomeration: Theory evaluation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 101(6), 3421–3429. <https://doi.org/10.1121/1.418352>
- Yang, L., Bao, J., Yan, J., Liu, J., Song, S., & Fan, F. (2010). Removal of fine particles in wet flue gas desulfurization system by heterogeneous condensation. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.026>
- Jaworek, A., Marchewicz, A., Sobczyk, A. T., Krupa, A., & Czech, T. (2018). Two-stage electrostatic precipitators for the reduction of PM2.5 particle emission. *Progress in Energy and Combustion Science*, 67, 206–233. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2018.03.003>
- Jia, Y., Yang, Z., Bu, S., & Xu, W. (2024). Experimental investigation on the agglomeration performance of pre-charged micro-nano particles in uniform magnetic field. *Chemical Engineering Research and Design*, 201, 523–533. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.12.009>
- Lin, W.-Y., Hsiao, T.-C., & Hong, B.-L. (2020). Improving the removal efficiency of fine particulate matters in air pollution control devices: Design and performance of an electrostatic aerosol particle agglomerator. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 107, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2019.12.003>
- Liu, Y., Hu, B., Zhou, L., Jiang, Y., & Yang, L. (2016). Improving the removal of fine particles with an electrostatic precipitator by chemical agglomeration. *Energy & Fuels*, 30(10), 8441–8447. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00626>
- Liu, J., Chen, D., & Lu, J. (2017). Experiment on fine particle purification by flue gas condensation for industrial boilers. *Fuel*, 199, 684–696. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.028>
- Ng, B. F., Xiong, J., & Wan, M.-P. (2017). Application of acoustic agglomeration to enhance air filtration efficiency in air-conditioning and mechanical ventilation (ACMV) systems. *PLoS ONE*, 12, Article e0178851. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178851>
- Sheng, C., & Shen, X. (2007). Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles. *Aerosol Science and Technology*, 41(1), 1–13. <https://doi.org/10.1080/02786820601009704>
- Sun, Z., Yang, L., Shen, A., Zhou, L., & Wu, H. (2019). Combined effect of chemical and turbulent agglomeration on improving the removal of fine particles by different coupling mode. *Powder Technology*, 344, 242–250. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.032>
- Sun, Z., Yang, L., Wu, H., & Wu, X. (2020). Agglomeration and removal characteristics of fine particles from coal combustion under different turbulent flow fields. *Journal of Environmental Sciences*, 89, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.10.004>
- Thonglek, V., & Kiatsiriroat, T. (2014). Agglomeration of sub-micron particles by a non-thermal plasma electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics*, 72(1), 33–38. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2013.11.006>

- Xu, J., Zhang, Y., Zhang, J., Liu, H., Shao, Q., & Chu, H. (2023). Progress in the heterogeneous condensation of water vapor for PM2.5 removal. *Powder Technology*, 427, Article 118701. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118701>
- Xu, J., Zhao, H., Sun, Y., Long, H., & Zheng, Z. (2020). Heterogeneous condensation for electric arc furnaces fine particles removal. *Powder Technology*, 374, 323–329. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.07.027>
- Xu, Z., Bo, X., Wu, H., Tang, Z., Chen, F., Chen, K., Wang, X., Zhang, G., & Jiang, S. (2021). Numerical simulation of contact and separation of magnetic particles under uniform magnetic field. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55(8), Article 085001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac353a>

APPLICATION AND COMPARISON OF TECHNOLOGIES BASED ON AGGLOMERATION PROCESSES

S. ZDANEVIČIUS, A. CHLEBNIKOVAS

Abstract. Ambient air quality is considered one of the indicators of a sustainable lifestyle. However, traditional cleaning technologies based on gravitational, centrifugal, electrostatic, and other operating principles are ineffective in removing ultra-fine solid particles (up to 1 μm) harmful to humans from the gas flow. These fine particle pollutants, which are harmful to both humans and the environment, can be addressed through acoustic or electric field agglomeration. During agglomeration, fine particles combine into larger, single particles that can be effectively filtered by traditional cleaning technologies. Agglomeration is used in various industries to transform dust fractions or difficult-to-process materials into a more manageable form.

The work analyzes the most harmful solid particles with sizes ranging from 200 nm to 10 μm . It also explores various ways of using agglomeration techniques to treat the primary gas stream before cleaning, thereby affecting the fine particles in the gas stream. Based on world literature, selected acoustic and electric field agglomeration technologies are discussed.

Keywords: solid particles, acoustic agglomeration, electric field agglomeration, gas flow.