

UTICAJ FAKTORA PERMEABILNOSTI PEPELA NISKOVREDNIH UGLJEVA NA ODVIJANJE PNEUMATSKOG TRANSPORTA

IMPACT OF LOW-RANK COAL FLY ASH PERMEABILITY FACTOR ON CONDITIONS OF PNEUMATIC TRANSPORT

Nikola KARLIČIĆ,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, nkarlicic@mas.bg.ac.rs,
Miroslav STANOJEVIĆ,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, mstanojevic@mas.bg.ac.rs,
Dejan RADIĆ,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, dradic@mas.bg.ac.rs,
Aleksandar JOVOVIĆ,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, ajovovic@mas.bg.ac.rs ,
Marko OBRADOVIĆ,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, mobradovic@mas.bg.ac.rs,
Dušan TODORVIĆ,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, dtodorovic@mas.bg.ac.rs.

Faktor permeabilnosti je prihvaćen kao lako merljiv indikator propustljivosti materijala prema vazduhu i dovodi se u vezu sa performansama pneumatskog transporta. U radu je prikazan način određivanja faktora permeabilnosti u cilju kategorizacije pepela, koja je značajna za definisanje uslova pneumatskog transporta radi njegovog skladištenja u silosima i moguće dalje upotrebe ili deponovanja. Permeabilnost se definiše kao svojstvo otpornosti materijala pri prostrujavanju gasa kroz njega. Na primeru pepela koji nastaje u procesu sagorevanja lignita "Kolubara" u kotlovima domaćih termoelektrana izvršeno je određivanje faktora permeabilnosti. Razmatran je uticaj dobijenih vrednost faktora permeabilnosti na performanse pneumatskog transporta.

Ključne reči: permeabilnost, elektrofiltarski pepeo, niskovredni ugalj, termoelektrana, pneumatski transport

Permeability factor is accepted as easy measurable indicator of permeability of materials to the air and is related to pneumatic conveying and its performance. The paper presents the way of determining permeability factor in order to categorize fly ash, what is important for defining the conditions of pneumatic conveying to silos and further use and deposit. Permeability is defined as a property of a material resistance to gas flow through it. Permeability factor was determined for fly ash generated in combustion of lignite „Kolubara“ in domestic power plants. The impact of obtained on pneumatic conveying performance was taken into consideration.

Key words: permeability, fly ash, low-grade coal, thermal power plant, pneumatic conveying

I. Uvod

Pepeo koji nastaje sagorevanjem niskovrednih ugljeva (lignita) u termoelektranama u Srbiji dugi niz godina se hidraulički transportovao i odlagao na deponije. U nekim domaćim termoelektranama gradnjom postrojenja za suvo izuzimanje i skladištenje pepela omogućena je njegova primena u industriji građevinskog materijala. Promenljive fizičko-hemijske karak-

teristike pepela i određena svojstva pepela pri transportovanju zahtevaju obimna prethodna istraživanja u cilju definisanja i izbora sistema pneumatskog transporta.

Veliki broj faktora utiče na pneumatski transport, ali se načelno mogu podeliti u dve grupe: faktori koji se odnose na fizičko-hemijske i faktori koji se odnose na aeracione karakteristike materijala. Karakteristike materijala koje imaju uticaj na pneumatski transport su: srednja veličina čestica, raspodela veličina čestica, oblik čestica, gustina i nasipna gustina materijala, sposobnost zadržavanje vazduha i permeabilnost.

Na osnovu testova koje su izvršili Mills [1] i Jones [2] u vezi sa uticajem svojstava materijala na definisanje pneumatskog transporta uključile su permeabilnost i sposobnost zadržavanja vazduha, pri čemu je postavljena zavisnost permeabilnosti i vibracione deaeracione konstante od minimalne srednje brzine vazduha potrebne za transport.

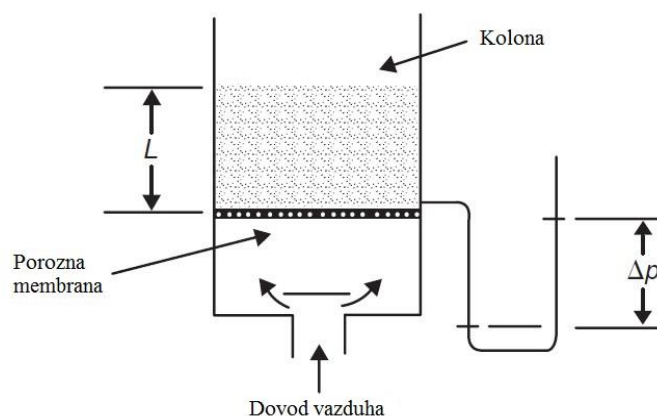
Permeabilnost se definiše kao mera lakoće sa kojom vazduh prolazi kroz sloj nasutog materijala kada je izložen razlici pritisaka [1]. Loptasti materijali uglavnom imaju dobru permeabilnost zato što je otpor pri strujanju gasa kroz međuprostor između čestica mali. Materijali sa veoma širokim opsegom veličina čestica obično imaju lošu permeabilnost. Kada bi se cev zapušila takvim materijalom, mali čep je dovoljan da drži pritisak od 5 bar nekoliko minuta. Hitt u svom radu [3] identifikuje permeabilnost materijala prema gasu kao veoma važnu karakteristiku za uspešan transport u vidu čepa. I u radovima drugih istraživača daju se razmatranja u vezi sa uticajem permeabilnosti na aeracione karakteristike pneumatskog transporta praškastih materijala.

U radu je prikazan način određivanja faktora permeabilnosti za pepeo iz procesa sagorevanja niskovrednih ugljeva (lignita), koji je urađen u laboratoriji Katedre za procesnu tehniku na Mašinskom fakultetu u Beogradu.

II. Materijali i metode

Ispitivanje je obuhvatilo 16 uzorka pepela sa različitih lokacija iz termoelektrane TENT-B, i to 5 uzoraka iz kanala dimnih gasova (KDG), 4 uzorka iz zagrejača vazduha (LUV), 2 uzorka mešavine iz elektrofiltra i zagrejača vazduha (EF+LUV) i 5 uzorka elektro-filtarskog pepela (EF).

Aparatura za merenje faktora permeabilnosti je prikazana na slikama 1 i 2, a šema instalacije je prikazana na slici 3.

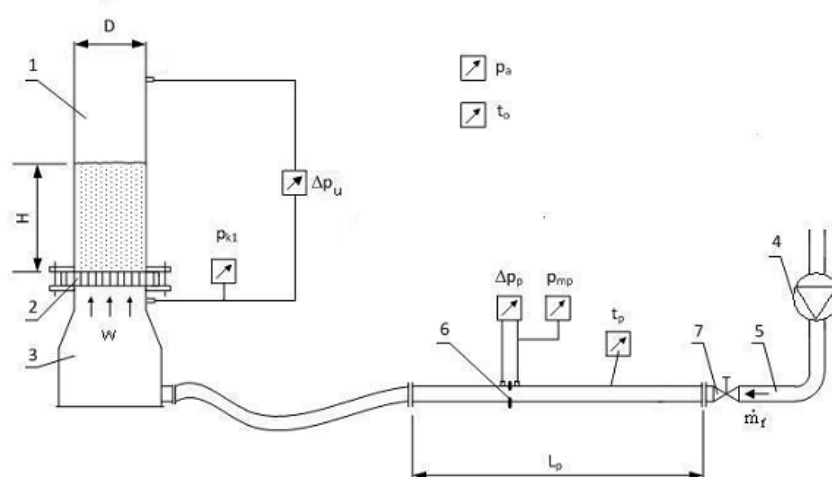


Slika 1. Skica tipičnog permeametra



Slika 2. Aparatura za ispitivanje fluidizacije i određivanje koeficijenta permeabilnosti sa nasutim uzorkom

Ona se sastoji iz providne cevi, obično od pleksiglasa ili stakla, određenog prečnika. Na dnu cevi se nalazi porozna pregrada (filc) koja drži nasuti materijal i koja propušta vazduh. Filc može biti od različitog materijala, tkanina, presovani metal, itd. Ispod porozne pregrade može biti komora sa ispunom (Rašigovi prsteni, Palovi prsteni) koja služi za bolju distribuciju vazduha. Da bi se dobili rezultati neophodni za crtanje dijagrama, potrebno je meriti pritisak pre porozne pregrade, kao i razliku pritisaka pre pregrade i posle sloja materija.



Slika 3. Šema instalacije za ispitivanja permeabilnosti

Osnovni delovi instalacije za ispitivanja permeabilnosti pepela su:

1. Kolona od pleksiglasa ($D = 142 \text{ mm}$, $H_c = 1750 \text{ mm}$) za fluidizaciju pepela,
2. Porozna pregrada,
3. Komora za umirenje struje vazduha,

4. Rotaciona klipna duvaljka,
5. Sistem cevi za dovod vazduha,
6. Prigušnica (merna blenda) za određivanje protoka vazduha za fluidizaciju,
7. Odgovarajući ventili za regulaciju protoka vazduha.

Na prikazanoj instalaciji vršeno je merenje sledećih veličina:

- p_{K1} - nadpritisak vazduha ispod porozne pregrade (pomoću U-cevi sa vodom),
- Δp_u - pad pritiska na sloju (pomoću U-cevi sa vodom),
- H - visina sloja pepela u cevi (pomoću metra),
- Δp_p - pad pritiska kroz prigušnicu (pomoću kosog manometra sa alkoholom);
- p_{mp} - nadpritisak vazduha ispred prigušnice (pomoću U-cevi sa živom ili vodom u zavisnosti od protoka vazduha),
- t_p - temperatura vazduha ispred prigušnice (pomoću termometra),
- p_a - atmosferski pritisak (pomoću barometra),
- t_o - temperatura vazduha u prostoriji (pomoću termometra).

U kolonu se nasipa sloj pepela na poroznu pregradu kroz koju se propušta vazduh. Merenje faktora permeabilnosti se vrši tako što se postepeno povećava protok vazduha u kolonu i vrši se merenje nadpritiska, pada pritiska i visine nasutog sloja materijala u koloni. Na osnovu izmerenih vrednosti formira se dijagram sa koga se računa nagib linije. Pre početka merenja faktora permeabilnosti mora se odrediti pad pritiska kroz poroznu pregradu, koji će se kasnije oduzeti od ukupnog pada pritiska koji se meri. Određivanje pada pritiska kroz poroznu pregradu se vrši identičnim postupkom kao i određivanje faktora permeabilnosti, samo što je u ovom slučaju kolona prazna, odnosno materijal još nije nasut.

Instalacija za dovod vazduha u kolonu se sastoji od sistema cevi i armature povezanih na duvaljku. Protok vazduha pod pritiskom u kolonu za fluidizaciju se reguliše pomoću ventila (7) koji je postavljen pre rotametra. Između ventila i merne blende se nalazi termometar sa živom kojim se meri temperatura vazduha u instalaciji. Za merenje protoka vazduha se koristi merna blenda (prigušnica) (6). Čelične cevi (5) i posuda za umirenje struje vazduha (3) povezane su elastičnim crevom kako bi se smanjilo prenošenje vibracija. Uvođenje vazduha pod pritiskom iz posude za umirenje struje vazduha (3) u kolonu za fluidizaciju se vrši kroz poroznu pregradu (2).

Otvaranjem/zatvaranjem ventila (5) protok komprimovanog vazduha kroz sistem raste/opada što se meri pomoću merne blende (6). Pad pritiska kroz sloj (Δp_u) se očitava na diferencijalnom manometru, dok se visina sloja (H) meri metrom. Potrebne temperature radnog i okolnog vazduha se mere termometrima sa živom. Ovim se dobijaju potrebni podaci na osnovu kojih se može odrediti permeabilnost pepela i zavisnost $\Delta p/H$ od w koja se predstavlja dijagramom, na osnovu koga se određuje prva kritična (minimalna) brzina fluidizacije.

III. Rezultati

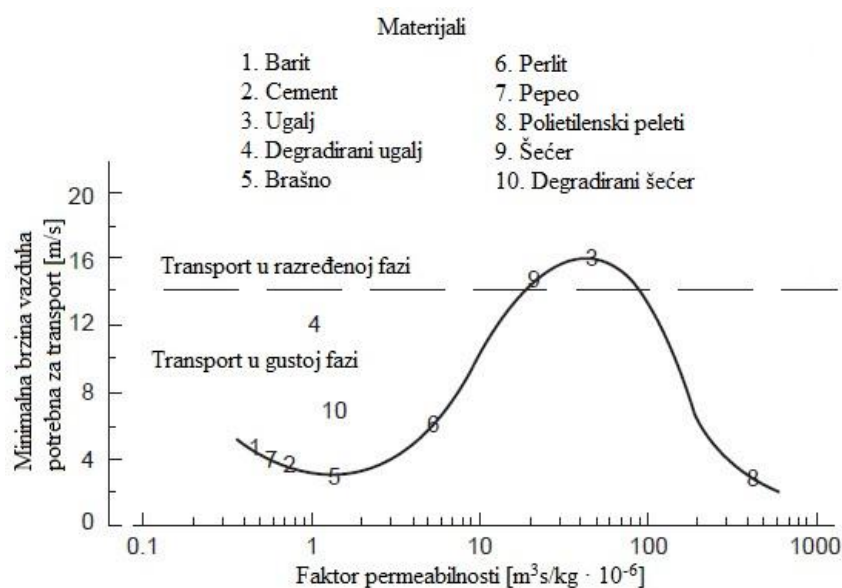
Podaci o dobijenim vrednostima permeabilnosti dati su u tabeli 1.

Tabela 1 Permeabilnost pepela

Uzorak	Permeabilnost $PE, m^2/(Pa \cdot s)$,
KDG-1	$5,09 \cdot 10^{-6} \div 2,41 \cdot 10^{-5}$
KDG-2	$3,26 \cdot 10^{-6} \div 1,76 \cdot 10^{-5}$
KDG-3	$4,21 \cdot 10^{-6} \div 1,92 \cdot 10^{-5}$
KDG-4	$3,58 \cdot 10^{-6} \div 8,22 \cdot 10^{-5}$
KDG-5	$4,77 \cdot 10^{-6} \div 3,18 \cdot 10^{-5}$
LUV-1	$4,23 \cdot 10^{-6} \div 1,76 \cdot 10^{-5}$
LUV-2	$3,52 \cdot 10^{-6} \div 1,90 \cdot 10^{-5}$
LUV-3	$4,35 \cdot 10^{-6} \div 2,06 \cdot 10^{-5}$
LUV-4	$4,67 \cdot 10^{-6} \div 1,77 \cdot 10^{-5}$
EF-1	$2,09 \cdot 10^{-6} \div 3,57 \cdot 10^{-5}$
EF-2	$3,51 \cdot 10^{-6} \div 1,64 \cdot 10^{-5}$
EF-3	$3,17 \cdot 10^{-6} \div 1,71 \cdot 10^{-5}$
EF-4	$3,12 \cdot 10^{-6} \div 1,90 \cdot 10^{-5}$
EF-5	$7,21 \cdot 10^{-6} \div 1,56 \cdot 10^{-5}$
EF+LUV-1	$3,26 \cdot 10^{-6} \div 2,27 \cdot 10^{-5}$
EF+LUV-2	$1,64 \cdot 10^{-5} \div 3,14 \cdot 10^{-5}$

IV. Diskusija

David Mills [1] i Mark G Jones [2] su pokušali da na osnovu permeabilnosti odrede pogodnost materijala za neki vid pneumatskog transporta. Na osnovu urađenih testova sa različitim materijalima izvedena je zavisnost permeabilnosti od minimalne srednje brzine vazduha potrebne za transport (slika 4).



Slika 4.. Uticaj permeabilnosti na vrstu transporta

Protok fluida kroz sloj nasutog materijala je dosta proučavan. Verovatno najpoznatiji rad na tu temu je napisao *Ergun* [4], koji je predložio jednačinu:

$$\frac{\Delta p_s g}{H} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu w}{d^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho w^2}{d} \quad (1)$$

gde su:

d , efektivni prečnik čestice,
 g , gravitaciono ubrzanje,
 H , visina sloja nasutog materijala,
 w , srednja brzina vazduha ,
 Δp_s , pad pritiska kroz sloj materijala,
 ε , poroznost materijala,
 μ , dinamička viskoznost fluida,
 ρ , gustina fluida.

Srednja brzina vazduha se računa kao količnik zapreminskog protoka vazduha kroz kolonu i površine poprečnog preseka kolone, pri čemu se smatra da je kolona prazna.

Poteškoću pri korišćenju *Ergun-ove* jednačine predstavlja određivanje efektivnog prečnika čestice, koji nije isti kao srednji ekvivalnetni prečnik.

Ergun-ova jednačina se sastoji iz dva dela: prvi član uzima u obzir gubitak energije usled viskoznosti, a drugi član uzima u obzir inercione gubitke. Prvi član je dominantna komponenta pri laminarnom strujanju fluida, a drugi pri turbulentnom strujanju. Testovi su pokazali da je pri malim brzinama gasa veza između $\Delta p/H$ i w linearna. Za laminarni tok, ta veza se može prikazati na sledeći način:

$$w = \frac{PE \cdot \Delta p_s}{H}, \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad (2)$$

gde je:

PE , faktor permeabilnosti koji zavisi od karakteristika materijala i fluida.

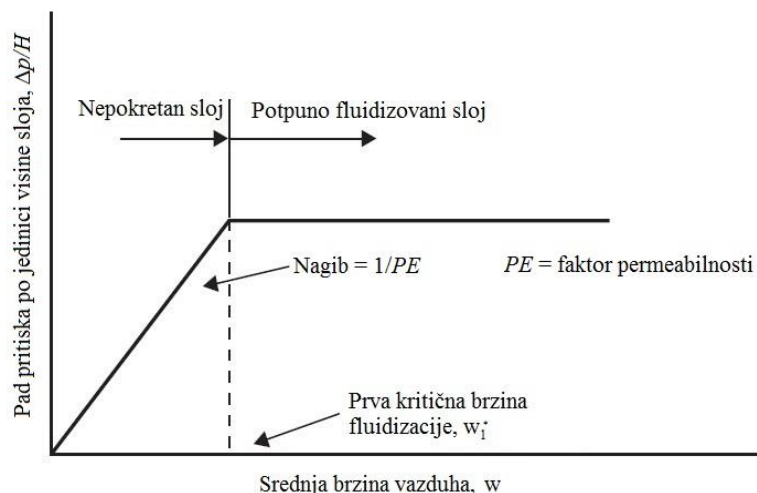
Na slici 5 je prikazan dijagram koji daje idealizovanu vezu između pada pritiska po jedinici visine sloja materijala i brzine vazduha u koloni, za laminarni tok. Vidi se da je deo dijagrama, koji je vezan za nepokretni sloj, prava linija. Prema britanskoj asocijaciji za rukovanje materijalima [6], inverzna vrednost nagiba te linije predstavlja faktor permeabilnosti i koristan je parametar koji karakteriše propustljivost materijala prema fluidu.

Permeabilnost pepela određena je za uslove strujanja vazduha kroz sloj pepela pre dostizanja prve kritične brzine fluidizacije, prema izrazu:

$$PE = \frac{w}{\frac{\Delta p_s}{H_0}}$$

gde su:

PE , $\text{m}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})$, permeabilnost pepela,
 w , m/s , brzina vazduha svedena na poprečni presek kolone,
 $\frac{\Delta p_s}{H_0}$, Pa/m , jedinični pad pritiska u području fluidizacije pri



Slika 5. Idealizovana veza gradijenta pritiska i brzine vazduha, za proticanje kroz sloj materijala

V. Zaključak

Faktor permeabilnosti je prihvaćen kao lako merljiv indikator propustljivosti materijala prema vazduhu i dovodi se u vezu sa performansama pneumatskog transporta. Rezultati koji se dobijaju pri merenju faktora permeabilnosti su veoma pouzdani u pogledu ponovljivosti i proizvode dobre linearne veze.

Potpunije utvrđivanje uticaja karakteristika praškastih materijala daće mogućnost za otklanjanje problema u pneumatskom transportu koji su prisutni kod postojećih rešenja u eksploataciji. Do tada, najbolja sredstva za definisanje vrste pneumatskog transporta predstavljaju karakteristike materijala vezane za interakciju gas-čestica, na prvom mestu permeabilnost i zadržavanje vazduha.

Pepeo iz TENT-B je promenljiv i po krupnoći i po fizičko-hemijskom sastavu što dovodi do određenih pojava pri fluidizaciji i veoma je značajno za analizu rezultata permeabilnosti i definisanje uslova pneumatskog transporta.

Vrednost permeabilnosti je bitan parametar kod izbora vrste pneumatskog transporta određenog praškastog materijala. Postoje preporuke da se za materijale koji imaju $PE = 10^{-5} \div 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})$ primenjuje pneumatski transport u razređenoj fazi (transport niske koncentracije čvrste faze do 15 kg čvrste faze/ kg gasa), koji se odvija pri velikim brzinama vazduha ($> 12 \text{ m/s}$) uz značajan utrošak energije za transport. Za vrednosti permeabilnosti manje od 10^{-5} , preporučuje se nesuspendovani pneumatski transport (sa koncentracijama čvrste faze većim od 20 kg/kg, i brzinama većim od 3 m/s).

VI. Literatura

- [1] David Mills: Pneumatic conveying Design guide, 2nd Ed (2004)
- [2] Jones, Mark G. The influence of bulk particulate properties on pneumatic conveying performance. PhD thesis, Thames Polytechnic. (1988)
- [3] Hitt R. J.: An investigation into the Low Velocity Pneumatic Conveying of Bulk Solids. Phd Thesis, Thames Polytechnic, London UK (1984)
- [4] Eugen S.: Fluid Flow Throught Packed Columns. Chem Eng Prog, 49, No. 2, Februarz, pp 88 -94 (1952)
- [5] Klinzing G.E., Rizk F., Marcus R., Leung L.S.: Pneumatic conveying of solids: A theoretical and practical approach, 3rd Ed (2010)
BS 2955. Glossary of terms relating to powders. (1958)