

Professional Paper – Stručni rad

ANALIZA I IZBOR PNEUMATSKOG TRANSPORTA U OKVIRU LINIJE ZA PROIZVODNJU KREČA U PRAHU

Mirko Dobrnjac¹, Slobodan Rakulj²

¹Univerzitet u Banjaluci, Mašinski fakultet, Bulevar vojvode Stepe Stepanovića 71, Banja Luka, Bosna i Hercegovina, mirko.dobrnjac@mf.unibl.org

²Institut za građevinarstvo "IG" d.o.o. Kralja Petra I Karađorđevića 92-94, Banja Luka, Bosna i Hercegovina

APSTRAKT

U ovom radu je razmatran izbor tehnički najpovoljnijeg načina transporta kreča u prahu u okviru postojećeg postrojenja u fabrici kreča. Sa linije proizvodnje, krečni prah je potrebno transportovati do silosa za skladištenje u okviru fabrike. Od više analiziranih tehnički mogućih varijanti, izabran je leteći pneumatski transport kao najpovoljnija varijanta u okviru postojećeg tehnološkog procesa proizvodnje kreča u prahu. Na osnovu zadatog kapaciteta transporta urađen je proračun pada pritiska u transportnom cjevovodu, a zatim, odabir instalacije i opreme. Izvršena je tehničko tehnološka analiza transportnog sistema.

Cljučne riječi: Pneumatski transport, kreč u prahu, dvofazno strujanje, transportni cjevovod, pad pritiska

UVOD

Uspješno rješavanje transporta sirovina i proizvoda, otpada i ostalih produkata proizvodnog ciklusa, direktno su u funkciji efikasne proizvodnje, a u konačnici i cijene proizvoda. Različiti vidovi transporta često se kombinuju u istom proizvodnom prostoru, u zavisnosti od same tehnološke linije, tipa produkta proizvodnje, vrste otpada, raspoloživog prostora i dr. U poređenju sa drugim vidovima transporta, kao što su saobraćajni transport, transport mehaničkim transporterima (trakasti, kofičasti i dr.), pneumatski transport ima određene prednosti, zbog čega je često korišten.

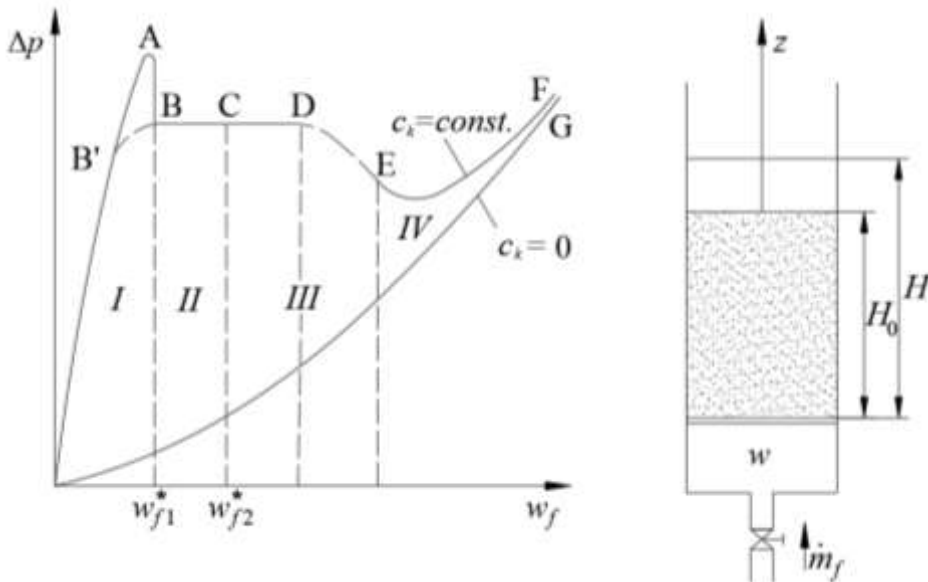
Osnovna podjela pneumatskog transporta može se izvršiti prema prirodi kretanja materijala za vrijeme transporta na: *pneumatski transport na bazi fluidizacije* i *leteći pneumatski transport*. Prvi se ostvaruje na taj način što se propuštanjem vazduha određenog pritiska u sipkavi material, od materijala stvori "fluidizovana masa" koja postaje tečna poput fluida i zatim, malim nagibom strujnog toka (pneumatsko korito) ili razlikom pritisaka između protočnih presjeka vertikalnog cjevovoda (fluid lift), ostvaruje njeno neprekidno kretanje. Kod letećeg pneumatskog transporta razrijeđene čestice materijala "lete" sa vazdušnom strujom obrazujući "oblake" mješavine u strujnom prostoru. S obzirom na veličinu pritiska, leteći pneumatski transport se dijeli na transport niskog pritiska (do 0,1 bar), srednjeg pritiska (do 3 bar) i visokog pritiska (preko 3 bar).

U odnosu na koncentraciju materijala u struji vazduha, leteći pneumatski transport se dijeli na transport niske ($c_k < 1$), srednje ($1 < c_k < 10$) i visoke ($10 < c_k < 80$) koncentracije. Pneumatski transport na bazi fluidizacije spada u kategoriju transporta visoke koncentracije, čija vrijednost ide i do $c_k = 600$. Po načinu i mjestu stvaranja pritisaka u cjevovodu, pneumatski transportni sistemi se dijele u tri osnovne kategorije: sistem potisnog transporta, sistem usisnog transporta i kombinovani sistem (Mills, 2004). Sistem potisnog transporta karakteriše pogonska duvaljka, kompresor ili ventilator, koji je namješten ispred ulaza materijala u transportni cjevovod. Sistem usisnog transporta karakteriše duvaljka, kompresor ili ventilator koji je namješten na suprotnoj strani sistema, tj. na izlazu materijala i isisava vazduh koji prolazi kroz cijeli sistem. Kombinovani sistem ili tzv. "pullpush" – sistem karakteriše duvaljka, kompresor ili ventilator koji je postavljen između ulaza i izlaza materijala (Perić, 1978). Pneumatski transport na osnovu fluidizacije spada u grupu potisnog

transporta. Usisni pneumatski transport svakako pripada kategoriji niskog pritiska, jer je vakuum uvijek ispod jednog bara.

Opšta karakteristika letećeg pneumatskog transporta je da se on ostvaruje pri velikim brzinama vazduha koje, na primjer, za neke zrnaste materijale dostižu i do 40 m/s na kraju cjevovoda. Takođe je i relativna brzina vazduha u odnosu na čestice materijala velika. Relativna brzina vazduha je veća što su čestice krupnije i što više odstupaju od kuglica po obliku. Područje letećeg pneumatskog transporta obilježeno je sa IV na slici 1. Prilikom proračuna letećeg pneumatskog transporta ne smije se zanemariti pad pritiska Δp_f , koji odgovara strujanju čistog fluida istim protokom, u odnosu na dopunski pad pritiska Δp_s , zbog prisustva čestica u struji vazduha. Čak je kod letećeg pneumatskog transporta Δp_f nekoliko puta veći od Δp_s , jer se u strujnom prostoru nalazi relativno mali broj čestica (Šašić, 1990). Da bi se ostvarilo kretanje smjese vazduha i čestica materijala potrebno je da se kroz cjevovod, obezbijedi strujanje vazduha određenih parametara, pri čemu se to može ostvariti ako u cjevovodu vlada podpritisak (vakuum), nadpritisak, ili kombinacija ovih stanja po dionicama.

U poređenju sa drugim vidovima transporta, leteći pneumatski transport ima određenih prednosti. Naime, ovdje postoji mogućnost ugradnje sistema u malim prostorima, jer se materijal prenosi cijevima relativno malog prečnika, koje se mogu postavljati u horizontalnom, kosom i vertikalnom pravcu, pa se to uglavnom čini po zidovima, tavanicama, u uglovima. Samim tim smanjuje se ukupni potrebni radni prostor i ulaganja u opremu i građevinske objekte (Duisenova i sar., 2019).



Slika 1. Fazni dijagram
Figure 1 Phase diagram

Obezbiđena je hermetičnost cijevnih vodova, a time i nezatno stvaranje prašine u radnom prostoru, kao i mali gubici materijala. Postoji mogućnost izrade sistema velikih kapaciteta, kapacitet uređaja pneumatskog transporta može da dostigne i 300 t/h, kao i mogućnost transportovanja materijala na daljinu, dužina transportovanja ide do 2000 m. Transportna linija se lako može prilagoditi liniji tehnološkog procesa, pa se materijal može uzimati sa više mjesta, kao i odlagati ili skladištiti na više lokacija. Takođe je moguće postaviti i dodatnu transportnu liniju, npr. za preuzimanje otpada ili dotur sirovine i sl. Uz sve to moguće je ostvarenje visokog stepena automatskog upravljanja procesom.

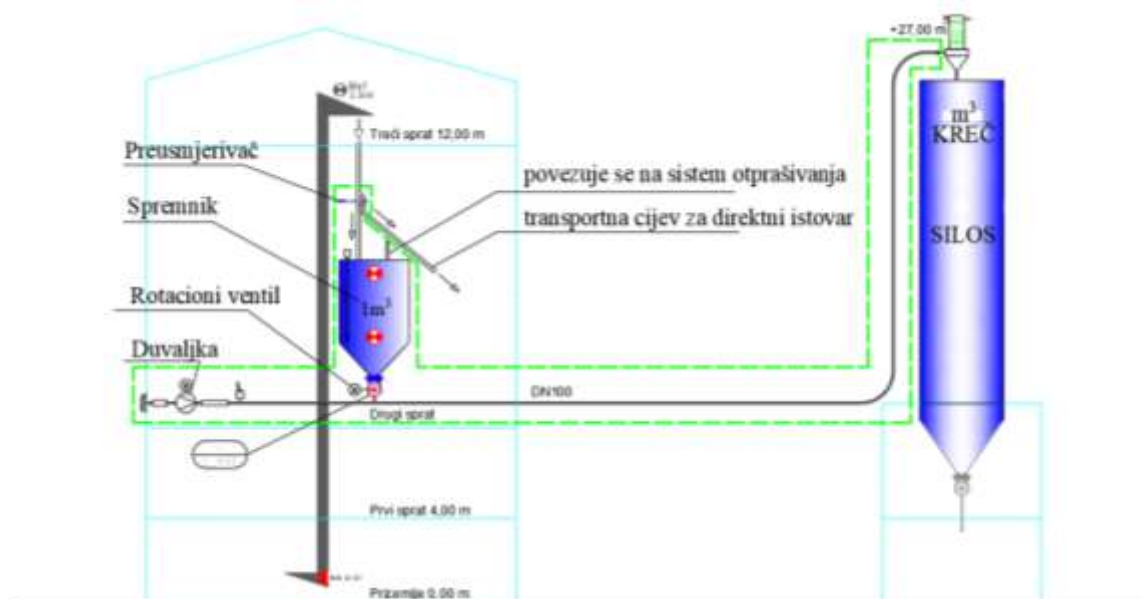
Leteći pneumatski transport svakako ima i određene nedostatke, a možda je najozbiljniji među njima, velika potrošnja električne energije za transportovanje materijala, koja je u nekim slučajevima i do 10 puta veća od potrošnje kod mehaničkog transporta. Zbog dodatnog trenja koje izazivaju

čestice, javlja se pojačano habanje pojedinih dijelova uređaja, kao što su koljena cijevnih vodova, ventili, račve, cikloni i dr., što opet zavisi od vrste transportovanog materijala. Postoji stalna neophodnost efikasnog čišćenja vazduha od mikro prašine koja veoma štetno utiče na zdravlje, a u određenim okolnostima je eksplozivna.

Za sistem koji je predmet ovog rada odabran sistem pozitivnog pritiska. Tehnički gledano, sistem transporta je tako koncipiran da postoji jedno mjesto uzimanja materijala i jedno mjesto do kojeg se materijal transportuje. Odlučujući faktor za izbor ovog transporta je raspoloživi prostor, odnosno pogodno mjesto ugradnje duvaljke, a inače, mogao je biti izabran bilo koji od ova tri načina transporta. Za ovu instalaciju izabran je, dakle, potisni leteći pneumatski transport kreča u prahu.

PRORAČUN PARAMETARA LETEĆEG PNEUMATSKOG TRANSPORTA

Razmatran je izbor tehnički najpovoljnijeg načina transporta kreča u prahu u okviru postojećeg postrojenja u fabrici kreča. U tu svrhu je odrađen proračun sistema letećeg pneumatskog transporta kreča u prahu iz proizvodne hale do silosa.



Slika 2. Šematski prikaz pneumatskog transporta kreča
Figure 2 Schematic illustration of pneumatic lime transport

Ulazni podaci

Dužina cjevovoda:

- horizontalna dionica $l = 20$ m,
- vertikalna dionica $l = 12$ m,
- 3 koljena, što je ekvivalentno dužini $l = 30$ m.

Ukupni pad pritiska prema ovoj metodi se sastoji od pada pritiska usljed strujanja čistog fluida i dopunskog pada pritiska koji nastaje zbog materijala koji se transportuje pneumatski.

Prema karakteristikama materije, u ovom slučaju kreča u prahu, usvajaju se brzina u cjevovodu i kritična brzina taloženja.

Brzina u cjevovodu, usvojena:

$$v = 18 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Kritična brzina taloženja:

$$v_s = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Pad pritiska u horizontalnom dijelu cjevovoda

Za određivanje pada pritiska u cjevovodu moraju se poznavati sljedeće veličine:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot d}}, \quad (1)$$

gdje je

Fr - Frudov (Froude) broj,

$d = 107,1$ mm - unutrašnji prečnik cjevovoda,

$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ - gravitaciona konstanta.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot d}} = \frac{18}{\sqrt{9,81 \cdot 0,107}} = 17,568.$$

Zatim se određuje drugi Frudov broj:

$$Fr^* = \frac{v_s}{\sqrt{g \cdot d}} = \frac{0,5}{\sqrt{9,81 \cdot 0,107}} = 0,488.$$

U cilju izračunavanja dopunskog koeficijenta trenja uvode se veličine B i E.

$$B = \frac{\lambda_s^*}{2} \cdot Fr^{*2},$$

gdje je:

λ_s^* - specifični koeficijent trenja.

Na osnovu raspoloživih podataka za geometrijske karakteristike čestica kreča, u ovom proračunu, usvojen je koeficijent trenja materijala λ_s^* .

$$\lambda_s^* = 0,006,$$

$$B = \frac{0,006}{2} \cdot 0,488^2 = 0,000714,$$

$$E = \beta \left(\frac{Fr^*}{Fr} \right)^2$$

$$\beta = \sin \alpha + \frac{v_s}{v} \cos \alpha$$

gdje je:

β - Bartov (Barth) broj,

α - ugao nagiba cjevovoda.

Uvrštavanjem u gornju jednačinu slijedi:

$$\beta = 0,027 \rightarrow E = 0,000021,$$

pa je odnos srednjih brzina "oblaka" čestica materijala i vazduha koji ih nosi:

$$\frac{c}{v} = \frac{1 - \sqrt{B(1-E) + E}}{1-B} = \frac{0,972889}{0,999332} = 0,97354.$$

Dopunski koeficijent trenja se računa kao:

$$\lambda_s = \frac{c}{v} \cdot \lambda_s^* + \frac{2\beta}{Fr^2 \cdot \frac{c}{v}},$$

$$\lambda_s = 0,97354 \cdot 0,006 + \frac{0,054}{300,47},$$

$$\lambda_s = 0,00602.$$

Usvojena koncentracija pri kojoj se vrši pneumatski transport je $c_k = 15$, pa je dopunski pad pritiska:

$$\Delta p_s = \lambda_s \cdot c_k \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho_f \cdot v^2}{2},$$

$$\Delta p_s = 0,00602 \cdot 15 \cdot \frac{50}{0,107} \cdot \frac{1,19 \cdot 18^2}{2},$$

$$\Delta p_s = 8135 \text{ Pa.}$$

Pad pritiska usljed strujanja čistog fluida

$$\Delta p_f = \lambda_f \frac{l}{D} \frac{\rho_f \cdot v_f^2}{2},$$

gdje je λ_f - koeficijent trenja pri strujanju čistog fluida kroz cijev.

$$\Delta p_f = 0,0145 \cdot \frac{50}{0,107} \cdot \frac{1,19 \cdot 18^2}{2} = 1306 \text{ Pa.}$$

Ukupni pad pritiska predstavlja zbir pada pritiska usljed strujanja čistog fluida i dopunskog pada pritiska:

$$\Delta p = \Delta p_s + \Delta p_f = 8135 + 1306 = 9441 \text{ Pa.}$$

Pad pritiska u vertikalnom dijelu cjevovoda

Prema prethodnom postupku za ugao nagiba cjevovoda od 90° se dobijaju sljedeće vrijednosti:

$$\beta_v = \sin 90^\circ + \frac{v_s}{v} \cos 90^\circ = 1,$$

$$E_v = \beta_v \left(\frac{Fr^*}{Fr} \right)^2 = 1 \cdot \left(\frac{0,488}{17,568} \right)^2 = 0,00158,$$

$$\left(\frac{c}{v} \right)_v = \frac{1 - \sqrt{B(1 - E_v) + E_v}}{1 - B} = \frac{1 - \sqrt{0,000714 \cdot (1 - 0,00158) + 0,00158}}{1 - 0,000714},$$

$$\left(\frac{c}{v} \right)_v = \frac{0,952116}{0,999286} = 0,952.$$

Za vertikalni dio cjevovoda odnos srednjih brzina "oblaka" čestica materijala i vazduha koji ih nosi nešto je manji, pa se koeficijent trenja izračunava kao:

$$\lambda_{sv} = \left(\frac{c}{v} \right)_v \cdot \lambda_s^* + \frac{2\beta_v}{Fr^2 \cdot \left(\frac{c}{v} \right)_v},$$

$$\lambda_{sv} = 0,952 \cdot 0,006 + \frac{2}{293,82} = 0,0125.$$

Dopunski pad pritiska za vertikalni dio cjevovoda biće:

$$\Delta p_{sv} = \lambda_{sv} \cdot c_k \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho_f \cdot v^2}{2},$$

$$\Delta p_{sv} = 0,0125 \cdot 15 \cdot \frac{12}{0,107} \cdot \frac{1,19 \cdot 18^2}{2},$$

$$\Delta p_{sv} = 4054 \text{ Pa},$$

dok je pad pritiska usljed strujanja čistog fluida na vertikalnom dijelu cjevovoda:

$$\Delta p_{fv} = \lambda_f \frac{l}{D} \frac{\rho_f \cdot v_f^2}{2} = 4,3 \text{ Pa},$$

$$\Delta p_{fv} = 0,0145 \cdot \frac{12}{0,107} \cdot \frac{1,19 \cdot 18^2}{2} = 313 \text{ Pa}.$$

Zbirni pad pritiska na vertikalnom dijelu cjevovoda je:

$$\Delta p_v = \Delta p_s + \Delta p_f = 4054 + 313 = 4367 \text{ Pa}$$

Ukupni pad pritiska u cjevovodu

$$\Delta p_u = \Delta p + \Delta p_v = 9441 + 4367 = 13808 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_u = 0,14 \text{ bar}$$

Vazdušni protok duvaljke iznosi $q_0 = 15,7 \text{ m}_n^3/\text{min}$, iz čega se računa maseni protok G_f .

$$G_f = \rho_0 \cdot q_0 = \frac{1,19 \cdot 15,7}{60} = 0,311 \frac{\text{kg}}{\text{s}},$$

pa se kapacitet transporta izračunava množenjem koncentracije c_k sa masenim protokom:

$$G_s = c_k \cdot G_f = 15 \cdot 0,311 = 4,665 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 16,794 \frac{\text{t}}{\text{h}}.$$

Na osnovu izračunatih parametara izvršen je izbor duvaljke i ostale opreme koja se ugrađuje u projektovani cjevovod.

Zahtijevana snaga duvaljke

Snaga duvaljke se računa kao:

$$P = \frac{q_0 \cdot \Delta p}{60 \cdot 1000 \cdot \eta_{bl} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{bear}} \text{ kW},$$

gdje je

q_0 - vazdušni protok duvaljke $\frac{\text{m}_n^3}{\text{min}}$,

Δp - ukupni pad pritiska Pa,

η_{bl} - stepen korisnosti duvaljke,

η_{tr} - efikasnost transmisije,

η_{bear} - efikasnost ležaja.

$$P = \frac{15,7 \cdot 13808}{60 \cdot 1000 \cdot 0,65 \cdot 0,98 \cdot 0,99} = 5,73 \text{ kW}.$$

ZAKLJUČCI

U ovom radu izvršen je odabir načina transporta kreča u prahu, u okviru fabrike kreča, sa proizvodne linije do skladišnog silosa. Zatim je urađen proračun za odabrani sistem, odnosno, liniju pneumatskog transporta kreča u prahu. Proračun pada pritiska urađen je po metodi Šašića, kao pouzdanij i provjerenoj metodi. Pri provođenju proračuna korišteni su dostupni podaci za karakteristike kreča u prahu kao transportovanog materijala.

Dobijen je pad pritiska od 0,14 bara, koji je osnova za izbor strujne mašine i ostalih komponenti koje ulaze u transportni sistem. Na osnovu dobivenih parametara izvršen je odabir opreme i izvršena montaža linije.

Kako se za proračun i dimenzionisanje pneumatskog transporta koriste empirijski obrasci, ne može se sa sigurnošću reći koliko je proračun pouzdan za slučaj datog postrojenja. Kao potvrdu

rezultata proračuna na ključnim tačkama linije postavljeni su mjerači pritiska i protoka, pomoću kojih se mogu mjeriti stvarni parametri procesa i odrediti optimalni režim rada postrojenja. Takođe je moguće napraviti matematički model, odnosno numeričku simulaciju procesa transporta kreča u prahu ovom pneumatskom linijom, a koja bi mogla biti provjerena i potvrđena eksperimentalnim rezultatima za ovu specifičnu supstancu.

LITERATURA

- Perić N. (1978) *Pneumatski transport, uskladištenje, homogenizacija, otprašivanje*, Kočevje.
Šašić M. (1990) *Transport fluida i čvrstih materija cijevima*, Beograd: Naučna knjiga.
Mills D. (2004) *Pneumatic conveying design guide*, Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
Duisenova S., Atykhanov A. and Karaivanov D. (2019) Justification of the parameters of a pneumatic conveyor for active ventilation of soybean during storage, *MATEC Web of Conferences* 28.

ANALYSIS AND SELECTION OF PNEUMATIC TRANSPORT WITHIN THE POWDER LIME PRODUCTION LINE

Mirko Dobrnjac¹, Slobodan Rakulj²

¹*Univeristy of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering, Stepe Stepanovića 74, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, mirko.dobrnjac@mf.unibl.org*

²*Civil Engineering Institute "IG" LLC, Kralja Petra I Karadorševića 92-94, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina*

ABSTRACT

This paper discusses the selection of the most technically suitable method of transporting lime powder within the existing plant at the lime factory. From the production line, lime powder must be transported to the factory silo. Of the more technically feasible variants analysed, flying pneumatic transport was chosen as the most favourable variant within the existing technological process of lime powder production. Based on the given transport capacity, a calculation of the pressure drop in the transport pipeline was made, and then the selection of installation and equipment. Technical and technological analysis of the transport system was performed.

Keywords: Pneumatic transport, lime powder, two-phase flow, transport pipeline, pressure drop