



Fontanski sloj, teorija i primjena Spouted bed, theory and applications

Branko Tripalo*, Damir Ježek, Mladen Brnčić, Tomislav Bosiljkov, Sven Karlović

¹Prehrambeno-biotehnološki fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Pierottijeva 6, Zagreb, Hrvatska

Sažetak

U suvremenoj industriji se sve više koriste procesi i uređaji u kojima se koriste dvofazni sustavi. Primjena ovih sustava i uređaja daje široke mogućnosti unapređenja i primjene u praksi. U ovom radu prikazani su značajniji rezultati istraživanja vezanih za specifični oblik fluidiziranog sloja fontanski sloj. Na osnovu dostupnih literaturnih podataka dat je pregled osnovnih definicija i podataka za najčešće upotrebljavane jednačbe za proračun maksimalne visine fontanskog sloja, minimalne i maksimalne površinske brzine fontaniranja, srednjeg promjera mlaza u fontanskom sloju, pada tlaka i optimalnog kuta otvora konusa.

Ključne riječi: Fontanski sloj, fluidizacija

Abstract

Modern industry more and more is useful processes and equipment in which are useful two-phase system. Practical this system and equipment contribute extended feasibility advancing and apply to practice. In this paper are shown characteristically research result in this connection with fluidization bed spouted bed. On based accessibility literature data gives review founded definition and data for most often used equations for calculated maximum spoutable bed height, minimum and maximum superficial velocity for spouting, spout diameter, pressure drop and optimal angle included by column base cone.

Key words: Spouted bed, fluidization

Uvod

U suvremenoj prehrambenoj i fermentativnoj industriji sve su zastupljeniji procesi i uređaji u kojima se primjenjuju dvofazni sustavi fluid-kruta čestica. Primjena ovih procesa i uređaja sa sustavima fluid-kruta čestica u struji plina ili kapljavine, otkriva široke mogućnosti unapređivanja i primjene u prehrambenoj tehnologiji i biotehnologiji.

Pod toplinskom obradom disperznih materijala podrazumjevaju se procesi zagrijavanja kao pečenje, prženje, hlađenje zatim zamrzavanje, vlaženje plinova, granuliranje, sušenje i sl. Ovi procesi su često praćeni kemijskim promjenama u biološkom materijalu. Kod većine ovih uređaja veliki nedostatak je što se prijenos topline i mase odvijaju na vrlo malom dijelu površine disperznog materijala odnosno na vanjskoj površini krutih čestica odnosno na površini između čestica sloja i struje fluida. U fluidiziranom sloju ili struji raspršene suspenzije krutih čestica, ovaj nedostatak se umanjuje pored niza drugih prednosti koje ti postupci donose. Značajno korištenje fluidiziranog sloja u tehnici objašnjava se visokim intenzitetom procesa, pogodnošću uvođenja i izvođenja materijala iz uređaja, jednostavnom izvedbom, niskim investicijskim troškovima i sa mogućnosti potpune automatizacije i regulacije procesa.

Fluidizirani sloj daje veliku površinu za prijenos topline i mase po jedinici volumena i omogućuje jednoliku raspodjelu temperature i koncentracije u masi čestica intenzivnim miješanjem. Postoje i nedostaci, a to su nejednako vrijeme zadržavanja pojedinih čestica u uređaju, što dovodi do neravnomjernog grijanja ili sušenja, a pri kemijskim reakcijama ne dolazi do potpunog završetka reakcija (Kostić, 1972; Mujumdar, 2007).

Specifični oblik fluidiziranog sloja je fontanski sloj. Fontaniranje u odnosu na klasičnu fluidizaciju je specifičan aktivni

proces prijenosa količine gibanja koji se ostvaruje nespecifičnim kontaktom plina s raspršenim materijalom i često se primjenjuje pri toplinskoj obradi materijala koji se po svojim fizičkim svojstvima loše fluidiziraju u klasičnom fluidiziranom sloju (Kostić, 1972; Mujumdar, 2007).

Postupak sa fontanskim slojem se koristi kada su čestice krute tvari suviše grube za korištenje klasičnog fluidiziranog sloja. To su čestice koje po D.Geldartovoj sistematizaciji veličina čestica spadaju u grupu D ili čestice čiji je srednji promjer veći od 1 ili 2 mm (Geldart, 1986; Smith, 2007).

Pri istraživanju sušenja žitarica u fluidiziranom sloju Mathur i Gishler iz Kanadskog nacionalnog istraživačkog centra u Ottawi 1950 godine su zapazili neuobičajeno ponašanje sloja nasipine zrna pšenice. U članku objavljenom u A.I.Ch.E. Journal 1955 godine opisuju svoje pokuse i definiraju ponašanje fontanskog sloja. Pokusi su provedeni sa nasipinama zrna pšenice, graška, zobi, suncokretovog sjemena, sjemena uljane repice, gorušicinog sjemena, zrna kave i sl. (Mele i Martinez, 1984; Mathur i Gishler, 1955; Mujumdar, 2007).

U ovom radu dat je pregled osnovnih definicija i podataka, te osnova proračuna kolone sa fontanskim slojem, a koji se mogu koristiti pri projektiranju, konstrukciji i vođenju uređaja sa fontanski slojem.

Definicija fontanskog sloja

Pod pojmom fontanski sloj podrazumijeva se sloj koji čine krute čestice i fluid u gibanju. Krute čestice se gibaju pneumatiskim transportom odnosno u mlazu kroz središnji osni dio kolone, da bi postigavši određenu visinu napustile mlaz padajući u „prstenasti prostor“ uz stijenku kolone (slika 1, slika 4b i 4c). U „prstenastom prostoru“ cilindričnog i koničnog dijela kolone

Corresponding author: btripalo@pbf.hr



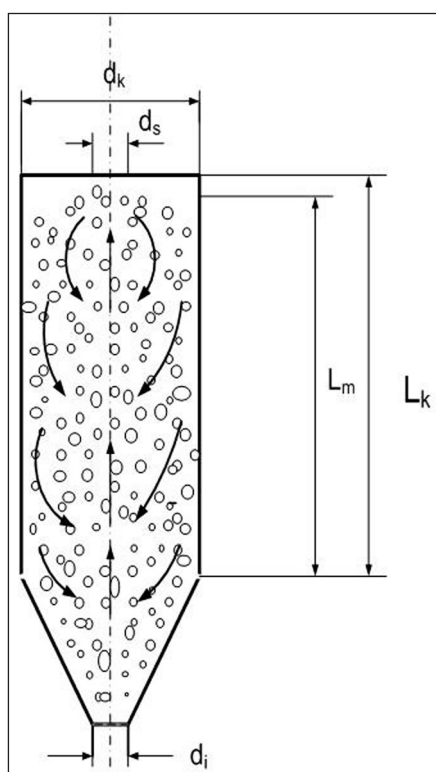
(obrnuti konus) je najveća koncentracija krutih čestica koje klize prema dnu kolone. Očito je da je gibanje krutih čestica i fluida u fontanskom sloju daleko složenije od onog u fluidiziranom sloju (Kostić, 1972; Mujumdar, 2007). Pod konvencionalnim fontanskim slojem se podrazumijeva onaj koji nastaje u cilindričnoj koloni sa dnom u obliku obrnutog konusa.

Osnovne jednadžbe za proračun uređaja sa fontanskim slojem

U prvoj fazi proračuna je potrebno definirati visinu fontanskog sloja, minimalnu brzinu fluida u fontanskom sloju i srednji promjer područja u kojemu se krute čestice gibaju pneumatskim transportom odnosno u mlazu.

Za računsko određivanje ovih parametara razvijeno je niz jednadžbi. Za određivanje maksimalne visine fontanskog sloja se u literaturi najviše koristi jednadžba koju su razvili i predložili Malek i Lu (1965) :

$$\frac{L_m}{d_k} = 0,105 \left(\frac{d_k}{d_p} \right)^{0,75} \left(\frac{d_k}{d_i} \right)^{0,4} \left(\frac{\psi^2}{\rho_p^{1,2}} \right) \tag{1}$$



Slika 1. Fontanski sloj
Figure 1. Spouted bed

gdje je faktor oblika čestica u sloju (Mele i Martinez,1984):

$$\Psi = 0,205 \left(\frac{A}{V^{\frac{2}{3}}} \right) \tag{2}$$

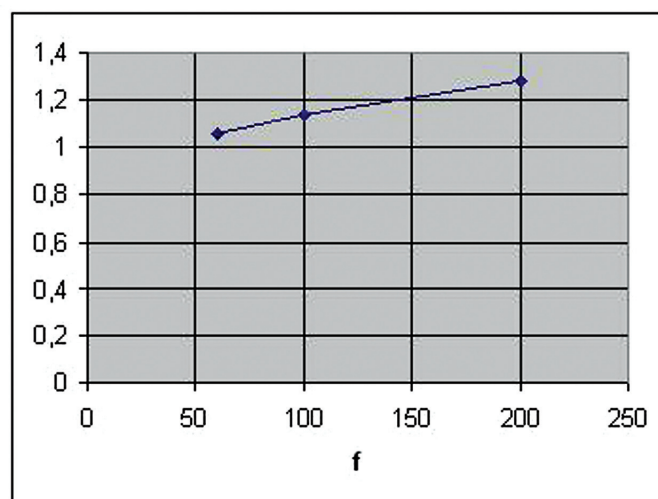
Mathur i Gishler (1955), te Mathur i Epstein (1974) su definirali izraz za minimalnu površinsku brzinu fontaniranja za $0,152 < dk < 0,6$ m i $0,9 < Lk < 2,7$ m

$$v_{ms} = \left(\frac{d_p}{d_k} \right) \left(\frac{d_i}{d_k} \right)^n \left[2gL \frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right]^{1/2} \tag{3}$$

Za kolone promjera od 0,152 m do 0,304 m eksponent je $n=1/3$ i ostaje konstantan ako su promjene kuta u vrhu konusnog dijela (obrnuti konus) kolone $\beta = 45^\circ - 85^\circ$. U koloni promjera 0,61 m eksponent ovisi o kutu u vrhu konusnog dijela kolone i mijenja se od $n = 0,23$ pri $\beta = 45^\circ$ do $n = 0,13$ pri $\beta = 85^\circ$. Minimalna površinska brzina fontaniranja raste s visinom fontanskog sloja, a opada s porastom promjerom sloja. Promjena unutarnjeg promjera cijevi za dovođenje fluida također utječe minimalno na pad ili rast minimalne brzine fontaniranja. Međutim ako je brzina fluida dovoljna da nasipina fluidizira, onda fontanski sloj postaje nestabilan i tada fontanski sloj ima maksimalnu visinu fontaniranja iznad kojeg fontaniranje gubi snagu i sloj postaje fluidiziran. Mathur (1971) smatra da je v_{ms} približno jednak minimalnoj brzini fluidizacije kada je visina sloja postigla maksimalnu visinu fontanskog sloja. Ipak treba ukazati da u pojedinačnim slučajevima visina fontanskog sloja treba biti manja od one maksimalne i brzina strujanja fluida za fontaniranje treba biti dosta manja od onih koji se traže kod fluidizacije. Maksimalna brzina fontaniranja se može izračunati iz jednadžbe (3) s time da se umjesto L uvrsti L_m . (Smith, 2007):

Ova jednadžba je postavljena uz uvjet da je temperatura sloja jednaka temperaturi okoliša, kod viših temperatura dobivene vrijednosti za minimalnu površinsku brzinu fluida kroz fontanski sloj treba pomnožiti faktorom f očitanim iz grafa na slici 2 ili izračunatog iz jednadžbe ($R^2 = 0,9988$):

$$f = 0,015\vartheta + 0,99 \tag{3a}$$



Slika 2. Ovisnost faktora f o temperaturi ϑ sloja
Figure 2. Factor f versus temperature ϑ bed



Opsežna istraživanja vezana uz ponašanje fontanskog sloja u koničnim kolonama sa fontanskim slojem proveo je Kmiec (1983). U radu je dao i pregled istraživanja drugih autora koji su radili na definiranju minimalne brzine fontaniranja sloja kao što je prikazano u tablici 1.

Tablica 1. Korelacije minimalne brzine fontaniranja za konusne slojeve (Kmiec, 1983)

Table 1. Minimum Spouting Velocity Correlations for Conical Beds (Kmiec, 1983)

Istraživači / Investigators	Korelacija / Correlation
Kmiec (1977)	$v_{ms} = \frac{\mu}{d_p \rho} \left[0,072 \left(\frac{F_D}{F_G} \right)_{ms} Ar \right]^{0,714}$ <p>gdje je:</p> $\left(\frac{F_D}{F_G} \right)_{ms} = 0,0485 (\epsilon_{ms})^{3,1} \left(\frac{L}{d_k} \right)^{2,15} \gamma$
Nikolaev and Golubev (1964)	$(Re_i)_{ms} = 0,051 Ar^{0,59} \left(\frac{d_i}{d_k} \right)^{0,1} \left(\frac{L}{d_k} \right)^{0,25}$
Tsvik et al. (1967)	$(Re_i)_{ms} = 0,4 Ar^{0,52} \left(\frac{L}{d_i} \right)^{1,24} \left(\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \right)^{0,42}$
Gorshtein and Mukhlenov (1964)	$(Re_i)_{ms} = 0,174 Ar^{0,5} \left(\frac{d_{sl}}{d_i} \right)^{0,85} \left(\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \right)^{-1,25}$

Srednji promjer mlaza u fontanskom sloju se može odrediti pomoću izraza koji je predložio Mikhailik (1966)

$$d_s = 1,45 \left[0,115 d_k - 0,077 \left(\frac{m''}{\rho_p} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (4)$$

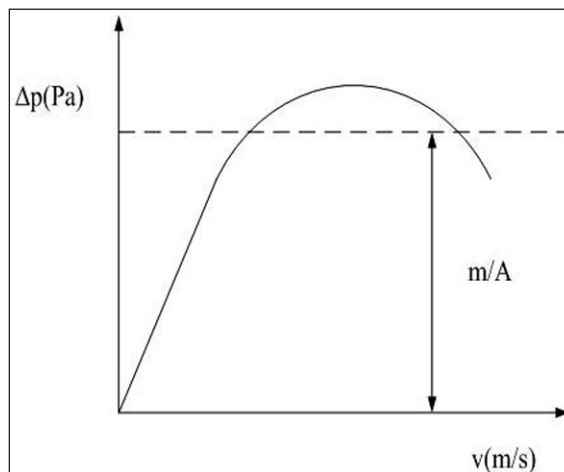
Jednadžba se može primijeniti s točnošću od $\pm 12\%$ za $0,05 \text{ m} < d_k < 0,50 \text{ m}$, $L > 0,30 \text{ m}$ i za $d_p < 0,1 \text{ cm}$.

Maksimalni pad tlaka u fontanskom sloju prema Mathuru i Epsteinu (1974) se može odrediti iz:

$$\Delta p_m = - \frac{6,8L \rho g}{\operatorname{tg} \beta} \left(\frac{d_i}{d_k} \right) - 0,8 + 34,4 \left(\frac{d_p}{L} \right) \quad (5)$$

Međutim je interesantnija jednadžba za određivanje pada tlaka u fontanskom sloju (Kostić, 1972):

$$\Delta p = 75,3 \frac{L \rho_n \left(\frac{\beta}{2} \right)^{0,2}}{\left(\frac{L}{d_i} \right)^{0,33} Re^{0,2}} \quad (6)$$



Slika 3. Pad tlaka u fontanskom sloju (Geldart, 1986)

Figure 3. Pressure drop in spouted bed (Geldart, 1986)

Ovaj izraz treba za svaki slučaj provjeriti i korigirati za što šire područje istraživanja pri različitim uvjetima. Gdje je:

$$Re = \frac{v d_v}{\nu} \quad (7)$$

u ovom slučaju se v određuje iz odnosa protoka sredstva za fontaniranje sloja i površine presjeka kolone, dok je d_v ekvivalentni promjer kod kojega ekvivalentna kugla i čestica imaju jednake volumene:

$$d_v = \left(\frac{6V_p}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

Izbor optimalnog kuta β otvora ulaznog konusnog dijela kolone s obzirom na brzinu cirkulacije čestica se može odrediti iz:

$$\beta = 180^\circ - 2\left[\gamma + (30 - 40^\circ) \right] \quad (10)$$

gdje je γ kut prirodnog otkosa materijala.

Na osnovu literaturnih podataka da poroznost fontanskog sloja ovisi o dimenzijama čestica u sloju odnosno poroznost je manja što su čestice u sloju sitnije. Izveden je izraz za orijentaciono određivanje poroznosti (Kostić, 1972):

$$\epsilon = 2,17 \left(\frac{Re}{Ar} \right)^{0,33} \left(\frac{d_i}{L} \right)^{0,5} \left[\operatorname{tg} g \left(\frac{\beta}{2} \right) \right]^{-0,6} \quad (11)$$

gdje je L početna visina sloja, dok je:

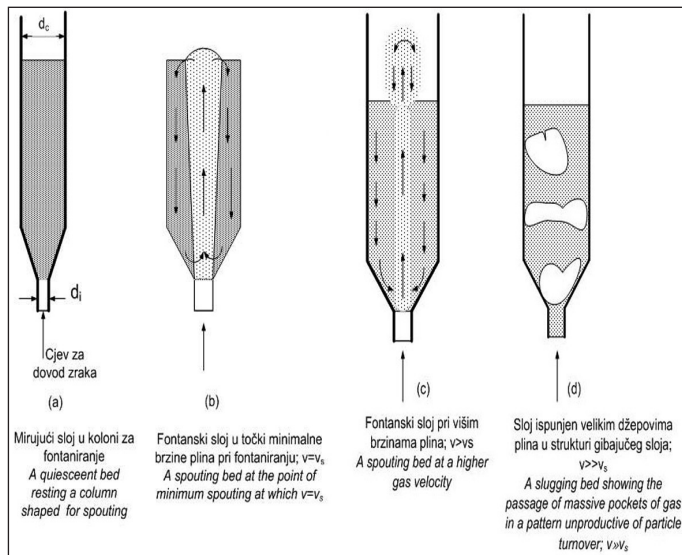
$$Ar = \frac{d_v^3 \rho_p g}{\rho v^2} \quad (12)$$

Ponašanje fontanskog sloja

Mathur i Epstein (1974) smatraju da su recirkulacioni slojevi varijanta konvencionalne tehnike fontanskog sloja. Međutim, njihova svojstva mogu biti izrazito drugačija u odnosu na ona koja susrećemo kod fontanskog sloja. Konvencionalni ili klasični fontanski sloj je onaj koji se formira u cilindričnoj

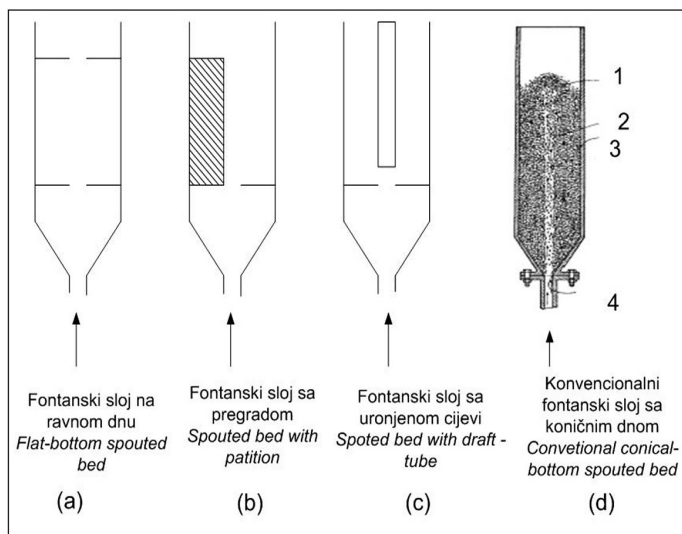


koloni čiji je donji dio u obliku obrnutog konusa. Nastajanje fontanskog sloja je najbolje opisao Becker (1961) od trenutka nasipanja nasipine u kolonu odnosno gustog sloja (slika 4a) gdje se postepenim povećanjem brzine strujanja fluida kroz kolonu odnosno sloj stvara fontanski sloj pri minimalnoj brzini fontaniranja (slika 4b), a zatim daljim porastom brzine fontana je sve izrazitija (slika 4c), da bi se sloj transformirao i postao ispunjen velikim mjehurima ili džepovima plina (slika 4d), kao što je prikazano na slici 4.



Slika 4. Povećanje sloja (Becker, 1961)
Figure 4. Bed expansion (Becker, 1961)

Fontanski slojevi se mogu svrstati na različite načine zavise o odabranim kriterijima, tako da su razvijene različite klasifikacijske sheme većeg broja autora. Jedan od takvih pristupa je i onaj prikazan na slici 5 i osnovan je na različitim izvedbama kolona u kojima se postiže fontanski sloj (Swaminathan i Mujumdar, 1984.).



Slika 5. Sheme fontanskih slojeva (1-fontana čestica, 2-velika brzina plina u mlazu, 3 prstenasti prostor sporog gibanja čestica, 4-ulaz plina) (Swanathan i Mujumdar, 1984)

Figure 5. Schematics of spouted beds (1-Particle fountain, 2-Heigh gas velocity spout, 3-Annulus of slowly moving particles, 4- Inlet gas) (Swanathan and Mujumdar, 1984)

U kolonu se vrši dovođenje fluida kroz jednu sapnicu koja je smještena na dnu kolone. Postoje različite izvedbe dovođenja zraka u nasuti sloj zrnatog materijala. Interesantna je izvedba s centralnom sapnicom s pomoćnim tokom fluida u prstenastom presjeku sloja. Također su interesantne izvedba s tangencijalnim dovodom fluida periferno bez centralne sapnice. Specifične su izvedbe s većim brojem sapnica ili pomoću vibracija kolone odnosno površine kroz koju se dovodi fluid za fontaniranje (Swaminathan i Mujumdar, 1984.).

Uređaji sa fontanskim slojem se mogu voditi šaržno i kontinuirano. Kod toga je potrebno ukazati da se sloj čestica može promatrati kao aktivni ili pasivni. Aktivni fontanski sloj je onaj kod kojega se trebaju ostvariti povoljni uvjeti za prijenos topline i mase. Pasivni ili inertni je onaj kod kojega se želi postići slične efekte kao npr. kao kod sušenja pasta ili gustih suspenzija (Swaminathan i Mujumdar, 1984.).

Postupci sa fontanskim slojem mogu biti primjenjeni u slučajevima kada se nasipina sastoji od vrlo grubih čestica ili od čestica koje dobro ne fluidiziraju. Kod fluidizacije imamo za ravnomjernu raspodjelu fluida po presjeku nasutog sloja s propusnom razdjelnom površinom kroz koju struji fluid dovodeći čestice nasipne u stanje lebdenja. Kod fontanskih slojeva gibanje čestica prema gore je vrlo brzo u dobro definiranoj centralnoj zoni mlaza. U preostalom dijelu sloja čestice nasipine se gibaju prema dolje u slabo pomičnom sloju. U nekom vremenskom razdoblju u sloju dolazi do brzog smanjenja temperaturnih razlika slično kao i u gustom sloju gdje su sve čestice u stalnom kontaktu između sebe.

Ograničenja konvencionalnog fontanskog sloja su pad tlaka koji prethodi nastajanju fontanskog sloja, geometrija kolone, regulacija protoka fluida više je vezana uz održavanje fontanskog sloja nego za potrebe vezane uz prijenos topline i mase, kapacitetu po jedinici praznog prostora i maksimalnoj visini sloja, pri prenošenju iz laboratorijskog u industrijsko mjerilo. Vidljivo je da ova ograničenja konvencionalne tehnike fontanskog sloja posebno su prilagođene za kapacitete koji nisu suviše veliki kao npr. u farmaceutici u kojoj se susrećemo s manjom masom sipkog materijala.

Popis simbola Nomenclature

A - površina presjeka čestice, *cross-sectional area of particle*, m^2

Ar - Arhimedov broj, *Archimedes number*

d_k - promjer (unutarnji) kolone, *column (inside) diameter*, m

d_p - promjer čestice, *particle diameter*, m

d_i - promjer (unutarnji) ulazne cijevi za fluid, *fluid inlet pipe (inlet) diameter*, m

d_s - promjer mlaza, *spout diameter*, m

v_{ms} - minimalna površinska brzina za fontaniranje, *minimum superficial velocity for spouting*, m/s

F_D - sila otpora oblika čestice, *drag force on a particle*, N

F_G - sila teža, *force of gravity*, N