

NUMERIČNE SIMULACIJE TOKA TEKOČINE IN DELCEV V GRANULATORJU Z LEBDEČIM SLOJEM

Sprejeto

20. 7. 2021

Recenzirano

23. 1. 2022

Izdano

30. 4. 2022

**Izvirni znanstveni
članek****Tehnika: Procesno
strojništvo****Ključne besede:**

lebdeči
sloj,
razdelilna
plošča,
porazdelitev
pretoka
zraka,
računalniška
dinamika
tekočin,
metoda
diskretnih
elementov

LUKA KEVORKIJAN IN MATEJ ZADRAVEC

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, Slovenija.

E-pošta: luka.kevorkijan@um.si, matej.zadavec@um.si

DOPISNI AVTOR

matej.zadavec@um.si

Povzetek Cilj raziskovalnega dela je bil ugotoviti porazdelitev pretoka zraka na razdelilni plošči laboratorijske naprave za granuliranje v lebdečem sloju. Za postopek granuliranja delcev je pomembna njihova enakomerna porazdelitev po prostoru naprave in njihovo gibanje. Namesto do sedaj uporabljenega pristopa prenosa procesnih pogojev za pretok zraka iz manjše na veliko napravo na podlagi navidezne hitrosti toka zraka, bi želeli upoštevati porazdelitev toka nad razdelilno ploščo, saj tok ni uniformen. Za takšen pristop je potrebno ugotoviti porazdelitev pretoka nad razdelilno ploščo in odvisnost porazdelitve volumskega pretoka zraka. Izvedli smo več numeričnih simulacij računalniške dinamike tekočin toka in več dvosmerno sklopljenih simulacij računalniške dinamike tekočin in metode diskretnih elementov, saj je ena izmed predpostavk, ki smo jo v prispevku potrdili, da imajo delci vpliv na porazdelitev pretoka. Ugotovili smo, da pretok zraka skozi napravo vpliva na porazdelitev pretoka na razdelilni plošči, še posebej v primeru polne naprave.



NUMERICAL SIMULATIONS OF PARTICLES AND FLUID FLOW IN A FLUIDIZED BED GRANULATOR

LUKA KEVORKIJAN IN MATEJ ZADRAVEC

University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Maribor, Slovenia.
E-mail: luka.kevorkijan@um.si, matej.zadavec@um.si

CORRESPONDING AUTHOR
matej.zadavec@um.si

Accepted
20. 7. 2021

Revised
23. 1. 2022

Published
30. 4. 2022

Abstract The objective of this study was to determine the distribution of air flow on a distributor plate of a laboratory fluid bed granulator. The uniform spatial distribution of particles is important for the granulation process.

Instead of the current approaches to scaling the process parameters for air flow rate based on the concept of apparent air velocity, it would be desirable to also consider the distribution of air flow above the distributor, since the flow is not uniform.

We have performed several numerical simulations of the air flow using computational fluid dynamics (CFD) and several two-way coupled simulations using CFD and the discrete element method (DEM), motivated by our confirmed assumption that particles affect the air flow distribution. We found that the air flow rate through the granulator affects the distribution of the air flow on the distributor, especially in the case of a loaded granulator.

Original science
article

Technology: Process
engineering

Keywords:
fluidized
bed,
distribution
plate,
airflow
distribution,
computational
fluid
dynamics,
discrete
element
method

1 Uvod

V farmacevtski industriji se za granulacijo, sušenje in oblaganje z raztopinami ali suspenzijami uporablja tehnologija vrtninoslojnega granuliranja (sušenje in oblaganje). Proces poteka v lebdečem sloju (angl. Fluid Bed), ki je v napravi vzdrževan s primernim pretokom plina (zraka) skozi vstopno razdelilno ploščo, ki zagotovi vrtnično gibanje delcev nad njo.

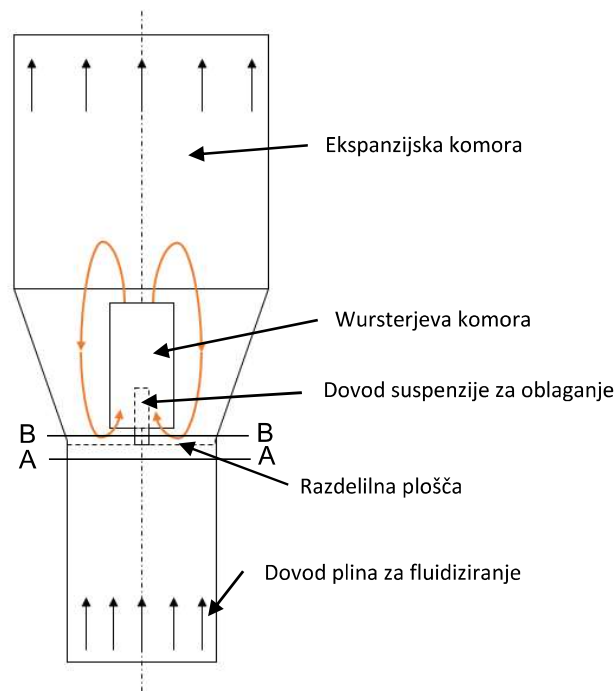
Lebdeči sloj je dvofazen sistem s trdnimi delci, fluidiziranimi v plinski fazi in ima nekatere značilnosti suspenzije delcev v kapljevini oziroma se v nekaterih primerih obnaša podobno kot kapljevina. Za lebdeči sloj je značilen izboljššan prenos toplote in snovi v primerjavi z nasutim slojem.

Naprave z lebdečim slojem so cilindrične posode z dovodom plina za fluidiziranje s spodnje strani posode. Obstajajo različne izvedbe naprav z lebdečim slojem, prilagojene zahtevam procesa, ki se v njih odvija. Za granuliranje in oblaganje se pogosto uporablja naprava s perforirano razdelilno ploščo in Wursterjevo komoro, v kateri so na spodnji strani nameščene razpršilne šobe skozi katere se dovede suspenzija navzgor v komoro. Gibanje delcev je poleg drugih parametrov, kot so na primer pretok suspenzije, odmik Wursterjeve komore od razdelilne plošče, temperatura in vlažnost zraka, odločilno za kvaliteto nanosa suspenzije na površino delcev. Kvalitativen opis vpliva parametrov na proces oblaganja je predstavljen v članku Christensen-a in Bertelsen-a (Christensen & Bertelsen, 1997), kjer je tudi ugotovljeno, da mora biti pretok (oziroma hitrost) plina za fluidiziranje dovolj velik(a) v področju Wursterjeve komore in dovolj nizek(nizka) na njeni zunanji strani. Za vzpostavitev kroženja delcev, kot je prikazano na sliki 1, ima razdelilna plošča v različnih področjih različen delež odprte površine in različne velikosti odprtin (slika 2).

V praksi se pri razvoju procesov v podjetjih ugotovitve (procesne parametre, npr. pretok) prenese iz manjše (laboratorijske) naprave na veliko (industrijsko) napravo. Dosedanji pristop prenosa procesnih pogojev za pretok zraka je z uporabo navidezne hitrosti toka, kjer se predpostavi, da je za vzpostavitev stabilnega lebdečega sloja potrebno doseči enako navidezno hitrost toka. V tem delu smo raziskali porazdelitev pretoka zraka nad razdelilno ploščo, saj bi lahko v prihodnje pri prenosu procesnih pogojev za pretok zraka uporabili pristop, ki upošteva

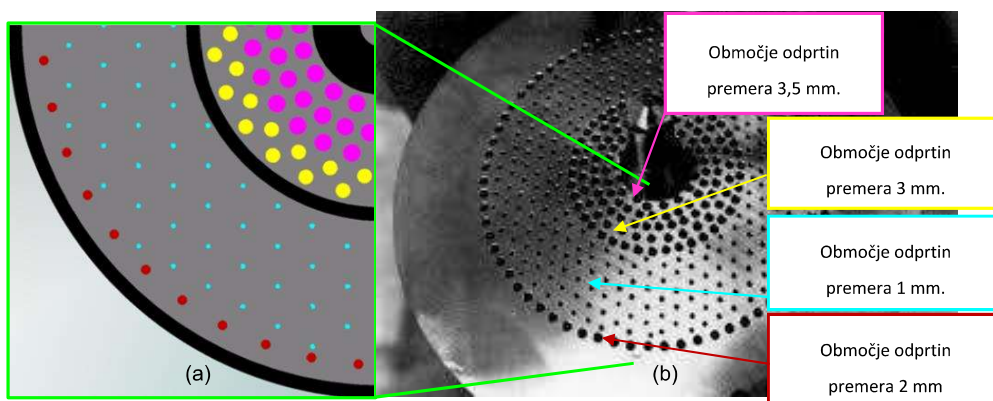
dejansko porazdelitev toka namesto poenostavljenega pristopa z navidezno hitrostjo. Želeli smo tudi ugotoviti ali sprememba pretoka zraka na napravi vpliva na delež pretoka skozi posamezno območje razdelilne plošče, kjer smo območja razdelili glede na premer odprtin v plošči. Delež, ki ga zavzema površina odprtin posameznega območja razdelilne plošče je definiran kot:

$$\text{delež površine odprtin območja} = \frac{\text{površina odprtin območja}}{\text{površina vseh odprtin}} \quad (1)$$



Slika 1: Shematski prikaz delovanja naprave z lebdečim slojem z Wursterjevo komoro

Vir: Lasten



Slika 2: Razdelilna plošča; (a) model, (b) fotografija

Vir: Lasten

V preteklosti se je razdelilna plošča zasnovala na podlagi eksperimentov, danes pa je smotrna uporaba numeričnih simulacij. Pri simulaciji pretoka skozi odprtine v razdelilni plošči je potrebna gosta računsko mreža, kar pomeni za majhne premere lukenj veliko število elementov. V skladu s ciljem je uporabljena numerična simulacija za ugotovitev porazdelitve pretoka namesto eksperimenta, torej smo se v tem delu omejili na uporabo numerične simulacije kot virtualnega eksperimenta.

2 Metodologija

2.1 Analitični preračun porazdelitve toka zraka po razdelilni plošči

Za tok zraka skozi razdelilno ploščo v primeru prazne naprave (brez delcev) lahko zapišemo energijsko enačbo,

$$\frac{p_A}{\rho_t g} + \frac{v_A^2}{2g} + z_A = \frac{p_B}{\rho_t g} + \frac{v_B^2}{2g} + z_B + \Delta h_t, \quad (2)$$

kjer je p statični tlak zraka, v hitrost zraka, ρ_t gostota zraka, g gravitacijski pospešek, z geodetska višina računsko ravnine in Δh_t izguba tlačne višine na razdelilni plošči. Indeksa A in B označujeta računsko ravnino kot je prikazano na sliki 1. Tok skozi odprtine razdelilne plošče obravnavamo kot tok skozi vzporedne vodnike, potem izračunamo izgubo tlačne višine na razdelilni plošči po Darcyevi enačbi

$$\Delta h_t = \frac{\Delta p_D}{\rho_t g} = \frac{\zeta_i}{2g} v_i^2, \quad (3)$$

kjer je Δp_D tlačni padec na razdelilni plošči, ζ_i koeficient lokalnih izgub i-tega območja odprtin v razdelilni plošči in v_i povprečna hitrost toka skozi i-to območje odprtin. Iz enačbe (3) izrazimo povprečno hitrosti skozi i-to območje odprtin v razdelilni plošči

$$v_i = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_D}{\zeta_i \cdot \rho_t}}. \quad (4)$$

Za izračun koeficienta lokalnih izgub uporabimo izraz za debele perforirane plošče (Idel'chik, 1960; Kast et al., 2010)

$$\zeta_i = \left(\frac{1}{\gamma} - 1\right)^2 + (1 - \Phi_i)^2 + \Phi_i^2 - 2\Phi_i, \quad (5)$$

kjer je γ iztočni koeficient (za turbulenten tok skozi odprtino z ostrim izstopnim robom privzamemo vrednost 0,611) in relativna prosta površina $\Phi_i = A_{h,i}/A_i$. A_i je površina (kolobar) razdelilne plošče i-tega območja odprtin, $A_{h,i}$ je površina i-tega območja odprtin (površina odprtin v razdelilni plošči). Volumski pretok skozi napravo je enak vsoti volumskih pretokov skozi območja odprtin v razdelilni plošči

$$Q = \sum_i Q_i = \sum_i (v_i A_{h,i}) = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_D}{\rho_t}} \sum_i \left(A_{h,i} \sqrt{\frac{1}{\zeta_i}} \right) \quad (6)$$

Na koncu izrazimo delež volumskega pretoka skozi posamezno območje odprtin

$$y_i = \frac{Q_i}{Q} = \frac{A_{h,i} \sqrt{\frac{1}{\zeta_i}}}{\sum_i \left(A_{h,i} \sqrt{\frac{1}{\zeta_i}} \right)} \quad (7)$$

2.2 Določitev porazdelitve toka zraka po razdelilni plošči z numerično simulacijo

Tok zraka z delci mikrokristalne celuloze je modeliran dvosmerno sklopljeno po pristopu Euler-Lagrange, torej je upoštevan vpliv toka zraka na gibanje delcev in tudi vpliv delcev na tok zraka. Sklopljeno modeliranje in uporabo sklopljenih simulacij s programskimi orodji AVL Fire in XPS so opisali avtorji inštituta RCPE (Research Center Pharmaceutical Engineering, Graz), ki je razvil orodje XPS, v člankih (Böhling et al., 2019; Forgber et al., 2020; Jajcevic et al., 2013) in poglavju v knjigi (Sarkar et al., 2019). Vodilne enačbe toka zraka so diskretizirane in se rešujejo s programskim orodjem AVL Fire. Rešuje se kontinuitetna enačba

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_t) + \nabla \cdot (\alpha \rho_t \mathbf{v}_t) = 0 \quad (8)$$

in Navier Stokesove enačbe

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho_t\mathbf{v}_t) + \nabla \cdot (\alpha\rho_t\mathbf{v}_t)\mathbf{v}_t = -\alpha\nabla p - \nabla \cdot (\alpha\boldsymbol{\tau}_t) + \alpha\rho_t\mathbf{g} - \mathbf{S}_M, \quad (9)$$

kjer je α delež plinske faze, \mathbf{v}_t vektor hitrosti plinske faze, $\boldsymbol{\tau}_t$ napetostni tenzor. V enačbi (9) je vpliv delcev na gibanje plinske faze opisan s členom ponora gibalne količine

$$\mathbf{S}_M = \sum_{i=1}^N \beta(\mathbf{v}_t - \mathbf{v}_{d,i}), \quad (10)$$

kjer je β koeficient prenosa gibalne količine med fazami, N število delcev in $\mathbf{v}_{d,i}$ vektor hitrosti i -tega delca. Napetostni tenzor izrazimo kot

$$\boldsymbol{\tau}_t = -p\mathbf{I} + \boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \mu \cdot (\nabla\mathbf{v}_t + \nabla\mathbf{v}_t^T) - \frac{2}{3}\mu\nabla \cdot \mathbf{v}_t\mathbf{I}, \quad (11)$$

kjer je \mathbf{I} enotska matrika, $\boldsymbol{\sigma}$ tenzor strižnih napetosti in μ viskoznost plinske faze. Turbulenca je modelirana s standardnim k - ϵ modelom, ki zajema dve prenosni enačbi za obe turbulentni veličini toka, za turbulentno kinetično energijo k

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_t k) + \nabla \cdot (\rho_t k)\mathbf{v}_t = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \rho_t \epsilon + S_k \quad (12)$$

in za disipacijo turbulentne kinetične energije (ϵ)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_t \epsilon) + \nabla \cdot (\rho_t \epsilon)\mathbf{v}_t = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} P_k - C_{2\epsilon} \rho_t \epsilon) + S_\epsilon. \quad (13)$$

V enačbah (12) in (13) sta σ_k in σ_ϵ modelni konstanti, P_k produkcija turbulentne kinetične energije, S_k ponor turbulentne kinetične energije, P_ϵ produkcija disipacije turbulentne kinetične energije in S_ϵ ponor disipacije turbulentne energije. Turbulentna viskoznost je

$$\mu_t = \rho_t C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (14)$$

kjer je C_μ modelna konstanta.

Gibanje delcev opišemo z II. Newtonovim zakonom, ki ga lahko zapišemo za vsak posamezen delec. V diskretizirani obliki so enačbe rešene s programskim orodjem XPS, trki delcev med seboj in s steno so modelirani po metodi DEM (Discrete Element Method) (Cundall & Strack, 2008). Za premo gibanje delca zapišemo enačbo

$$m_{d,i} \frac{d\mathbf{v}_{d,i}}{dt} = -V_{d,i} \nabla p + \frac{\beta}{1-\alpha} (\mathbf{v}_t - \mathbf{v}_{d,i}) + m_{d,i} \mathbf{g} + \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_s, \quad (15)$$

kjer je $m_{d,i}$ masa i-tega delca, $\mathbf{v}_{d,i}$ vektor hitrosti i-tega delca, t čas, $V_{d,i}$ prostornina i-tega delca, p tlak plinske faze, \mathbf{F}_d vektor rezultante sil zaradi trkov delca z delci in \mathbf{F}_s vektor rezultante sil zaradi trkov delca s stenami naprave. Interakcija delcev med seboj in s stenami je opisana z modelom mehke krogle, kjer sta posebej modelirani sili v normalni smeri in tangentialni smeri glede na smer trka. Normalna sila je modelirana z linearno vzmetjo in vzporedno vezano dušilko (viskozno dušenje)

$$\mathbf{F}_{dn,ij} = -k_n \delta_{n,ij} \mathbf{n}_{d,ij} - 2\eta \sqrt{m_{ef} k_n} (\mathbf{v}_{d,ij} \mathbf{n}_{d,ij}) \mathbf{n}_{d,ij}, \quad (16)$$

tangencialna sila pa je modelirana z linearno vzmetjo z vzporedno vezano dušilko in zaporedno vezanim drsnim elementom, ki modelira trenje med delci.

$$\mathbf{F}_{dt,ij} = -k_t \delta_{t,ij} - 2\eta \sqrt{\frac{2}{7} m_{ef} k_t} (\mathbf{v}_{d,ij} - (\mathbf{v}_{d,ij} \mathbf{n}_{d,ij}) \mathbf{n}_{d,ij}) \quad (17)$$

V enačbah (16) in (17) je k_n koeficient vzmeti v normalni smeri, k_t koeficient vzmeti v tangentialni smeri, $\mathbf{v}_{d,ij}$ vektor relativne hitrosti med delcema i in j, $\delta_{n,ij}$ prekrivanje v normalni smeri (razdalja), $\delta_{t,ij}$ tangentalno prekrivanje, $\mathbf{n}_{d,ij}$ enotski vektor normale in η koeficient dušenja. Ekvivalentna masa pri trku i-tega in j-tega delca je

$$m_{ef} = \left(\frac{1}{m_{d,i}} + \frac{1}{m_{d,j}} \right)^{-1}. \quad (18)$$

Zapišemo še enačbo za vrtenje delca

$$I_{d,i} \frac{d\boldsymbol{\omega}_{d,i}}{dt} = \mathbf{M}_{d,i} \quad (19)$$

kjer je $I_{d,i}$ vztrajnostni moment i-tega delca, $\boldsymbol{\omega}_{d,i}$ vektor kotne hitrosti i-tega delca in $\mathbf{M}_{d,i}$ rezultanta navora na i-ti delec. Vpliv kotalnega trenja med i-tim in j-tim delcem je modeliran z enačbo navora

$$\mathbf{M}_{r,ij} = \mu_r k_n \delta_{n,ij} r_{ef} \frac{\boldsymbol{\omega}_{d,ij}}{|\boldsymbol{\omega}_{d,ij}|}, \quad (20)$$

kjer je μ_r koeficient kotalnega trenja in $\boldsymbol{\omega}_{d,ij}$ vektor relativne kotne hitrosti med delcema i in j. Ekvivalentni polmer trka med i-tim in j-tim delcem je

$$r_{ef} = \left(\frac{1}{r_{d,i}} + \frac{1}{r_{d,j}} \right)^{-1}. \quad (21)$$

3 Rezultati in diskusija

3.1 Rezultati analitičnega preračuna

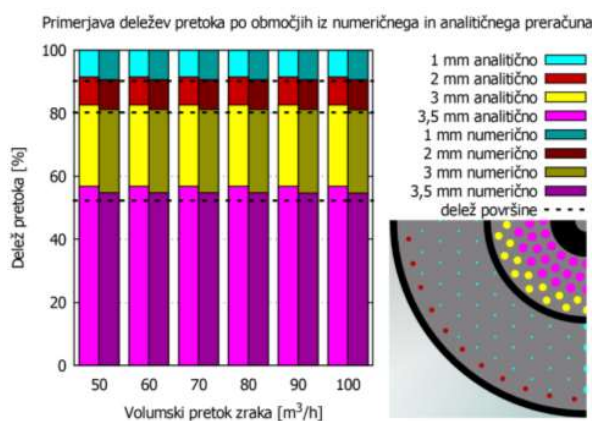
Rezultati analitičnega izračuna so prikazani v tabeli 1. V primerjavi z deležem, ki ga zavzema posamezno območje odprtin, pokaže analitičen izračun večji delež toka zraka v območju odprtin premera 3,5 mm in manjši delež toka skozi preostala območja odprtin. V analitičnem preračunu nismo upoštevali odvisnosti iztočnega koeficienta (in posledično koeficienta lokalnih izgub) od hitrosti toka oziroma pretoka.

Tabela 1. Primerjava deleža odprtin in pretoka zraka po analitičnem preračunu po območjih razdelilne plošče.

Premer odprtin v območju [mm]	Delež odprtin območja od skupne površine odprtin [%]	Delež pretoka zraka čez območje razdelilne plošče analitično [%]	Relativno odstopanje [-]
1	9,79	8,48	-0,13381
2	10,00	8,94	-0,10600
3	27,97	25,77	-0,07866
3,5	52,24	56,80	0,087289

3.2 Numerični rezultati porazdelitve toka zraka po razdelilni plošči – prazna naprava brez delcev v sistemu

Rezultati numeričnih simulacij odstopajo od rezultatov analitičnega izračuna (slika 3), delež toka skozi posamezno območje odprtin je bližje deležu površine posameznega območja odprtin. Analiza variance je pokazala, da je porazdeljevanje toka zraka po razdelilni plošči odvisno od pretoka zraka skozi napravo.

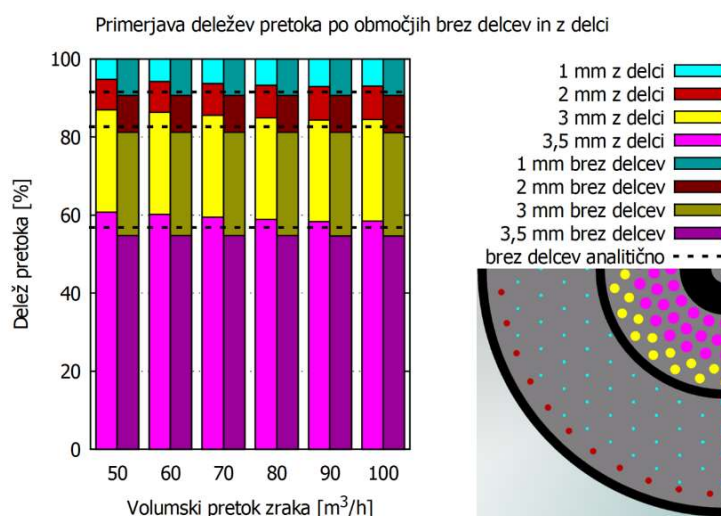


Slika 3: Rezultati numeričnih simulacij in primerjava z analitičnimi rezultati ter deleži površin območij razdelilne plošče (prazna naprava brez delcev v sistemu)

Vir: Lasten

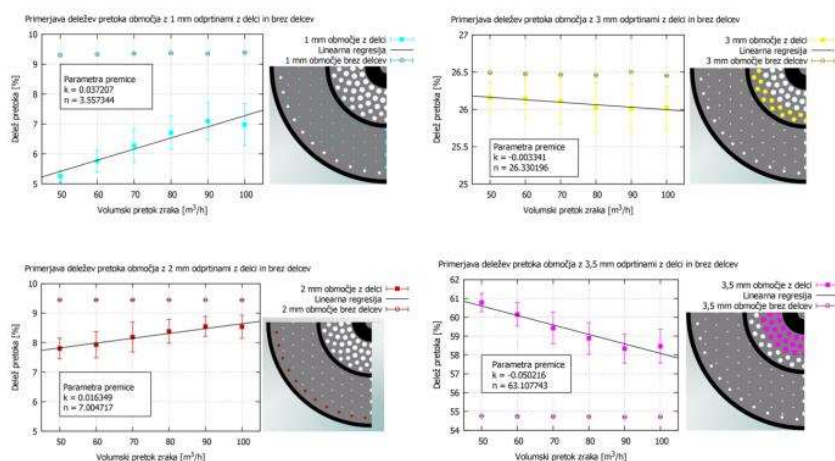
3.3 Numerični rezultati porazdelitve toka zraka po razdelilni plošči – polna naprava z delci v sistemu

V primeru polne naprave (z delci) opazimo, da je porazdelitev toka zraka po razdelilni plošči odvisna od pretoka zraka skozi napravo (slika 4). V primerjavi s prazno napravo (brez delcev v sistemu) je skozi odprtine premera 1 mm, 2 mm in 3 mm delež pretoka manjši, skozi odprtine premera 3,5 mm pa večji. Za polno napravo (z delci v sistemu) smo s povečevanjem pretoka ugotovili preusmerjanje pretoka od območja pod Wursterjevo komoro proti robu naprave (negativne vrednosti smernih koeficientov regresijske premice v območjih z luknjami 3 mm in 3,5 mm).



Slika 4: Primerjava rezultatov numeričnih simulacij z analitičnimi rezultati po območjih razdelilne plošče

Vir: Lasten

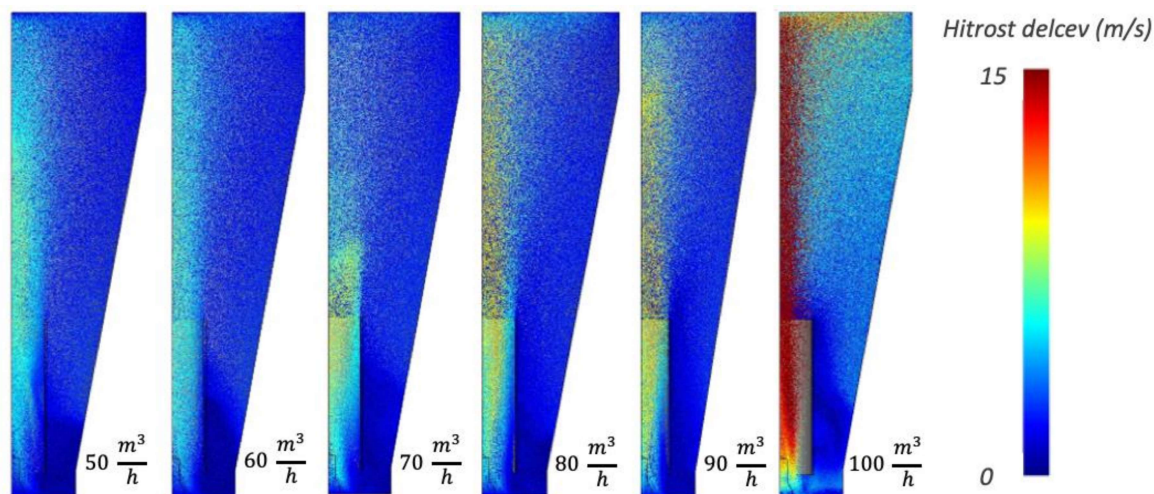


Slika 5: Primerjava deležev pretoka skozi območja razdelilne plošče za primer polne in prazne naprave

Vir: Lasten

Regresijske premice, prikazane na sliki 5, ponudijo interpretacijo začetne vrednosti premice (n) kot stanje nasutega sloja, ko bi bil pretok zraka enak nič. Na drugi strani premice lahko razumemo točko presečišča z deležem prazne naprave, kot delež pri stanju pnevmatskega transporta. S povečevanjem pretoka se namreč stopnjuje fluidizacija v obrobem območju (slika 6), to sta območji z luknjami 1 mm in 2 mm, kar je v nasprotju z željo po kroženju delcev skozi Wursterjevo komoro, kjer se delci

vračajo navzdol proti razdelilni plošči v obrobem območju. To bi lahko bil predmet dodatnih proučevanj porazdeljevanja pretoka.



Slika 6: Prikaz delcev v napravi pri različnih pretokih zraka, barva predstavlja hitrost delca

Vir: Lasten

4 Zaključki

Numerične simulacije lahko ob primerni validaciji dopolnjujejo ali nadomeščajo eksperimentalno delo. V tem delu smo se omejili zgolj na uporabo numeričnih simulacij zato je glavna omejitev za zaupanje v rezultate tega dela pomanjkanje validacije in analize vpliva numeričnega modela na rezultate.

Ugotovili smo, da je tako v primeru prazne naprave kot tudi polne naprave porazdelitev pretoka zraka po razdelilni plošči odvisna od pretoka. Glede na postavljene delovne hipoteze smo pričakovali, da v primeru prazne naprave ne bo tako, vendar smo pri analizi variance zaznali pomemben vpliv. Ob tem se zavedamo, da je metoda analize variance postavljena na predpostavkah o homogenosti variance in normalnosti porazdelitve opisne spremenljivke vzorcev.

V primeru polne naprave je bila razlika v deležu pretoka skozi območji pod Wursterjevo komoro pri največjem in najmanjšem obravnavanem pretoku 2,5 %, kar lahko spremeni potek procesov sušenja in oblaganja in ima lahko odločilen pomen za načrtovanje procesov v farmacevtski industriji, kjer so zahteve po

natančnem obvladovanju procesov zelo stroge. Seveda je možno, da v kakšni drugi panogi z bolj robustnimi procesi tudi takšne razlike niso bistvene.

Glede na ugotovljen vpliv pretoka (oziroma hitrosti toka) se je izkazala predpostavka o nespremenljivosti iztočnega koeficienta v analitičnem preračunu kot napačna in bi morali upoštevati odvisnost od Reynoldsovega števila. Niti analitični niti numerični preračun ni pokazal, da bi delež površine odprtin po območjih v razdelilni plošči sovpadal z deleži pretoka čez ta območja.

V načrtu izvedbe simulacij smo upoštevali dva vplivna faktorja na odziv, poleg pretoka zraka še število delcev, vendar smo se pri izvajanju simulacij omejili na prazno napravo in zgolj eno polnitev naprave in nismo izvedli simulacij z več različnimi polnitvami naprave (različnim številom delcev), kar bi omogočilo dvofaktorsko analizo variance in regresijsko analizo tudi po spremenljivki števila delcev.

Literatura in viri

- Böhling, P., Khinast, J. G., Jajčević, D., Davies, C., Carmody, A., Doshi, P., Am Ende, M. T., & Sarkar, A. (2019). Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Method Modeling of an Industrial-Scale Wurster Coater. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 108(1), 538–550. Pridobljeno iz: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.xphs.2018.10.016>
- Christensen, F. N., & Bertelsen, P. (1997). Qualitative Description of the Wurster-Based Fluid-Bed Coating Process. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 23(5), 451–463.
- Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (2008). A discrete numerical model for granular assemblies. In *The Essence of Geotechnical Engineering: 60 years of Géotechnique* (pp. 305–329). Thomas Telford Publishing. Pridobljeno iz: <https://doi.org/10.1680/ege.35362.0025>
- Forgber, T., Toson, P., Madlmeir, S., Kureck, H., Khinast, J. G., & Jajcevic, D. (2020). Extended validation and verification of XPS/AVL-FireTM, a computational CFD-DEM software platform. *Powder Technology*, 361, 880–893. Pridobljeno iz: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.008>
- Idel'chik, I. E. (1960). *Handbook of hydraulic resistance* (E. Fried (ed.)). CRC Press Inc.
- Jajcevic, D., Siegmann, E., Radeke, C., & Khinast, J. G. (2013). Large-scale CFD-DEM simulations of fluidized granular systems. *Chemical Engineering Science*, 98, 298–310. Pridobljeno iz: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.05.014>
- Kast, W., Gaddis, E. S., Wirth, K.-E., & Stichlmair, J. (2010). L1 Pressure Drop in Single Phase Flow. In *VDI Heat Atlas* (pp. 1053–1116). Springer. Pridobljeno iz: https://doi.org/10.1007/978-3-540-77877-6_46
- Sarkar, A., Shoemaker, B., Doshi, P., am Ende, M. T., Jajcevic, D., Böhling, P., Toson, P., Zadavec, M., & Khinast, J. (2019). Multiscale Modeling of a Pharmaceutical Fluid Bed Coating Process Using CFD/DEM and Population Balance Models to Predict Coating Uniformity. In M. T. am Ende & D. J. am Ende (Eds.), *Chemical Engineering in the Pharmaceutical Industry: Drug Product Design, Development, and Modeling* (2nd ed., pp. 419–450). Wiley. Pridobljeno iz: <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781119600800.ch67>