



G. Matijašić*

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Marulićev trg 19, 10 000 Zagreb

Segregacija

Koliko puta ste pokušali promiješati prašak, ali bezuspješno? One svojevolsne velike čestice uvijek izviruju na vrhu mješavine. Taj efekt naziva se segregacija, a događa se pri potresanju slobodno tečnih prašaka u kojima postoji razlika u veličinama čestica.

Četiri su najčešća mehanizma segregacije koji nastaju zbog razlike u veličini čestica,¹⁻⁴ a to su segregacija uslijed putanja čestica, segregacija perkolacijom sitnih čestica, izdizanje većih čestica uslijed vibracija i taložna segregacija (slika 1).

Segregacija uslijed putanja čestica značajna je u horizontalnom gibanju čestica. Čestice veće gustoće i veće veličine manje će usporavati pri gibanju, što znači da će prijeći veći put prije nego što dođu u stanje mirovanja.

Preslagivanjem čestica uslijed potresanja dolazi do propadanja sitnih čestica unutar porozne strukture. Sitne čestice padaju na dno mješavine. Takvo razdvajanje poznato je pod nazivom segregacija perkolacijom sitnih čestica.

Izdizanje većih čestica uslijed vibracija javlja se zbog velikog momenta koji ostvaruju velike čestice prilikom gibanja prema gore. Sitnije čestice ispunjavaju prostor ispod velike čestice pa ona prilikom gibanja prema dolje komprimira stvoreni sloj, čime se povećava otpor prodiranju čestice prema dnu. Ta vrsta segregacije poznata je i kao efekt brazilskog oraščića.

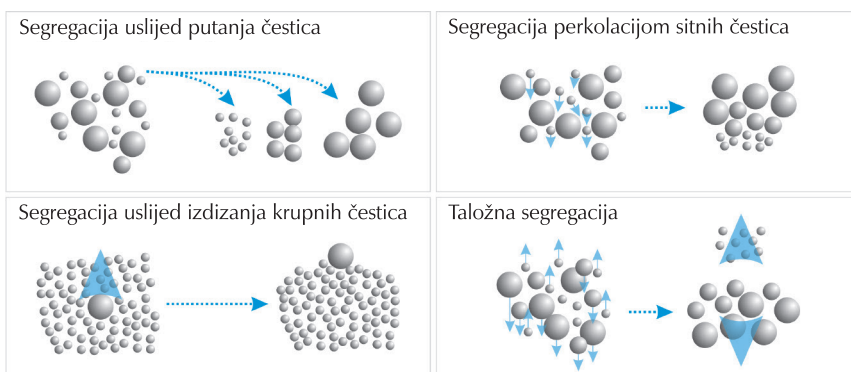
ZANIMLJIVOST

Efekt brazilskog oraščića

Segregacija poznata kao efekt brazilskog oraščića (engl. *brazil-nut effect*) dobila je ime upravo po spomenutoj sjemenki koja je najveća pa će u mješavini različitih oraščića uvijek biti na vrhu.



Zanimljivu demonstraciju možete pogledati na sljedećoj poveznici:
<https://www.sciencebuddies.org/stem-activities/mixing-granular-materials>

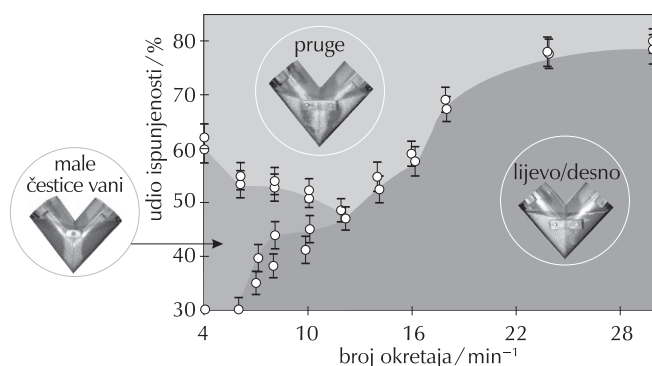


Slika 1 – Ilustracija mehanizama segregacije

Taložna segregacija javlja se prilikom sipanja mješavine koje sadrže dio čestica manjih od 50 μm . Prilikom sipanja stvara se zračna protustruja zbog čega sitne čestice lebde i naknadno se talože na vrhu mješavine.

Segregacija u miješalicama s prevrtanjem

Segregacija predstavlja značajan problem u industriji u procesima koji iziskuju homogenu mješavinu. Miješalice s prevrtanjem često se upotrebljavaju za miješanje nekohezivnih prašaka. Najjednostavniji tip takve miješalice je cilindar ili bubanj, a susreću se i miješalice s dva konusa, V-miješalice, Y-miješalice te druge geometrije. Alexander i sur.^{5,6} ispitali su utjecaj ispunjenosti miješalice i njezina broja okretaja na oblike segregacije u V-miješalici. Identificirali su nekoliko različitih oblika segregacija, ovisno o procesnim uvjetima (slika 2).



Slika 2 – Različiti oblici segregacije u V-miješalici; prilagođeno prema⁵

Postavlja se pitanje kako ocijeniti kvalitetu mješavine? Koji je to kriterij dobre mješavine? Budući da je gotovo nemoguće ocijeniti kvalitetu cjelokupne mješavine u procesu, definira se tzv. ljestvica

* Prof. dr. sc. Gordana Matijašić
e-pošta: gmatijas@fkit.hr

nadzora. Za farmaceutske proizvode to može biti npr. kapsula ili tableta. Na toj se ljestvici definiraju statističke metode i veličine kojima se ocjenjuje kvaliteta mješavine. Pri tome se najčešće primjenjuju indeksi miješanja poput Laceyjevog, Pooleovog, Milesovog, Valentinovog i sličnih.⁷

Primjer Pooleovog indeksa, u kojem se stupanj segregacije kvantitativno izražava iz omjera standardnih devijacija:

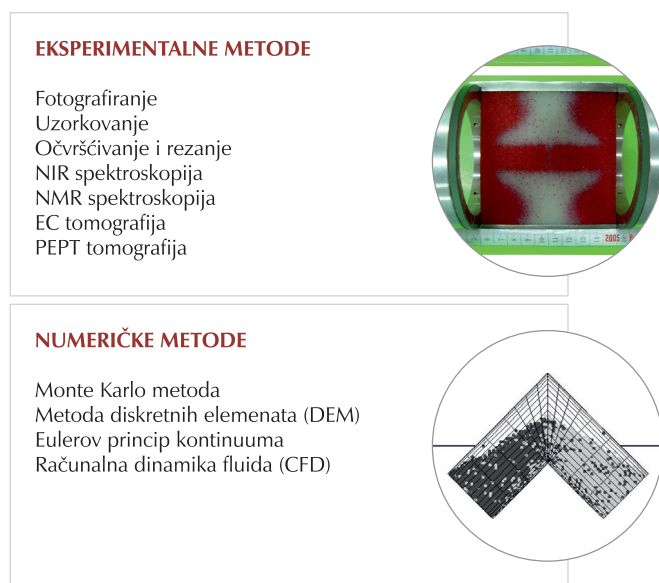
$$I = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N-1}}}{\sigma_R} \quad (1)$$

gdje je I intenzitet segregiranosti (Pooleov indeks miješanja), y_i je udio jedne komponente, \bar{y} je srednji udio promatrane komponente, N je broj uzetih uzoraka, a σ_R je vrijednost standardne devijacije slučajne mješavine izračunata na temelju N uzoraka.

Intenzitet segregiranosti ovisi o broju okretaja miješalice, a kod miješalice s prevrtanjem može se opisati kinetičkim modelom prvoga reda.

Ekperimentalne i numeričke metode praćenja segregacije

Metode praćenja segregacije mogu se podijeliti u dvije skupine, ekperimentalne i numeričke metode (slika 3).



Slika 3 – Prikaz metoda za praćenje segregacije

Najjednostavniji način ekperimentalnog praćenja stanja mješavine je fotografiranje. Dobivene fotografije, u kombinaciji s digitalnom analizom slike, mogu poslužiti za kontinuirano praćenje izmiješanosti. Stupanj izmiješanosti unutrašnjosti mješavine ekperimentalno se može utvrditi invazivnim ili neinvazivnim metodama. Uzorkovanje sondom ili očvršćivanje i rezanje spadaju u invazivne metode. Nedostatak te grupe metoda je narušavanje

postignutog stupnja izmiješanosti ulaskom sonde u uzorak ili dodatkom komponente za očvršćivanje. Neinvazivne metode postaju sve dostupnije, pa u toj grupi veću popularnost dobiva bliska infracrvena spektroskopija (NIRS), spektroskopija nuklearne magnetske rezonancije (NMR), električna kapacitivna tomografija (ECT) te pozitronsko emisijsko praćenje čestica (PEPT) u kojem se primjenjuje pozitronska emisijska tomografija (PET) za praćenje položaja određene čestice.

Razvojem računalnih simulacija one postaju učinkovit alat u praćenju miješanja prašaka. Za razliku od ekperimentalnih metoda, računalne simulacije daju informacije o sustavu na mikro i makro razini. Nadalje, znatno su jeftinije od ekperimentalnih metoda te daju temelj za uvećanje i kontrolu procesa miješanja. Dva su generalna pristupa u numeričkoj analizi miješanja prašaka. Jedan promatra sustav kao niz diskretnih elemenata, a drugi usvaja princip kontinuuma. Metoda diskretizacije uključuje postupke poput simulacije Monte Karlo, koja na temelju određenih statističkih pravila izračunava vjerojatnost gibanja čestica ili metode diskretnih elemenata (DEM), koja na temelju interakcije čestica predviđa njihove putanje.

Eulerov princip kontinuuma zanemaruje položaj čestice, definira kontrolni volumen te primjenjuje zakonitosti mehanike fluida na skupinu čestica. Numerička analiza provodi se primjenom računalne dinamike fluida (CFD).

Simboli

- I – intenzitet segregiranosti, –
- y_i – udio jedne komponente, –
- \bar{y} – srednji udio promatrane komponente, –
- N – broj uzetih uzoraka, –
- σ_R – standardna devijacija slučajne mješavine, –

Literatura

1. J. Bridgwater, *Mixing and Segregation Mechanisms in Particle Flow*, u: A. Mehta (Ur.), *Granulation Matter*, Springer New York, 1994., str. 161–193, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4290-1_6.
2. J. Bridgwater, *Fundamental powder mixing mechanisms*, *Powder Technol.* **15** (1976) 215–236, doi: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(76\)80051-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(76)80051-4).
3. J. Williams, *Mixing and Segregation in Powders*, u: M. J. Rhodes (Ur.), *Principles of Powders Technology*, Wiley, 1990., str. 71–90.
4. M. J. Rhodes, *Introduction to Particle Technology*, Wiley, 2008., doi: <https://doi.org/10.1002/9780470727102>.
5. A. Alexander, F. J. Muzzio, T. Shinbrot, *Segregation patterns in V-blenders*, *Chem. Eng. Sci.* **58** (2003) 487–496, doi: [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00530-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00530-4).
6. A. Alexander, T. Shinbrot, B. Johnson, F. J. Muzzio, *V-blender segregation patterns for free-flowing materials: effects of blender capacity and fill level*, *Int. J. Pharm.* **269** (2004) 19–28, doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(03\)00296-5](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(03)00296-5).
7. A.-N. Huang, H.-P. Kuo, *Developments in the tools for the investigation of mixing in particulate systems – A review*, *Adv. Powder Technol.* **25** (2014) 163–173, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2013.10.007>.