

Matej Zadavec^{1,*}, Matjaž Hriberšek¹, Jure Ravnik¹

Ločevanje magnetnih delcev iz tekočine

POVZETEK

V številnih vejah znanosti je danes možno zaslediti uporabo nano in mikro delcev. V prispevku so obravnavani magnetni delci v tekočini pod vplivom sile neuniformnega magnetnega polja. Za obravnavo omenjenega problema je bila v sklopu računalniške dinamike tekočin uporabljena metoda robnih elementov. Uporabljene enačbe temeljijo na hitrostno vrtnični formulaciji Navier-Stokesovih enačb za izračun toka tekočine in Langrangeovega pristopa pri sledenju delcev. Obravnavana je enosmerna interakcija med tekočino in delci. Izpeljani numerični algoritem se uporabi pri študiju vpliva geometrije izločevalnega kanala, predvsem v notranjosti kanala nameščene pregrade, na samo učinkovitost izločevanja delcev. Umeščene trapezoidne pregrade v kanalu pravokotne oblike oblikujejo bifurkacije v samem kanalu, kar bi naj povečalo učinkovitost izločanja magnetnih delcev na stene kanala zaradi vpliva magnetnih in hidrodinamskih sil. Učinkovitost izločanja je bila določena za različne jakosti magnetnega polja in pretoke tekočine. Poleg analize vpliva pretočnih vrednosti in magnetnih sil je bila narejena tudi analiza vpliva velikosti pregrad. Rezultati so se primerjali z rezultati izločanja v ravnem kanalu brez pregrad. Rezultati analize kažejo na smiselnost uporabe manjših pregrad v primeru nizkih pretočnih hitrosti. V primeru višjih pretočnih hitrosti pa se je izkazalo izločanje delcev kot manj učinkovito v primerjavi z izločanjem v ravnem kanalu brez pregrad.

Ključne besede: sledenje delcev, računalniška dinamika tekočin, metoda robnih elementov, ločevanje pod vplivom magnetnega polja.

1. Uvod

V naravi zasledimo mnogo sistemov v katerih se pojavljajo suspenzije. Suspenzije so sestavljene iz osnovnega in suspendiranega medija, v večini primerov so to zmesi tekočine in trdnih delcev. Ločevalne naprave imajo nalogo iz suspenzije odstraniti trdne delce. Te naprave delujejo na principu izkoriščanja fizikalnih lastnosti delcev in jih ločujejo npr. na podlagi gravitacijskih sil (usedalniki), centrifugalnih sil (cikloni), in v primeru mikro in nano delcev na podlagi magnetnih sil.

Ločevalne naprave s pomočjo magnetnega polja (High Gradient Magnetic Separation devices-HGMS), ki so bili uporabljene v dosedanjih raziskavah [1-5], delujejo na principu ustvarjenega magnetnega polja s pomočjo dveh vodnikov. Uporaba takšnih sistemov je prisotna na številnih področjih znanosti v naravoslovju, medicini in tehniških ved. V biomedicini se na primer uporabljajo za magnetno separacijo zelenih celic in drugih bioloških enot [6-8]. Poleg tega se uporabljajo delci z magnetnimi lastnostmi, za dostavo terapevtskih drog na določena mesta v telesu [9]. Številni raziskovalci [10-12] so usmerili tudi svoje raziskave v sintezo delcev z ugodnimi magnetnimi lastnostmi in biološko združljivostjo.

V tem članku bo opravljena numerična simulacija ločevanja toka z vključenimi magnetnimi delci pod vplivom zunanjega magnetnega polja na primeru ravnega kanala z vstavljeno

pregrado. Uporabljena bo 3D numerična metoda, ki temelji na metodi robnih elementov za izračun tokovnega polja tekočine in Lagrangeovega pristopa za sledenje delcev [13]. Računski algoritem je bil razvit in preizkušen za sledenje delcev pod vplivom hidrodinamičnih in magnetnih sil. Rezultati so pokazali, da je razvit numerični algoritem primeren za reševanja toka razredčene suspenzije in gibanja delcev v magnetno statičnem polju v naprednih napravah za ločevanja delcev. Naprave za ločevanja delcev v obliki ravnega kanala je pokazala slabo učinkovitost izločanja v sredini kanala. To je posledica simetrične porazdelitve magnetnih sil po kanalu, kot tudi simetrični tokovnega polja v kanalu.

Prispevek predstavlja nadaljnji razvoj numeričnega algoritma in poglobljeni študiji spremenjene oblike ločevalnega kanala z vstavljenimi periodično ponavljajočimi se pregradami, ki tvorijo v samem kanalu bifurkacije. Cilj spremembe geometrije je ustvariti tokovne motnje in posledično učinkovitejše izločevanje namagnetnih delcev. Taka sprememba geometrije ravnega kanala je pred kratkim pridobila pozornost in je uporabljena v študiji, pretoka krvi v cevi z bifurkacijo [14].

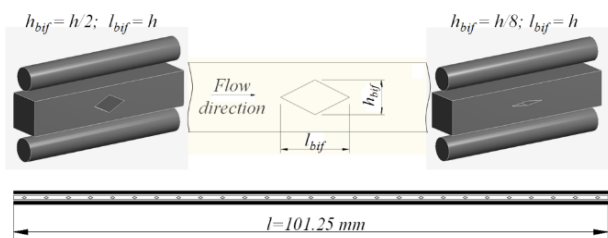
2. Opis problema

Za povečanje učinkovitosti izločevanja delcev (razmerje med številom magnetnih delcev, ki so se prilepili na stene in delci ki so vstopili v izločevalno napravo) iz toka suspenzije smo spremenili geometrijo ravnega kanala kvadratnega preseka [13] v obliko z vstavljenimi trapezoidnimi pregradami (slika 1).

¹ Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru

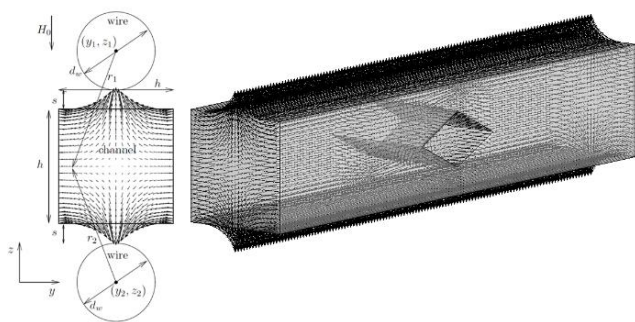
E-naslov: matej.zadavec@um.si; Tel.: +386-2-220-7783

* Avtor za korespondenco



Slika 1. Geometrija ločevalne naprave z vstavljenimi pregradami.

Kanal ima kvadratni prečni presek ($0,75 \times 0,75 \text{ mm}$) s pregradami dveh različnih višin: večja $h_{bif} = h/2 = 0,0325 \text{ mm}$ in manjša $h_{bif} = h/8 = 0,0125 \text{ mm}$. Dolžina pregrade je enaka višini kanala $l_{bif} = H$. Razdalja med pregradami je $\Delta l_{bif} = 4h = 3 \text{ mm}$. Magnetno polje je bilo generirano z dvema jeklenima žicama s premerom $0,5 \text{ mm}$, ki sta nameščeni na vrhu in na dnu kanala in izpostavljeni zunanemu homogenemu magnetnemu polju (slika 2). V toku tekočine vode pri temperaturi 20°C so bili razpršene polistirenske kroglice (Micromond Inc, Nemčija) s premerom $1,7 \mu\text{m}$. Magnetne polistirenske kroglice vsebujejo $12,45\%$ magnetita in $87,55\%$ polistirena [15].



Slika 2. Magnetno polje.

3. Numerični model

Simulacije so bile izvedene za različne pretoke suspenzije in različne gostote magnetnega polja, ki so bili izbrani na podlagi objavljenih prispevkov [13 in 15] s katerimi smo nato primerjali rezultate. Tok suspenzije je bil laminarni in pretok smo spreminjali od 27 ml/h do 162 ml/h . Ti pretoki ustrezajo povprečnim hitrostim od $u_0 = 1,35 \text{ cm/s}$ do $u_0 = 8 \text{ cm/s}$ in pripadajočim Reynoldsovim številom od vrednosti 10 do 59,36 (tabela 1). V suspenziji smo upoštevali skupno 10000 polistirenskih delcev.

Tabela 1. Podatki za različne hitrosti ter pripadajoče vrednosti brez dimenzijskih števil (Reynolds-ovo in Stokes-ovo število).

$u_0 [\text{cm/s}]$	Re	$St \cdot 10^{-6}$
8	59.36	26.1
5	37.1	16.3
2.5	18.55	8.15
1.35	10.0	4.4

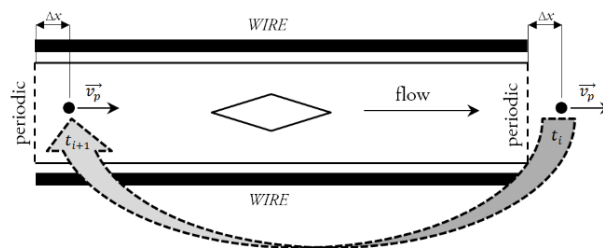
Gostoto magnetnega polja smo spreminjali v območju vrednosti od $0,04 \text{ T}$ do $0,62 \text{ T}$ (tabela 2). Suspenzija je bila obravnavana kot razredčena, zato smo zanemarili interakcije med delci.

Tabela 2. Podatki koeficient magnetne jakosti C_{pm} za različne vrednosti Re števila in gostote magnetnega polja B_0 .

Re	B_0			
	0.04 T	0.12 T	0.32 T	0.62 T
10	$6.75 \text{ E}+03$	$6.07 \text{ E}+04$	$4.32 \text{ E}+05$	$1.73 \text{ E}+06$
18.55	$1.97 \text{ E}+03$	$1.77 \text{ E}+04$	$1.26 \text{ E}+05$	$5.04 \text{ E}+05$
37.1	$4.92 \text{ E}+02$	$4.42 \text{ E}+03$	$3.15 \text{ E}+04$	$1.26 \text{ E}+05$
59.36	$1.92 \text{ E}+02$	$1.73 \text{ E}+03$	$1.23 \text{ E}+04$	$4.92 \text{ E}+04$

Na vstopu smo predpostavili popolnoma razvit tok in naključno razporeditev delcev po površini vstopa. Zaradi visokega razmerja med višino in dolžino kanala ($1:135$) bi bili računski časi precej dolgi in smo za reševanje tokovnega polja tekočine območje razdelili na 27 krajših odsekov (slika 1).

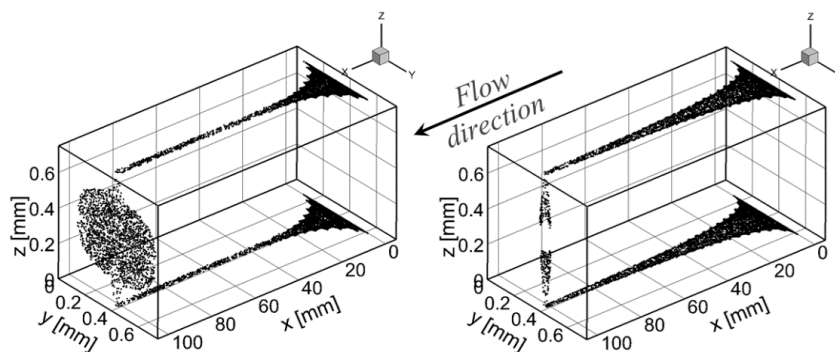
Segmenti so pozneje pri simulaciji obnašanja delcev združeni s pomočjo periodične robnega pogoja na vstopu in izstopu iz vsakega segmenta (slika 3). Računska mreža obravnavanega problema s pregradami je bila sestavljena iz heksaedrskih elementov in sicer $60 \times 12 \times 12$ elementov skupaj torej 186792 računskih vozlišč.



Slika 3. Periodični robni pogoji.

4. Rezultati

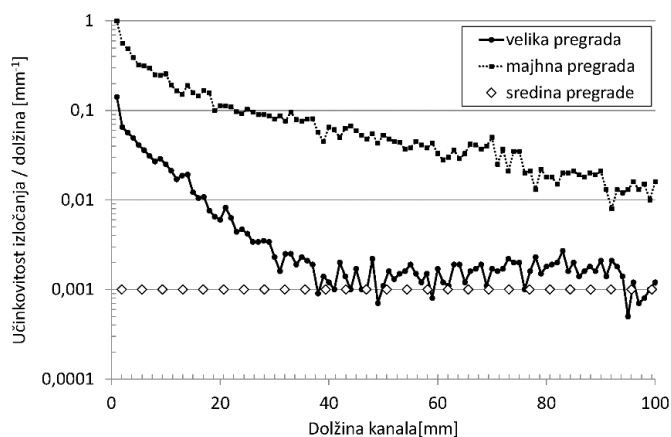
Iz končne porazdelitve izločenih delcev na stenah kanala za primera večje in manjše pregrade v kanalu (slika 4) lahko vidimo, da je učinkovitost izločanja na zgornji in spodnji steni precej večja v primeru manjše pregrade.



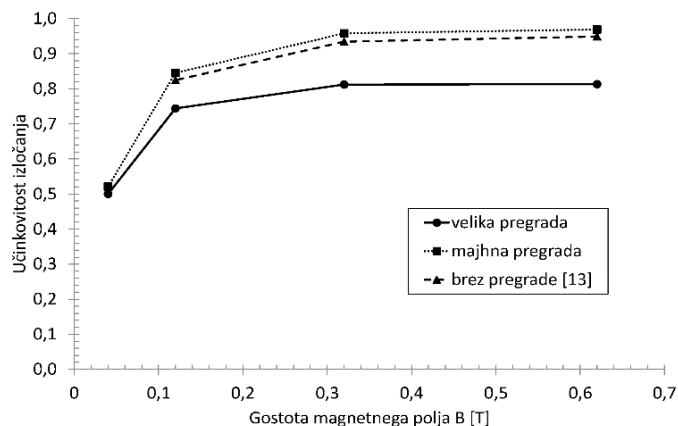
Slika 4. Končni položaj izločenih delcev v kanalu z vstavljenimi pregradami (levo-večja pregrada $h_{bif}=h/2$ in desno-manjša pregrada $h_{bif}=h/8$) za primer toka $Re=10$ in $B_0=0,62T$.

Ugotovimo lahko tudi koliko delcev se nam ne izloči na koncu kanala, kar ponovno kaže na slabšo učinkovitost izločanja geometrije z večjo pregrado v primerjavi z manjšo. Tako obnašanje sledi iz dejstva, da je motnja toka v primeru večje pregrade večja, kar vodi do močnejših hidrodinamičnih sil. To še posebej velja v razcepu kanala pri pregradi, kjer bi naj magnetne sile prevladale hidrodinamične sile toka. Učinek je izrazitejši v primeru manjše pregrade saj je le tam hitrost zaradi zožitve manjša.

Učinkovitost izločanja delcev ζ na razdalji x (po dolžini kanala) je prikazana na sliki 5 za oba geometrijska primera. Učinkovitost izločanja delcev ζ je definiran kot razmerje med številom magnetnih delcev, ki so se prilepili na stene in delci ki so vstopili v izločevalno napravo. Iz slike 5 izhaja, da je učinkovitost izločanja vzdolž kanala veliko višja v primeru manjše pregrade



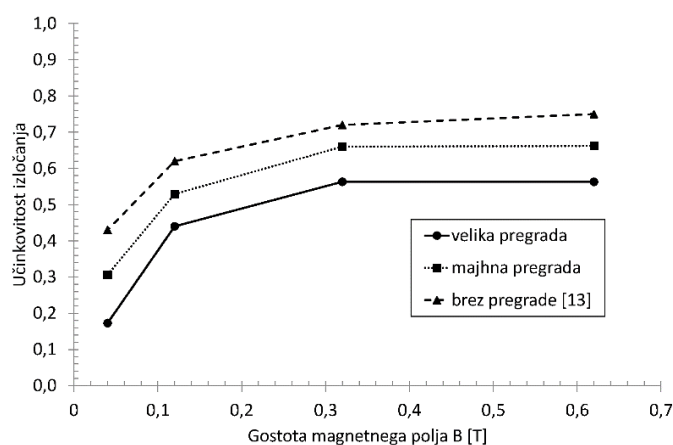
Slika 5. Učinkovitost izločanja delcev ζ na razdalji x (po dolžini kanala) za oba geometrijska primera (večja pregrada $h_{bif}=h/2$ in manjša pregrada $h_{bif}=h/8$) za primer toka $Re=10$ in $B_0=0,62T$.



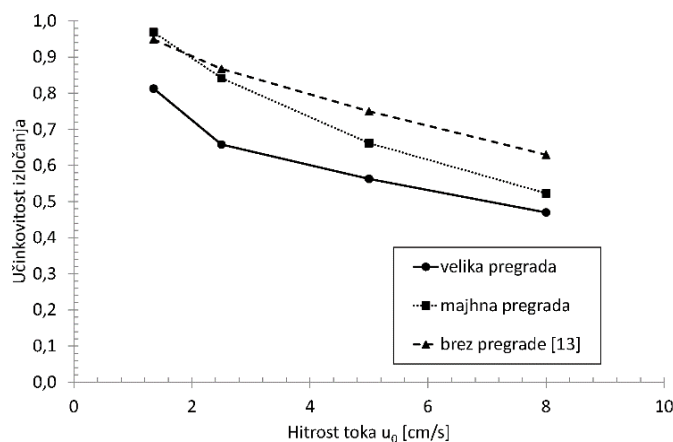
Slika 6. Učinkovitost izločanja delcev glede na gostoto magnetnega polja pri hitrosti toka $u_0=1,35m/s$ za oba geometrijska primera (večja $h_{bif}=h/2$ in manjša pregrada $h_{bif}=h/8$) in kanal brez pregrad [13].

Primerjava učinkovitosti izločanja obeh geometrijskih izvedb naprave s pregradama v kanalu v primerjavi z rezultati izločanja v ravnem kanalu [13] je prikazana na slikah 6 in 7 za različne gostote magnetnega polja in dve različni hitrosti toka $u_0=1,35\text{m/s}$ ($Re=10$) in $u_0=5\text{m/s}$ ($Re=37,1$). Pri manjšem pretoku $Re=10$ (slika 6) je tako učinkovitost izločanja največja v primeru geometrijske izvedbe z manjšo pregrado, medtem ko je v primeru višje hitrosti toka $Re=37,1$ (slika 7) najučinkovitejše izločanje v geometriji brez pregrad [13]. V vseh izračunanih primerih z različnimi hitrostmi toka so najnižje učinkovitost izločanja dosežene z geometrijsko izvedbo, kjer je vključena večja pregrada. Kot je bilo že navedeno, pride do

manjše učinkovitosti izločanja pri primeru z večjo pregrado zaradi lokalnega povečanja hitrosti toka nad in pod pregrado. Čeprav so delci izpostavljeni večjim Kelvinovim silam magnetnega polja je v tem območju zadrževalni čas delcev zaradi velikih hitrosti precej manjši, kar sledi že iz podatka o izredno majhnih vrednostih brez dimenzijskega Stokesovega števila delcev (tabela 1) in pomeni, da delci precej dobro sledijo tokovnemu polju. Učinkovitost izločanja je pri vseh simulacijah višja s povečevanjem gostote magnetnega polja in je omejena s točko nasičenja magnetnih lastnosti delcev [13], ki je za nerjavno jekleno žico in magnetne delce $B_0 > 0,3T$.



Slika 7. Učinkovitost izločanja delcev ζ glede na gostoto magnetnega polja pri hitrosti toka $u_0=5\text{m/s}$ za oba geometrijska primera (večja $h_{\text{bif}}=h/2$ in manjša pregrada $h_{\text{bif}}=h/8$) in kanal brez pregrad [13].



Slika 8. Učinkovitost izločanja delcev ζ glede na različne hitrosti toka in gostoto magnetnega polja $B_0=0,62T$ za oba geometrijska primera (večja $h_{\text{bif}}=h/2$ in manjša pregrada $h_{\text{bif}}=h/8$) in kanal brez pregrad [13].

Vpliv hitrosti na učinkovitost izločanja je prikazan na sliki 8 za vse geometrijske primere. Povečevanje hitrosti toka zmanjšuje učinkovitosti izločevanja pri vseh geometrijskih izvedbah izločevalne naprave. Iz teh rezultatov je razvidno, da je v primerih manjših hitrosti toka od 2m/s najučinkovitejša izločevalna naprava tista, ki ima vključeno manjšo pregrado.

5. Zaključki

S pomočjo 3D simulacij na osnovi metode robnih elementov smo preučevali vpliv geometrijskih lastnosti na učinkovitost izločanja magnetnih delcev v izločevalni napravi (HGMS). Izhajajoč iz prvotne oblike ravnega kanala [13], kjer je učinkovitost izločanja v območjih nizkih magnetnih sil v sredi kanala negativno vplivala na izločanje, je nova zasnova z vstavljenimi ponavljajočimi se trapeznimi pregradami v primeru manjših pregrad povečala učinkovitost izločanja. Rezultati izračunov kažejo, da povečanje velikosti pregrade ne izboljša učinkovitosti izločanja, kot je bila učinkovitost v kanalu brez pregrade. Izvedena raziskava kaže, da ima HGMS naprava s pregrado potencial zlasti v primeru bolj viskoznih tekočin, kjer so vrednosti brez dimenzijskega Reynoldsovega števila $Re < 10$.

Reference

1. T. Y. Ying, S. Yiacoumi, C. Tsouris, High-gradient magnetically seeded filtration, *Chem Eng Sci* 55 (2000) 1101–13.
2. G. D. Moeser, K. A. Roach, W. H. Green, T. A. Hatton, High-gradient magnetic separation of coated magnetic nanoparticles, *AIChE J* 50 (2004) 2835–48.
3. A. Ditsch, S. Lindenmann, P. E. Laibinis, D. Wang, T. A. Hatton, High-gradient magnetic separation of magnetic nanoclusters, *Ind Eng Chem Res* 44 (2005) 6824–36.
4. J. Svoboda, V. Ross, Particle capture in the matrix of a magnetic separator, *Int J Miner Process* 27 (1989) 75–94.
5. G. R., Macroscopic model of particles capture by the elliptic cross-section collector in magnetic separator, *J Magn Magn Mater* 272–276 (2004) 2348–9.
6. G. Hatch, R. Stelter, Magnetic design considerations for devices and particles used for biological high-gradient magnetic separation (HGMS) systems, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 225 (2001) 262–276.
7. H. Tsutsui, C.-M. Ho, Cell separation by non-inertial force fields in microfluidic systems, *Mechanics Research Communications* 36 (2009) 92–103.
8. T.-Y. Liu, S.-H. Hu, D.-M. Liu, S.-Y. Chen, I.-W. Chen, Biomedical nanoparticle carriers with combined thermal and magnetic responses, *Nano Today* 4 (1) (2009) 52 – 65.
9. H. Chen, M. Kaminski, X. Liu, Y. Xie, C. Mertz, M. Torno, et al, A novel human detoxification system based on nanoscale bioengineering and magnetic separation techniques., *Med Hypotheses* 68 (2007) 1071–9.
10. H. Singh, P. Laibinis, T. Hatton, Rigid, Superparamagnetic Chains of Permanently Linked Beads Coated with Magnetic Nanoparticles. Synthesis and Rotational Dynamics under Applied Magnetic Fields, *Langmuir* 21 (2005) 11500–11509.
11. H. Chiriac, A.-E. Moga, G. Iacob, O. C. Mungiu, Amorphous magnetic microspheres for biomedical applications, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 293 (1) (2005) 28 – 32.
12. B. D. Plouffe, D. K. Nagesha, R. S. DiPietro, S. Sridhar, D. Heiman, S. K. Murthy, L. H. Lewis, Thermomagnetic determination of fe₃o₄ magnetic nanoparticle diameters for biomedical applications, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 323 (17) (2011) 2310 – 2317.
13. J. Ravnik, M. Hriberšek, High gradient magnetic particle separation in viscous flows by 3D BEM, *Comput Mech* 51 (2013) 465–474.
14. X. Li, A. Popel, G. Karniadakis, Bloodplasma separation in y-shaped bifurcating microfluidic channels, *Physical Biology* 9 (2012) 1–12.
15. H. Chen, M. D. Kaminski, A. J. Rosengart, 2D modeling and preliminary in vitro investigation of a prototype high gradient magnetic separator for biomedical applications, *Medical Engineering and Physics* 30 (2008) 1–8.