

# Uzorkovanje suspendiranih čestica iz sustava čvrsto-kapljevito kroz stijenku uređaja

KUI – 15/2008  
Prispjelo 14. lipnja 2007.  
Prihvaćeno 24. rujna 2007.

N. Kuzmanić, E. M. Kessler i R. Stipišić

Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet,  
Zavod za kemijsko inženjerstvo,  
Teslina 10/V, 21 000 Split, Hrvatska

Problem uzorkovanja suspendiranih čvrstih čestica kroz stijenku uređaja, kao i njihovog kontinuiranog odvoda iz određenog sustava prisutan je u mnogim procesima kemijske i srodnih industrija. Uspješno vođenje i kontrola procesa sa suspendiranim česticama zahtijeva poznavanje koncentracije tih čestica, kao i njihove raspodjele veličina. Zbog svoje jednostavnosti i prilagodljivosti na uvjete odvijanja procesa uzorkovanje kroz stijenku veoma je zastupljeno u industrijskoj praksi. U ovom radu dan je osvrt na čimbenike koji mogu uzrokovati pogreške tijekom postupka uzorkovanja suspendiranih čestica iz sustava čvrsto/kapljevito i udaljiti nas od postupka tzv. idealnog uzorkovanja. Izokinetičko, odnosno i neizokinetičko uzorkovanje suspenzija iz cijevnih sustava vrlo je dobro proučeno, kako eksperimentalno tako i teorijski. Međutim, mnogo manje je istovjetnih istraživanja koja se odnose na uzorkovanja iz miješalica. Pogreške koje se javljaju pri ovom postupku usko su vezane uz tromost čvrstih čestica, sudare čvrstih čestica sa stijenkom uzorkovala te uz strukturu toka kapljevine ispred otvora uzorkovala. Može se zaključiti da učinkovitost uzorkovanja tj. masena koncentracija čvrstih čestica u uzorku nije funkcija isključivo srednje koncentracije čvrstih čestica u sustavu, već značajno ovisi i o fizikalnim karakteristikama sustava čvrsto-kapljevito, geometrijskim karakteristikama uzorkovala, poziciji uzorkovanja te brzini kojom se ono izvodi.

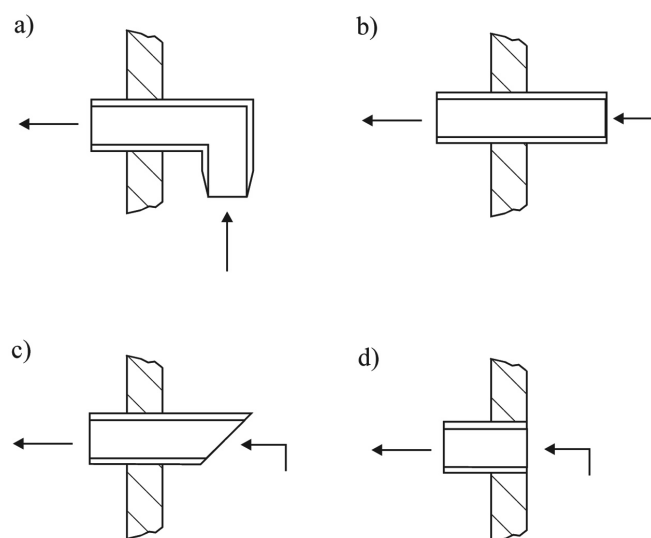
Ključne riječi: *Suspenzija, uzorkovanje kroz stijenku, uzorkovalo, brzina uzorkovanja, učinkovitost uzorkovanja, izokinetičko uzorkovanje*

Čvrste čestice suspendirane u kapljevitoj fazi zastupljene su u brojnim procesima kemijske i srodnih industrija. Uspješno vođenje tih procesa zahtijeva učestalija određivanja koncentracije, a potom i sastava, odnosno raspodjele veličina suspendiranih čestica. Postoji niz metoda pomoću kojih se može odrediti lokalna koncentracija suspendiranih čvrstih čestica u nekom reaktorskom sustavu.<sup>1,2</sup> Većina ih se zasniva na uporabi baždarni krivulje za određeno specifično svojstvo (npr. gustoću, električnu vodljivost, dielektričnu konstantu, apsorpciju elektromagnetskog zračenja i sl.), uz uvjet da se vrijednosti tog svojstva za pojedine faze znatno razlikuju. Međutim, ako je koncentracija čvrstih čestica u sustavu izrazito niska ili pak ne postoji značajnija razlika u vrijednostima navedenih specifičnih svojstava između dviju faza, te metode se ne mogu smatrati sasvim pouzdanima. Zbog tih nedostataka, ali ponajprije zbog svoje jednostavnosti i prilagodljivosti na specifičnosti izvjesnog procesa, metoda uzorkovanja suspendiranih čestica kroz stijenku uređaja veoma je zastupljena u industrijskoj praksi. Upotrebljavajući male otvore na stijenci uređaja te cijevi za uzorkovanje (tzv. uzorkovala) različitih oblika i dimenzija (slika 1), nastoji se što manje narušiti tok suspenzije u sustavu i dobiti reprezentativni uzorak.

Učinkovitost uzorkovala izražava se omjerom izmjerene i stvarne lokalne masene koncentracije čvrstih čestica u sustavu ( $\gamma/\gamma_0$ ). Taj omjer naziva se separacijskim koeficijentom<sup>3</sup> ili učestalije – učinkovitost uzorkovanja.<sup>4</sup> Međutim, u radovima koji se odnose na problem uzorkovanja opće prihvaćeno je da se taj koeficijent prikazuje kao omjer

izmjerene i srednje koncentracije čvrstih čestica u sustavu ( $\gamma/\gamma_0$ ).

Uzorkovanje suspendiranih čestica često je popraćeno neodgovarajućom izvedbom, što može dovesti do potpuno pogrešnih zaključaka o samom procesu. U ovom radu dat je osvrt na čimbenike koji mogu prouzrokovati te pogreške u



Slika 1 – Različiti oblici uzorkovala  
Fig. 1 – Sampling devices

sustavima čvrsto-kapljevito i udaljiti nas od postupka tzv. idealnog uzorkovanja. Oni su usko vezani s tromošću čvrstih čestica, zatim sudarima čvrstih čestica sa stijenkom uzorkovala te strukturom toka kapljevine ispred otvora uzorkovala.

### Tromost čvrstih čestica

Tromost čvrstih čestica smatra se glavnim izvorom pogreška pri uzorkovanju suspendiranih čestica. Ukoliko se u ispitivanom sustavu gustoće nazočnih faza izrazito razlikuju, tada se i tromost čvrstih čestica razlikuje od one koju posjeduje ekvivalentni obujam kapljevine. Čvrste čestice da bi bile uzorkovane, odnosno ušle u uzorkovalo, moraju promijeniti smjer gibanja. Zbog svoje tromosti one često nisu u stanju potpuno slijediti tok kapljevine, pogotovo ako dolazi do izraženijih promjena njenog smjera strujanja. Iz navedenog je shvatljivo da je vrlo bitno sagledati kako oblik, odnosno dimenzije uzorkovala, kao i brzina uzorkovanja uvjetuju promjenu toka suspenzije u sustavu i kako čvrste čestice reagiraju na takve promjene.

Za ilustraciju ovog problema može poslužiti postupak uzorkovanja čvrstih čestica suspendiranih u kapljevini koja struji kroz cijevni sustav, upotrebljavajući pri tom uzorkovalo tipa L.<sup>5</sup> Stijenke uzorkovala veoma su tanke, dok se njegova os podudara s osi cijevi. U sustavu su prisutne čvrste čestice različitih dimenzija i različitih gustoća. U slučaju tzv. izokinetičkog uzorkovanja, kada je brzina uzorkovanja jednaka lokalnoj brzini kapljevine u sustavu, uzorkovalo ne ometa tok strujnica u njegovoj neposrednoj blizini. Koncentracija i raspodjela veličina čestica u uzorku odgovara onoj u masi osnovne kapljevine (slika 2a).

Pri neizokinetičkom uzorkovanju, kada je brzina uzorkovanja bitno različita od lokalne brzine suspenzije na mjestu uzorkovanja, ispred samog otvora uzorkovala dolazi do značajnijih deformacija strujnica kapljevine. Te deformacije ponajprije ovise o omjeru brzine uzorkovanja i lokalne brzine kapljevine ( $v_u/v_o$ ). Ako je taj odnos manji od 1, dolazi do divergencije strujnica ispred uzorkovala kao što je prikazano na slici 2b. Čestice s manjom tromošću slijedit će strujnice kapljevine, dok će se one s većom tromošću nastaviti gibati već ustaljenom pravocrtnom putanjom. Kao rezultat dobije se uzorak s većom koncentracijom, odnosno uzorak koji sadrži pretežno "grublje" čestice i čestice veće gustoće.

Suprotan učinak se postiže pri  $v_u/v_o > 1$ . U tom slučaju dolazi do konvergencije strujnica pred otvorom uzorkovala (slika 2c), a čestice i na tu promjenu reagiraju u skladu sa svojom tromošću. Čvrste čestice koje posjeduju manju tromost slijedit će strujnice fluida i ulaziti u uzorkovalo, za razliku od onih čija je tromost izraženija. Dobiveni uzorak karakterizirat će niža koncentracija i mnogo veći udjel "finijih" i lakših čestica.

Iz navedenog se može zaključiti da učinkovitost uzorkovanja bitno ovisi o (ne)izokinetičkim uvjetima uzorkovanja, kao i reagiranju čestica na devijacije strujnica neposredno ispred otvora uzorkovala.

Tromost čvrstih čestica može se postaviti u korelaciju s otporom kapljevine u kojoj su čestice suspendirane. Taj odnos je poznat kao bezdimenzijska značajka tromosti čestica, odnosno kao Barthova ili Stokesova značajka ( $B$ ):

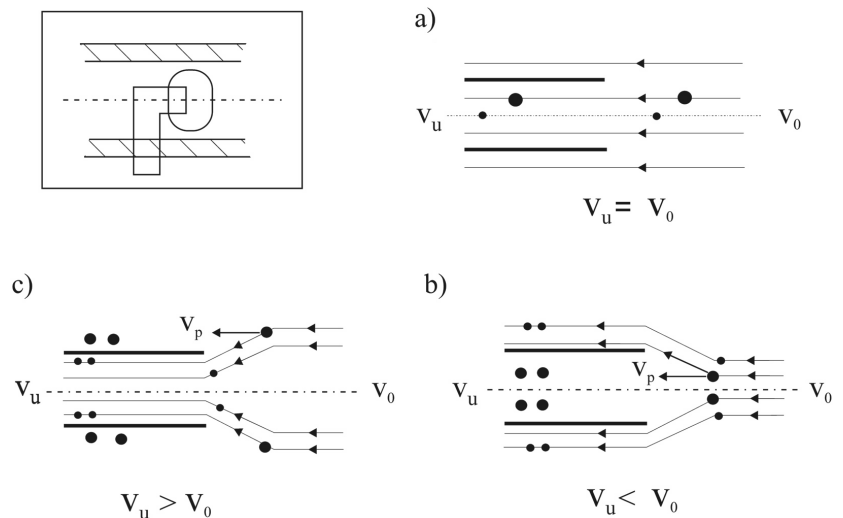
$$B = \frac{\rho_p d_p^2 v_o}{18 \mu_l R} \quad (1)$$

### Sudari čvrstih čestica sa stijenkom uzorkovala

Pojava koja također izaziva pogrešku pri uzorkovanju je sudaranje čestica sa stijenkom uzorkovala. Upotrijebljena uzorkovala mogu biti načinjena od različitog materijala tako da i debljina njihovih stijenki može bitno varirati. Ukoliko se pri uzorkovanju upotrebljava uzorkovalo izrazito debelih stijenki, čestice, umjesto da uđu u otvor, mogu se sudariti sa stijenkom uz otvor uzorkovala. Pri tom sudaru one gube dio svoje energije i tako lakše bivaju zahvaćene usisnim tokom, tj. tokom koji ulazi u uzorkovalo. Kao posljedica dobije se uzorak s većom koncentracijom čvrstih čestica, bez obzira što se uzorkovanje odvija pri izokinetičkim uvjetima.<sup>6-9</sup> Na slici 3 prikazan je utjecaj debljine stijenke uzorkovala na učinkovitost uzorkovanja suspendiranih čestica pijeska iz miješalice. Uočava se da učinkovitost uzorkovanja raste kako debljina stijenke raste te da je ta razlika posebno izražena pri većim brzinama uzorkovanja. Također je primjetno da se na ispitivanoj poziciji u miješalici, uz upotrebu veoma tanke stijenke uzorkovala, ne uspijeva dobiti reprezentativan uzorak i to u cijelom području vrijednosti omjera  $v_u/v_o$ , o čemu će u daljnjem dijelu teksta biti više riječi.

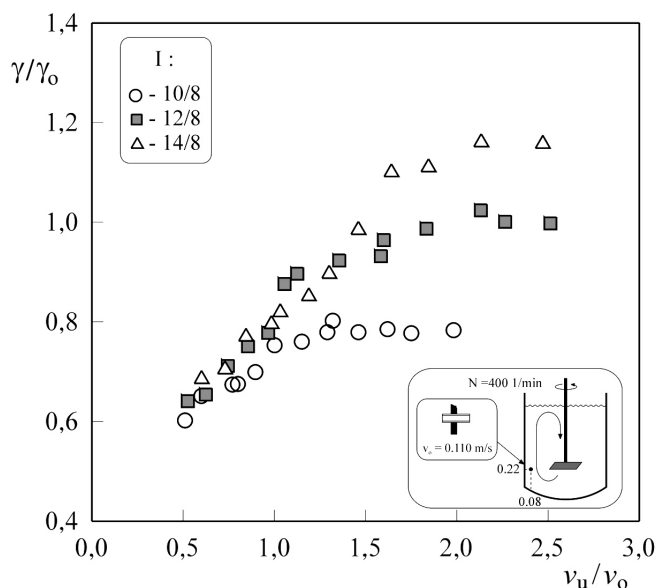
### Struktura toka kapljevine ispred otvora uzorkovala

Sljedeća pogreška koja se može javiti pri uzorkovanju nije povezana izravno s geometrijom uzorkovala, već s tokom kapljevine ispred otvora uzorkovala. Naime, ako je tok kapljevine na poziciji uzorkovanja izrazito trodimenzionalan, tada je veoma teško, gotovo nemoguće dobiti reprezentativan uzorak.<sup>10-13</sup> Tipičan primjer te pojave je tok kapljevine



Slika 2 – Izokinetičko i neizokinetičko uzorkovanje

Fig. 2 – Isokinetic and anisokinetic sampling



Slika 3 – Utjecaj debljine stijenke uzorkovala na učinkovitost uzorkovanja (pijesak;  $\gamma_0 = 50 \text{ kg m}^{-3}$ ;  $d_p = 106/177 \text{ }\mu\text{m}$ ;  $I = \text{promjer uzorkovala/promjer otvora uzorkovala}$ )

Fig. 3 – Effect of probe wall thickness on sampling efficiency (sand;  $\gamma_0 = 50 \text{ kg m}^{-3}$ ;  $d_p = 106/177 \text{ }\mu\text{m}$ ;  $I = \text{probe wall thickness}$ )

neposredno iza koljena u cijevnom sustavu. Zbog djelovanja centrifugalne sile i pada tlaka u tom dijelu cjevovoda dolazi do formiranja sekundarnih, trodimenzionalnih tokova. *Nasr-El-Din* i *Shook*<sup>14</sup> utvrđuju da je koncentracijski profil na toj poziciji ovisan o koncentraciji, ali i veličini suspendiranih čestica. Koncentracijska raspodjela je tu simetričnog oblika, s tim što je koncentracijski minimum u centru cijevnog voda, dok koncentracija postupno raste prema stijenka cijevi. Autori smatraju da je ta varijacija koncentracije posljedica djelovanja centrifugalne sile novonastalog sekundarnog toka. Slična situacija se događa i pri dnu posude za miješanje suspenzije. U toj zoni postoje značajni utjecaji dna i stijenke posude te razbijala virova na tok suspenzije. Zbog tih izrazitih trodimenzionalnih tokova veoma je teško uskladiti orijentaciju otvora uzorkovala sa smjerom vektora brzine kapljevine, pa stoga dobiti i odgovarajući uzorak.

Uzorkovanje kroz stijenke okomitih i horizontalnih cijevi izučeno je relativno dobro, kako eksperimentalno tako i teorijski.<sup>15–19</sup> Detaljnija eksperimentalna zapažanja koja se odnose na uzorkovanje čvrstih čestica iz sustava čvrsto-kapljevito kroz stijenku cijevnog sustava, kao i na pogreške koje se javljaju pri tom postupku iznio je u svom radu *Linoya*.<sup>20</sup> Upotrebljavajući uzorkovalo tipa L u vertikalnim cijevima, autor utvrđuje da je učinkovitost uzorkovanja funkcija značajke tromosti čestica,  $B$ , i omjera brzina  $v_u/v_0$ :

$$\frac{\gamma}{\gamma_0} = (0,03B + 0,33) \left( \frac{v_u}{v_0} - 1 \right) + 1 \quad (2)$$

Autor pretpostavlja uniformni koncentracijski profil čvrstih čestica kroz presjek cijevi, a iz navedenog izraza proizlazi da je djelotvornost uzorkovanja jednaka jedinici kada je i omjer  $v_u/v_0 = 1$ , i to za sve vrijednosti parametra  $B$ . Međutim, navedenim izrazom može se predvidjeti učinkovitost

uzorkovanja jedino ukoliko su stijenke uzorkovala izrazito tanke i koncentracija čvrstih čestica mala, odnosno ako se vrijednosti parametra  $B$  kreću u rasponu eksperimentalnih vrijednosti  $0,98 < B < 3,33$ .

*Nasr-El-Din* i suradnici<sup>21–24</sup> također, izučavajući postupke izokinetičkog i neizokinetičkog uzorkovanja čvrstih čestica kroz stijenku okomitih i horizontalnih cijevnih sustava, uočavaju značajan utjecaj geometrijskih karakteristika uzorkovala, kao i brzine uzorkovanja na učinkovitost postupka uzorkovanja. Zbog asimetričnog koncentracijskog profila čvrstih čestica u cijevi, autori uočavaju i znatnija odstupanja izmjerenih koncentracija zbog neadekvatne lociranosti uzorkovala. Upotrebljavajući uzorkovalo tankih stijenki tipa L u okomitim cijevima kroz koje struji suspenzija, reprezentativni uzorak čvrstih čestica moguće je dobiti pri omjeru  $v_u/v_0 = 1$ , dakle pri izokinetičkim uvjetima.

Provedeno je znatno manje istovjetnih ispitivanja koja se odnose na problem uzorkovanja suspendiranih čvrstih čestica kroz stijenku miješalica. Za razliku od cjevovoda, gdje je tok kapljevine relativno dobro definiran, u miješalicama je on znatno kompleksniji. Njegove karakteristike ovise ponajprije o geometriji primijenjenog miješala i posude u kojoj se miješanje odvija. Raspodjela suspendiranih čestica u miješalicama nije homogena, već postoji značajan aksijalni koncentracijski gradijent koji je funkcija fizikalnih karakteristika sustava i načina provođenja miješanja.<sup>25–31</sup> Veliki turbulentni vrtlozi prisutni u miješalici, kao i periodične komponente brzine uvjetovane djelovanjem lopatica miješala, uzrokuju poremećaje vrijednosti srednje brzine turbulentnog polja. Stoga je u takvim sustavima veoma teško definirati izokinetičke uvjete uzorkovanja te dobiti realan uzorak.<sup>32,33</sup>

*Rushton*,<sup>34</sup> radeći s miješalom koje razvija izrazito radijalan tok suspenzije u sustavu, ispituje utjecaj brzine uzorkovanja na koncentraciju uzorka upotrebljavajući ravna uzorkovala s ravnim završetkom. Reprezentativan uzorak moguće je dobiti pri izokinetičkim uvjetima, ali uzorkovalo mora biti pozicionirano u ravnini s radijalnim miješalom. Na taj način izbjegavaju se deformacije strujnica suspenzije prije njihovog ulaska u uzorkovalo. Izokinetička brzina može se odrediti uz primjenu izraza:

$$v_r = \frac{Bnd^2}{r} \quad (3)$$

gdje  $v_r$  predstavlja radijalnu brzinu toka fluida u miješalici uvjetovanu djelovanjem turbinskog miješala promjera  $d$ . Ta brzina može biti određena za bilo koju udaljenost  $r$  od centra miješala ili posude.  $B$  je konstanta ovisna o broju lopatica miješala, ali također i o omjeru promjera posude i miješala. Na osnovi eksperimentalnih podataka autor izvodi sljedeći izraz za separacijski koeficijent:

$$\frac{\gamma}{\gamma_0} = k \left( \frac{v_u}{v_0} \right)^a \quad (4)$$

gdje eksponent  $a$ , za omjer brzina  $v_u/v_0 < 1$ , iznosi  $-0,14$ , dok u slučaju omjera brzina  $v_u/v_0 > 1$  on poprima vrijednost  $-0,087$ . Jednadžba (4) je primjenljiva za navedene uvjete, s tim da uzorkovalo mora biti dugo  $1/40$  promjera posude za miješanje. U tom slučaju koeficijent  $k$  poprima vrijednost 1.

Do sličnih zaključka, radeći također s radijalnim tipovima miješala, dolaze *Rehakova* i *Novosad*<sup>3</sup> te *Sharma* i *Das*.<sup>35</sup> Prihvatajući osnovne postavke prethodno navedenog rada, uočavaju da učinkovitost uzorkovanja znatno ovisi i o promjeru uzorkovala te fizikalnim karakteristikama suspenzije.

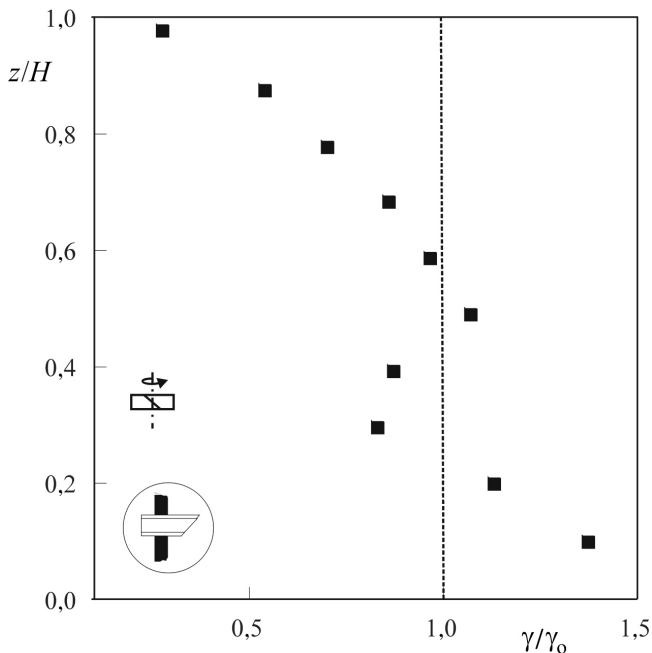
Međutim, ukoliko se upotrebljava miješalo koje u sustavu razvija aksijalni tok, što je mnogo češći slučaj pri suspendiranju čvrstih čestica, situacija postaje nešto kompleksnija. Poznato je da većina operacija sa suspendiranim česticama zahtijeva stanje potpune ( $n = n_{JS}$ ) ili intermedijalne suspenzije ( $n > n_{JS}$ ) kako bi se postigla maksimalna međupovršina između nazočnih faza te spriječila akumulacija čestica u određenim zonama reaktorskog sustava. Zbog spomenutog aksijalnog koncentracijskog gradijenta koji postoji pri tim uvjetima suspendiranja, u reaktoru postoje zone u kojima je koncentracija suspendiranih čestica veća od srednje vrijednosti, ali i zone u kojima je ona znatno niža.<sup>36–40</sup> Međutim, moraju postojati i područja, zavisno o geometriji sustava, gdje je koncentracija identična srednjoj koncentraciji (slika 4). Poznavanje tih zona tzv. pseudohomogenosti bitno je ukoliko se želi dobiti uzorak koji će dati informaciju o srednjoj koncentraciji čvrstih čestica u sustavu ili se želi utvrditi pravilna pozicija izlazne struje nekog kontinuiranog postrojenja.<sup>41</sup>

*Barresi*, *Kuzmanić* i *Baldi*,<sup>42</sup> izvedući laboratorijska istraživanja na aparaturi prikazanoj na slici 5, provode uzorkovanje sedimentirajućih čvrstih čestica monomodalnih i bimodalnih raspodjela veličina sedimentirajućih čvrstih čestica kroz stijenku miješalice. Njihovi eksperimentalni podaci ukazuju na to da učinkovitost uzorkovanja iz miješalica značajno ovisi o veličinama sadržanim u Stokesovoj značajci, kao i o geometrijskim karakteristikama primijenjenog

uzorkovala. Zbog kompleksne hidrodinamike u sustavu veoma je teško dobiti reprezentativan uzorak suspendiranih čestica iz miješalica. Variranje učinkovitosti uzorkovanja uočava se i pri različitim aksijalnim lokacijama uzorkovala na stijenci miješalice jer je ono znatno uvjetovano smjerom vektora brzine kapljevine, kao i koncentracijskim komponentama nazočnim u sustavu. Njihovi zaključci veoma se dobro slažu s onima koje u svom radu iznose *MacTaggart* i suradnici.<sup>43</sup>

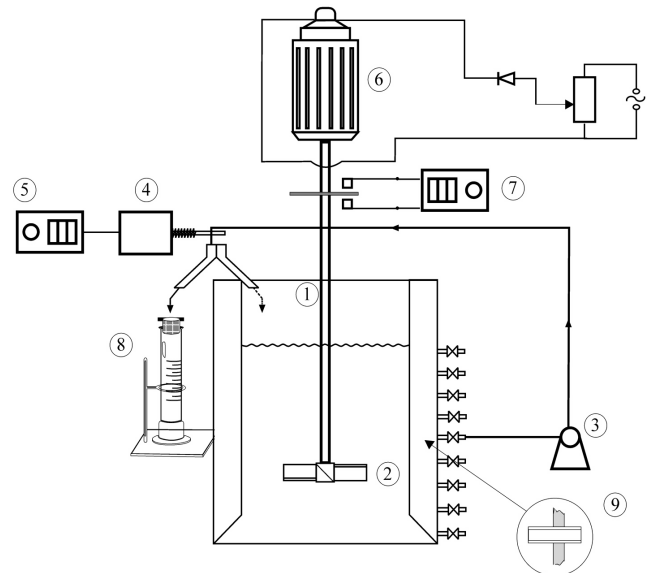
Specifičan slučaj je uzorkovanje tzv. suspendiranih plutajućih čestica iz miješalica. Naime, u većini industrijskih procesa suspendiraju se čvrste čestice čija je gustoća veća od gustoće kontinuirane faze s kojom su čvrste čestice u kontaktu. Međutim, postoje slučajevi kada čvrste čestice imaju gustoću nižu od one koju ima kontinuirana faza, što uvjetuje njihovo plutanje na površini kapljevine ( $\rho_p < \rho_l$ ). Od procesa miješanja tada se zahtijeva ugradnja tih plutajućih čestica u osnovnu masu kapljevine s ciljem što potpunije homogenizacije sustava. Ovakvi slučajevi često se susreću u praksi kod polimernih procesa, u farmaceutskoj industriji, zatim kod raznih fermentacija, tretiranja ruda, postupaka obrade taloga itd.<sup>44–48</sup>

Uočeno je da pri stanju potpune suspenzije,  $n = n_{JS}$ , učinkovitost uzorkovanja te vrste čestica ne prelazi vrijednost jedinice, kako pri izokinetičkim tako i neizokinetičkim uvjetima uzorkovanja.<sup>49–51</sup> To jasno upućuje na činjenicu da se u cijelom području ispitivanih brzina uzorkovanja ne uspijeva dobiti uzorak koncentracije jednak srednjoj koncentraciji u miješalici. Slični zaključci dobiveni su pri upotrebi različitih tipova uzorkovala. Uzorci dobiveni s uzorkovalom tipa L, koje je imalo veoma tanku stijenku, bili su najbliži očekivanim vrijednostima koncentracija čvrstih čestica



Slika 4 – Aksijalni koncentracijski profil i pseudohomogene zone u miješalici s aksijalnim tipom miješala (pijesak;  $\gamma_o = 25 \text{ kg m}^{-3}$ ;  $d_p = 425/500 \text{ }\mu\text{m}$ ;  $n = 1.2n_{JS}$ )

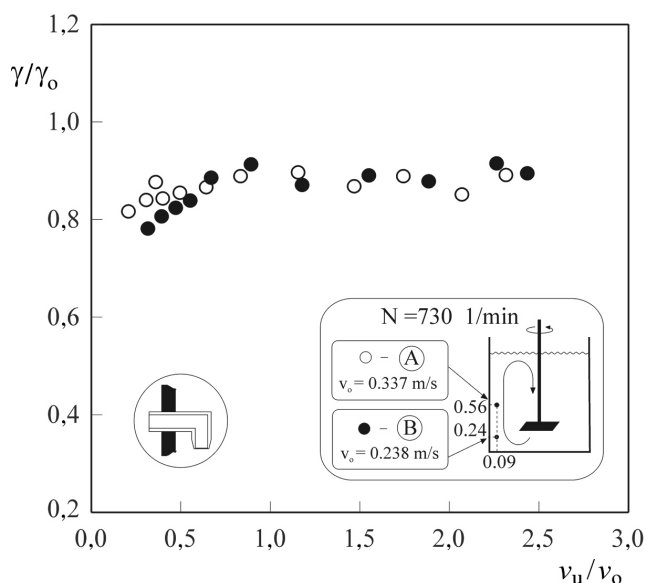
Fig. 4 – Axial concentration profile and areas of pseudohomogeneity in mixing tank with axial impeller (sand;  $\gamma_o = 25 \text{ kg m}^{-3}$ ;  $d_p = 425/500 \text{ }\mu\text{m}$ ;  $n = 1.2n_{JS}$ )



Slika 5 – Aparatura za provedbu suspendiranja čvrstih čestica u miješalici i njihovo uzorkovanje (1. posuda za miješanje; 2. miješalo; 3. pumpa; 4. solenoidni ventil; 5. mjerni uređaj; 6. elektromotor; 7. mjerni uređaj; 8. sito s menzurovom; 9. uzorkovalno miješalo)

Fig. 5 – Schematic diagram of experimental apparatus for solid suspension and wall sampling (1. vessel; 2. stirrer; 3. pump; 4. solenoid valve; 5. timer; 6. variable-speed motor; 7. optical tachometer; 8. sieve and measuring cylinder; 9. sampling probe)





Slika 6 – Učinkovitost uzorkovanja plutajućih čestica kao funkcija brzine uzorkovanja i aksijalne pozicije u miješalici (PEHD;  $\gamma_0 = 5 \text{ kg m}^{-3}$ ;  $d_p = 120/150 \text{ }\mu\text{m}$ )

Fig. 6 – Sampling efficiency for suspended floating solids as function of withdrawal velocity and different axial sampling positions (PEHD;  $\gamma_0 = 5 \text{ kg m}^{-3}$ ;  $d_p = 120/150 \text{ }\mu\text{m}$ )

u uzorku budući da je na mjestima gdje se vršilo uzorkovanje tok u posudi bio izrazito vertikalno (slika 6).

Razloge nedobivanja reprezentativnog uzorka moguće je potražiti u nestabilnim hidrodinamičkim uvjetima u miješalici i specifičnoj tromosti te vrste čestica. Zbog izrazite turbulencije u posudi za miješanje te periodičnog toka uvjetovanog djelovanjem lopatica miješala lokalne brzine kapljevine u miješalici mijenjaju veoma brzo i svoj smjer i svoj modul. Fluktuacijske brzine u jednom takvom turbulentnom sustavu su najvjerojatnije istog reda veličine kao i srednje brzine, što uvjetuje nepreciznu orijentaciju strujnica čvrstih plutajućih čestica u odnosu na vektore srednjih brzina kapljevine. Nadalje, postupak uzorkovanja otežava i specifično polje brzina kapljevine formirano u neposrednoj blizini uzorkovala, koje je uvjetovano oblikom upotrijebljenog uzorkovala. Navedenoj hidrodinamičkoj nestabilnosti tu se pridružuju i poremećaji zbog usisnog toka uzorkovanja. Naime, pri ulazu suspenzije u uzorkovalo dolazi do znatne redukcije inteziteta turbulencije. To rezultira djelomičnom sedimentacijom čvrstih čestica unutar uzorkovala, odnosno u sustavu za odvođenje čestica. Ta pojava dodatno uvjetuje niže vrijednosti koncentracije čvrstih čestica u uzorcima dobivenim postupkom uzorkovanja kroz stijenku miješalice. Reprezentativnom uzorkovanju u ovim sustavima može se približiti podešavanjem uvjeta odvijanja procesa i uzorkovanja (osiguranje znatno veće brzine miješanja suspenzije od one potrebne za stanje potpune suspenzije te izvođenjem uzorkovanja u pseudohomogenim zonama s uzorkovalima koja svojim oblikom najmanje remete tok suspenzije na mjestu uzorkovanja).

Zasigurno da podaci dobiveni postupkom uzorkovanja kroz stijenku miješalice mogu dati korisne informacije o prostornoj raspodjeli čvrstih čestica unutar miješalice u kojoj se provodi suspendiranje. Za matematičku interpretaciju te raspodjele može se uspješno primijeniti sedimentacijsko-disperzijski model:

$$v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial c}{\partial t} = D_p \left[ \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + v_x \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] + v_r \quad (5)$$

gdje su  $v$  brzine u pojedinim smjerovima,  $D_p$  koeficijent difuzije čvrste faze, a  $v_r$  brzina kemijske reakcije. Razvijajući model, autori<sup>52–55</sup> pretpostavljaju da čvrste čestice pri suspendiranju prolaze kroz područja u miješalici s izrazito različitim hidrodinamičkim uvjetima. Stoga se obujam posude dijeli na četiri specifične zone. Model se postavlja uz pretpostavku konstantne brzine padanja čestica u turbulentnim uvjetima u cijelom volumenu reaktora, kao i uz pretpostavku da su koeficijenti difuzije jednaki za čvrstu i kapljevitu fazu. Analogno navedenom modelu, Kuzmanić i Rušić<sup>56</sup> u svom radu razvijaju disperzijski model, ali za plutajuće čestice.

Iz navedenog se može zaključiti da učinkovitost uzorkovanja suspendiranih čestica iz sustava čvrsto-kapljevito, tj. koncentracija čvrstih čestica u uzorku ovisi o srednjoj koncentraciji čestica u sustavu, ali isto tako značajno ovisi i o fizikalnim karakteristikama sustava čvrsto-kapljevito, geometrijskim karakteristikama uzorkovala, poziciji uzorkovanja te brzini s kojom se ono izvodi. Sve navedeno upućuje na zaključak da metoda uzorkovanja kroz stijenku uređaja u praksi mora biti primjenjivana s izuzetnim oprezom.

## Popis simbola

### List of symbols

- |          |  |
|----------|--|
| $B$      | – značajka tromosti čestica, Stokesova značajka                                    |
|          | – particle inertia parameter, Stokes number  |
| $c$      | – množinska koncentracija, $\text{kmol m}^{-3}$                                    |
|          | – amount concentration, $\text{kmol m}^{-3}$                                       |
| $d$      | – promjer miješala, m  |
|          | – impeller diameter, m   |
| $d_p$    | – promjer čestica, m   |
|          | – particle diameter, m   |
| $H$      | – visina sloja kapljevine u miješalici, m  |
|          | – height of liquid in the vessel, m  |
| $l$      | – debljina stijenke uzorkovala (promjer uzorkovala/                                |
|          | promjer otvora uzorkovala), m  |
|          | – probe wall thickness, m  |
| $n$      | – brzina vrtnje miješala, $\text{s}^{-1}$ , $\text{min}^{-1}$                      |
|          | – impeller speed, $\text{s}^{-1}$ , $\text{min}^{-1}$                              |
| $n_{js}$ | – broj okretaja miješala pri stanju potpune  |
|          | suspenzije, $\text{s}^{-1}$ , $\text{min}^{-1}$                                    |
|          | – impeller speed at complete suspension state, $\text{s}^{-1}$ , $\text{min}^{-1}$ |
| $R$      | – unutarnji promjer uzorkovala, m  |
|          | – probe inside radius, m   |
| $r$      | – radijalna udaljenost od centra miješala, m                                       |
|          | – radial distance from centre of impeller, m                                       |
| $v_0$    | – lokalna brzina kapljevine, $\text{m s}^{-1}$                                     |
|          | – upstream local velocity or bulk velocity, $\text{m s}^{-1}$                      |
| $v_p$    | – lokalna brzina čestice, $\text{m s}^{-1}$  |
|          | – local particle velocity, $\text{m s}^{-1}$                                       |
| $v_r$    | – brzina kemijske reakcije, $\text{kmol m}^{-3} \text{ h}^{-1}$                    |
|          | – chemical reaction rate, $\text{kmol m}^{-3} \text{ h}^{-1}$                      |
| $v_r$    | – radijalna brzina toka kapljevine, $\text{m s}^{-1}$                              |
|          | – radial velocity of a stream flowing from a turbine, $\text{m s}^{-1}$            |

- $v_u$  – brzina uzorkovanja,  $m\ s^{-1}$   
– sampling velocity,  $m\ s^{-1}$
- $z$  – aksijalna pozicija u miješalici, m  
– axial position in the vessel, m

### Grčka slova

- $\gamma$  – masena koncentracija,  $kg\ m^{-3}$   
– mass concentration,  $kg\ m^{-3}$
- $\gamma^*$  – lokalna masena koncentracija,  $kg\ m^{-3}$   
– local mass concentration,  $kg\ m^{-3}$
- $\bar{\gamma}$  – srednja masena koncentracija,  $kg\ m^{-3}$   
– mean mass concentration,  $kg\ m^{-3}$
- $\mu_L$  – viskoznost kapljevine, Pa s  
– fluid viscosity, Pa s
- $\rho_L$  – gustoća kapljevine,  $kg\ m^{-3}$   
– liquid density,  $kg\ m^{-3}$
- $\rho_p$  – gustoća čvrstih čestica,  $kg\ m^{-3}$   
– particle density,  $kg\ m^{-3}$

### Literatura

#### References

1. R. C. Baker, *J. Hemp*, BHRA Fluid Eng. Ser. No 8 (1981) 3.
2. H. Nasr-El-Din, C. A. Shook, J. Colwell, *Int. J. Multiphase Flow* **13** (1987) 365.
3. M. Rehakova, Z. Novosad, *Coll. Czech. Chem. Commun.* **36** (1971) 3004.
4. N. A. Fuchs, *J. Atmos. Environ.* **9** (1975) 698.
5. H. Nasr-El-Din, *Sampling from Slurry Pipelines*, u: *Sewage and Wastewater Treatment*, Vol. 3, Gulf Publishing Co., Houston, 1989, str. 383–342.
6. H. Nasr-El-Din, C. A. Shook, *J. Pipelines* **5** (1985) 113.
7. S. P. Belyaev, L. M. Levin, *J. Aerosol Sci.* **3** (1972) 127.
8. H. Yoshida, K. Yamashita, H. Masuda, K. Iinoya, *J. Chem. Eng. Japan* **11** (1978) 48.
9. N. Kuzmanić, E. Mitrović-Kessler, XV. Skup hrvatskih kemičara i kemijskih inženjera, Opatija, 1997.
10. H. Ito, *JSME Int. J.* **30** (1987) 543.
11. Y. S. Cheng, C. S. Wang, *J. Atmos. Environ.* **15** (1981) 301.
12. M. Murakami, Y. Shimizu, H. Shiragami, *Bull. JSME* **12** (1969) 1369.
13. M. M. Enayet, M. M. Gibson, A. M. K. P. Taylor, M. Yianneskis, *Int. J. Heat Fluid Flow* **3** (1982) 213.
14. H. Nasr-El-Din, C. A. Shook, *J. Pipelines* **6** (1987) 239.
15. J. H. Rushton, J. Y. Hillestad, *American Petroleum Institute Paper No. 52–64* (1964) 517.
16. S. P. Belyaev, L. M. Levin, *J. Aerosol Sci.* **3** (1972) 127.
17. S. P. Belyaev, L. M. Levin, *J. Aerosol Sci.* **5** (1974) 325.
18. E. E. A. Rouillard, R. E. Hicks, *J. Air Poll. Control Assoc.* **28** (1978) 599.
19. H. Nasr-El-Din, C. A. Shook, *J. Pipelines* **5** (1986) 427.
20. K. Iinoya, *Kagaku Kogaku Ronbunshu* **34** (1970) 69.
21. H. Nasr-El-Din, C. A. Shook, M. N. Esmail, *Can. J. Chem. Eng.* **62** (1984) 179.
22. H. Nasr-El-Din, A. Afacan, J. H. Masliyah, *Chem. Eng. Commun.* **82** (1989) 203.
23. H. Nasr-El-Din, C. A. Shook, M. N. Esmail, *Can. J. Chem. Eng.* **63** (1985) 746.
24. H. Nasr-El-Din, A. Afacan, J. H. Masliyah, *Trans. I. Chem. E.* **69** Part A (1991) 374.
25. A. Barresi, G. Baldi, *Colloque Agitation Macanique*, Toulouse, 1986, str. 3–34.
26. P. A. Shamlou, E. Koutsakos, *Colloque Agitation Macanique*, Toulouse, 1986, str. 3–9.
27. A. H. Janse, *Nucleation and Crystal Growth in Batch Crystallizers*, WHTD 102, Technische Hogeschool, Delft, 1977, str. 155–191.
28. A. Barresi, R. Conti, M. Nocentini, *I. C. P.* **16** (1988) 45.
29. G. Baldi, A. Barresi, A. Brucato, L. Rizzuti, F. Magelli, M. Nocentini, G. Pasquali, *Proc. 2nd. Workshop on Multiphase Hydrodynamics in Industrial Plants*, Trieste, Italy, 1990, str. 453.
30. P. A. Shamlou, E. Koutsakos, *Chem. Eng. Sci.* **44** (3) (1989) 529.
31. P. Bilek, F. Rieger, *Coll. Czech. Chem. Commun.* **55** (1990) 2169.
32. A. A. Barresi, G. Baldi, *Chem. Eng. Sci.* **42** (1987) 2949.
33. A. A. Baressi, N. Kuzmanic, G. Baldi, *1st. Conf. Chem. Proc. Eng.*, Firenze, 1993, str.853.
34. J. H. Rushton, *A. I. Ch. E. Symp. Ser. No.* **10** (1965) 3.
35. R. N. Sharma, H. C. L. Das, *Collect. Czech. Chem. Commun.* **46** (1980) 329.
36. K. S. M. S. Raghav Rao, J. B. Joshi, *Chem. Eng. J.* **39** (1988) 111.
37. M. Bohnet, G. Niesmak, *Ger. Chem. Eng.* **3** (1980) 57.
38. N. Harnby, M. F. Edwards, A. W. Nienow, *Mixing in Process Industries*, Butterworths, London, 1997, p. 364–392.
39. E. L. Paul, V. A. Atiemo-Obeng, S. M. Kresta, "Handbook of Industrial Mixing", John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2004, str.177–182.
40. M. Zlokarnik, *Stirring*, Wiley – VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2001, str. 206–241.
41. G. Baldi, R. Conti, A. Gianetto, *AIChE J.* **27**(6) (1981) 1017.
42. A. Baressi, N. Kuzmanić, G. Baldi, 8th European Conference on Mixing, Cambridge, 1994. Ref. No. 20.
43. R. S. M. MacTaggart, H. A. Nasr-El-Din, J. H. Masliyah, *Chem. Eng. Sci.* **48** (5) (1993) 921.
44. G. E. H. Joosten, J. G. M. Schilder, A. M. Broere, *Trans. I. Chem. E.* **55** (1977) 220.
45. R. W. Thring, M. F. Edwards, *Ind. Eng. Chem. Res.* **29** (1990) 676.
46. G. O. Özcan-Taşkin, H. Wei, *Chem. Eng. Sci.* **58** (2003) 2011.
47. N. Kuzmanić, M. Akrap, A. Kovačević, *J. Chem. Eng. Japan* **39** (9) (2006) 932.
48. K. Takahashi, S. I. Sasaki, *J. Chem. Eng. Japan*, **32** (1999) 40.
49. N. Kuzmanić, *Rec. Prog. Gen. Proces.* **11** (52) (1997) 49.
50. N. Kuzmanić, E. Kessler, *Ind. Chem. Eng. Res.* **36** (1997) 5015.
51. N. Kuzmanić, *Doktorska disertacija*, Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet, 1996.
52. H. Yamazaki, K. Tojo, K. Miyanami, *Powder Technology* **48** (1986) 205.
53. H. Yamazaki, K. Tojo, K. Miyanami, *Powder Technology* **64** (1991) 199.
54. K. Tojo, K. Miyanami, *Ind. Eng. Chem. Fundam.* **21** (1982) 214.
55. D. Fajner, F. Magelli, M. Nocentini, G. Pasquali, *Chem. Eng. Res. Des.* **63** (1985) 235.
56. N. Kuzmanić, D. Rušić, *Ind. Chem. Eng. Res.* **38** (1999) 2794.

## SUMMARY

### Wall Sampling of Suspensions from Liquid-solid Systems

*N. Kuzmanić, E. M. Kessler, and R. Stipišić*

The problem of an adequate sampling from slurry handling equipment is present in many branches of the chemical and related industries. It is often very important to know the solid concentration and the particle size distribution in the apparatus of this kind, in order to control and operate them. For this purpose, wall sampling is widely adopted in industrial practice for its simplicity and versatility. Serious errors in measuring solids concentration can arise from unsuitable sampling. This work reports the main factors that may cause these deviations from ideal wall sampling during work with slurry handling equipment. Up to now, some authors have thoroughly studied the problem of isokinetic and anisokinetic sampling from slurry pipelines, both theoretically and experimentally. However, little work was dedicated to the withdrawal of solid suspensions from stirred vessels. The main sources of sampling errors occur because of particle inertia, particle bouncing effects and flow structure ahead of the sampling device. The results of experimental work of different authors indicate that the solid concentration in the sample, i. e. sampling efficiency, depends strongly on the sample tube design, withdrawal velocity and sampling device location as well.

*University of Split, Faculty of  
Chemistry and Chemical Technology,  
Teslina 10/IV, 21 000 Split, Croatia*

*Received June 14, 2007  
Accepted September 24, 2007*