

Vrijeme homogenizacije i utrošak snage miješanja pri suspendiranju plutajućih čestica u miješalici s dva turbinska mješala

KUI 24/2003
Prispjelo 16. svibnja 2003.
Prihvaćeno 4. lipnja 2003.

N. Kuzmanić* i R. Žanetić

Zavod za kemijsko inženjerstvo, Kemijsko-tehnološki fakultet Sveučilišta u Splitu,
Teslina 10/V, 21000 Split, Hrvatska

U radu je proveden postupak suspendiranja plutajućih čvrstih čestica u miješalici s dva turbinska mješala. Mješala s tri ravne lopatice pod nagibom od 30° stvarala su aksijalan tok suspenzije usmjeren prema dnu posude za miješanje (tzv. 3-PTD tip mješala). Sagledavao se utjecaj koncentracije plutajućih čestica (*PEHD* čestice) te utjecaj površinske napetosti na granici faza kapljevine/zrak na vrijeme homogenizacije sustava t_{m} , na brzinu vrtnje mješala potrebnog za postizanje stanja potpune suspenzije n_{JS} , kao i na utrošenu snagu miješanja po jedinici mase suspenzije $(P/m)_{\text{JS}}$. Također je ispitivana ovisnost navedenih veličina o promjeru upotrebljenih mješala, njihovoj udaljenosti od dna posude za miješanje, kao i o međusobnoj udaljenosti mješala. Vrijeme homogenizacije sustava određivano je konduktometrijskom metodom, dok se utrošak snage miješanja određivao mjerenjem sile zakretnog momenta.

Na osnovi dobivenih rezultata te provedenih usporedbi sa sustavom u kom se suspendiranje plutajućih čestica provodilo uz primjenu samo jednog mješala, zaključeno je da pridodavanje novog 3-PTD mješala na zajedničku osovinu ima pozitivan učinak na taj postupak. Pozitivan učinak ogleda se u smanjenju vrijednosti t_{m} , n_{JS} i $(P/m)_{\text{JS}}$.

Ključne riječi: Suspenzija, plutajuće čestice, miješanje, sustav s više turbinskih mješala, stanje potpune suspenzije, utrošak snage miješanja, vrijeme homogenizacije.

Uvod

Suspendiranje čvrstih čestica u kapljevitoj fazi sastavni je dio mnogih procesa u kemijskoj industriji. Taj postupak obično se primjenjuje kada se želi postići što ravnomjernija raspodjela čvrstih čestica u razmatranom reaktorskom sustavu, ubrzati kemijska reakcija te pospješiti postupak otapanja ili nastajanja određenog produkta. Dakle, čvrsta faza može biti prisutna u suspendiranom sastavu kao element koji ne sudjeluje izravno u reakciji (npr. katalitičke čestice), ali isto tako postoji cijeli niz procesa u kojima su čvrste čestice izravno podvrgnute određenim fizikalnim i/ili kemijskim promjenama.^{1–3}

Većina industrijskih procesa sa suspendiranim česticama odnosi se na sedimentirajuće čestice, odnosno čestice čija je gustoća znatno veća od gustoće kontinuirane faze. Međutim, u praksi postoje izvjesni slučajevi u kojima čvrste čestice koje je potrebno suspendirati imaju gustoću znatno nižu od one koju ima kontinuirana faza. Ta činjenica uvjetuje njihovo plutanje na površini kapljevine. Od procesa miješanja tada se zahtijeva "ugradnja" tih čestica u osnovnu masu kapljevine s ciljem što potpunije homogenizacije sustava. Taj, donekle specifičan slučaj suspendiranja susreće se u prehrambenoj, farmaceutskoj industriji, raznim

biotehnološkim procesima, postupcima obrade voda, ruda i sl. Bez obzira na njegovu neospornu važnost on je rijetko bio predmetom interesa znanstvenog izučavanja. Dostupni literaturni podaci o ovoj problematici vrlo su skromni,^{4–8} pogotovo ako se usporede s onima koji se odnose na sedimentirajuće čestice. Iz dosadašnjih ispitivanja utvrđeno je da se suspendiranje plutajućih čestica u miješalicama može odvijati pomoću dva izrazito različita mehanizma.^{9–11} Prvi se odnosi na sustave s tzv. klasičnim razbijalima virova, gdje je za suspendiranje primarno odgovoran intezitet turbulencije. Drugi mehanizam zastupljen je u miješalicama s tzv. parcijalnim razbijalima virova. U tom slučaju, zahvaljujući specifičnom obliku razbijala (obično je to samo jedno razbijalo nestandardne širine, djelomično uronjeno u kapljevinu) dolazi do stvaranja dubokog i uskog vira pogodnog za disperziju plutajućih čestica u kontinuiranu fazu.

Bez obzira na mehanizam, uređaji koji se upotrebljavaju pri suspendiranju plutajućih čestica moraju udovoljiti brojne zahtjeve. Tu se poglavito misli na postizanje stanja potpune suspenzije uz što nižu brzinu vrtnje mješala, na odgovarajuću brzinu reakcije ukoliko je ista zastupljena u sustavu te posebno na racionalan utrošak snage potrebne za miješanje, koji u ovakvim slučajevima može biti iznimno velik. Pravilan odabir konfiguracije reaktorskog sustava može bitno olakšati ovaj postupak. Odabir je usko povezan s hidrodinamičkim zbivanjima u sustavu i sa saznanjima o energetskim utrošcima. Vrijeme homogenizacije su-

*Kontakt osoba: Nenad Kuzmanić, Kemijsko-tehnološki fakultet, Zavod za kemijsko inženjerstvo, Teslina 10/V, 21000 Split, Hrvatska, Tel.: 021-385 633, Fax: 021-384 964, e-mail: kuzmanic@ktf-split.hr

stava, kao i utrošak snage miješanja veličine su koje mogu pružiti koristan uvid u učinkovitost primijenjene konfiguracije miješalice. Utrošena snaga čini energiju koja se u jedinici vremena dovodi suspendiranom sustavu pomoću mješala, dok vrijeme homogenizacije iskazuje vremenski interval potreban da se u sustavu u kom se provodi miješanje postigne željeni stupanj homogenosti.^{12,13}

Objavljeni radovi ukazuju na to da su se dosadašnja ispitivanja s plutajućim česticama uglavnom odnosila na provedbu suspendiranja u tzv. standardnim miješalicama. Stoga je u ovom radu sagledavana mogućnost provedbe istog postupka, ali uz uporabu dva mješala koja se istodobno nalaze na zajedničkoj osovini.

Eksperimentalni dio

Aparatura za provedbu eksperimenta prikazana je na slici 1. Suspendiranje se odvijalo u staklenoj posudi s ravnim dnom promjera $T = 0,32$ m. Posuda je sadržavala četiri razbijala virova standardnih dimenzija ($b = T/10$), čija su dna radi suzbijanja stvaranja tzv. "mrtvih zona" bila izvedena pod kutom od 45° .

Miješanje se provodilo uz uporabu dva turbinska mješala s tri ravne lopatice pod nagibom od 30° koja su u sustavu stvarala aksijalan tok kapljevine usmjeren prema dnu posude (tzv. 3-PTD tip mješala). Tijekom rada korištena su mješala različitog promjera ($D/T = 0,25-0,41$; $w = 0,19$ D). Njihova udaljenost od dna posude, kao i međusobna

udaljenost također su se mijenjale tijekom eksperimenta ($s/H = 0,25-0,41$; $h_1/H = 0,25-0,41$).

Ispitivana je suspenzija polietilenskih čestica osnovnih karakteristika prikazanih u tablici 1. Kao kontinuirana faza poslužila je vodovodna voda ($H = 1,2$ T; $\rho_{H_2O, 17^\circ C} = 996$ kg dm⁻³, $\mu_{H_2O, 17^\circ C} = 1 \cdot 10^{-3}$ Pa s).

Tablica 1 – Osnovne karakteristike suspendiranih plutajućih čestica

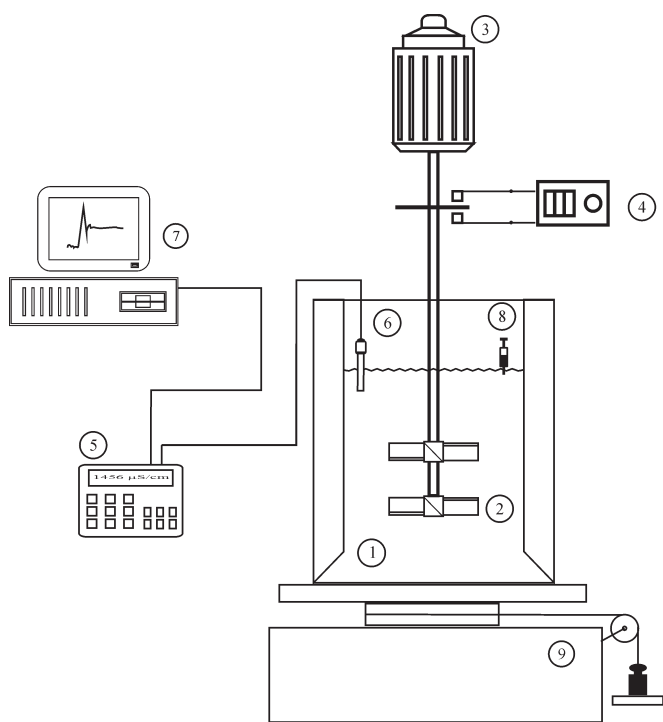
Table 1 – Properties of floating particles

	Polietilenske čestice (PEHD) Polyethylene particles (PEHD)
$d_p, \mu m$	350
$\rho_p, kg m^{-3}$	845
$\gamma, kg m^{-3}$	5–20

Vrijeme homogenizacije sustava određivano je konduktometrijskom metodom uz uporabu otopine NaCl ($c_{NaCl} = 2$ mol dm⁻³, $V = 10$ cm³) kao traser. Traser je u sustav injektiran kroz površinu kapljevite faze, s tim što je njegov optimalni obujam prethodno utvrđen preliminarnim ispitivanjima. Konduktometrijska ćelija serijski je bila povezana preko konduktometra tipa WTW-LF32T s računalom. Ta veza omogućavala je kontinuirani zapis promjena električne provodnosti u ispitivanom sustavu. Vrijednosti vremena homogenizacije prikazane u ovom radu iskazuju srednju vrijednost najmanje pet provedenih mjerenja. Početnom točkom određivanja uzeto je vrijeme uvođenja traseru u posudu. Završnom točkom smatrala se ona točka nakon koje nastupa stabilizacija konduktometrijskog signala, tj. točka nakon koje su sve izmjerene vrijednosti provodnosti u dogovorno postavljanim granicama $\pm 0,7$ % od srednje vrijednosti provodnosti stabilizacijskog dijela krivulje. Promjena provodnosti od $\pm 0,7$ % očituje variranje konačne koncentracije u sustavu od $\pm 2,2$ %.

Stanje potpune suspenzije plutajućih čestica, tj. minimalna brzina vrtnje mješala potrebna za postizanje tog stanja n_{JS} , određivana je Joostenovom vizualnom metodom. Joosten i suradnici¹⁴ definiraju stanje potpune suspenzije kao brzinu miješanja pri kojoj su i posljednje nakupine plutajućih čestica na površini kapljevine uklonjene, odnosno razbijene. S obzirom na subjektivnost metode svako određivanje vrijednosti n_{JS} obavljeno je minimalno pet puta, a potom je računata srednja vrijednost ispitivane veličine.

Utrošak snage miješanja određivan je mjerenjem sile zakretnog momenta. U rezultatima rada utrošena snaga prikazana je kao kvocijent snage i jedinične mase suspenzije koja se miješa. Masa suspenzije računata je kao umnožak obujma i njene gustoće. Potrebno je naglasiti da je u proračunu za vrijednost gustoće suspenzije uvrštena gustoća čiste kapljevite faze ($\rho_L = 996$ kg m⁻³). Naime, zbog poteškoća vezanih uz precizno određivanje gustoće nekog višefaznog sustava ta aproksimacija smatra se sasvim prihvatljivom, pogotovo kada je maseni udjel čvrstih čestica u sustavu relativno nizak (u ovom radu $w_p = 0,50-1,5$ %).¹⁵

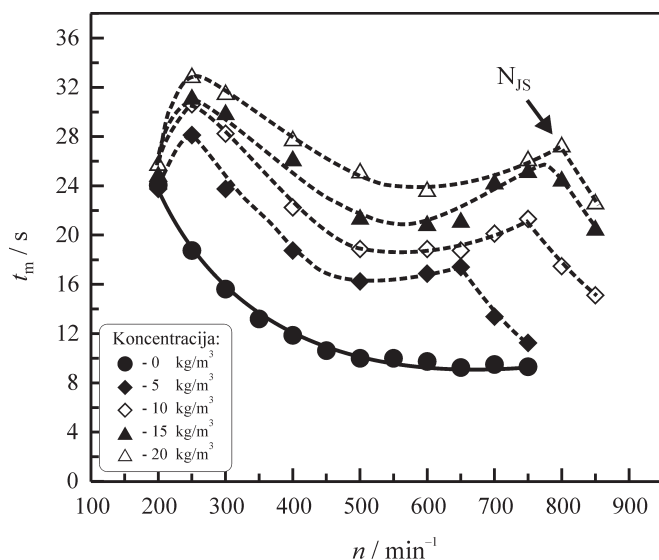


Slika 1 – Aparatura za provedbu eksperimenta: 1 posuda za miješanje; 2 mješala; 3 elektromotor; 4 sustav za regulaciju broja okretaja; 5 konduktometar; 6 konduktometrijska ćelija; 7 računalo; 8 sustav za injektiranje traseru; 9 sustav za mjerenje snage miješanja

Fig. 1 – Experimental set-up: 1 tank; 2 impellers; 3 variable speed motor; 4 tachometer; 5 conductivity meter; 6 conductivity probe; 7 PC; 8 injection system of tracer addition; 9 torque table

Rasprava

U prvom dijelu rada razmatran je utjecaj koncentracije plutajućih čestica na vrijeme homogenizacije t_m , vrijednost brzine vrtnje mješala potrebnog za postizanje stanja potpune suspenzije n_{JS} i na utrošenu snagu miješanja $(P/m)_{JS}$. Koncentracija čvrstih čestica u sustavu mijenjala se u području od $\gamma = 5 - 20 \text{ kg m}^{-3}$, dok je njihov srednji promjer iznosio $d_p = 350 \mu\text{m}$. Radi što potpunije analize ovog utjecaja preliminarna ispitivanja provedena su s čistom kapljevnom ($\gamma = 0 \text{ kg m}^{-3}$). Ti rezultati također su prikazani na slici 2.



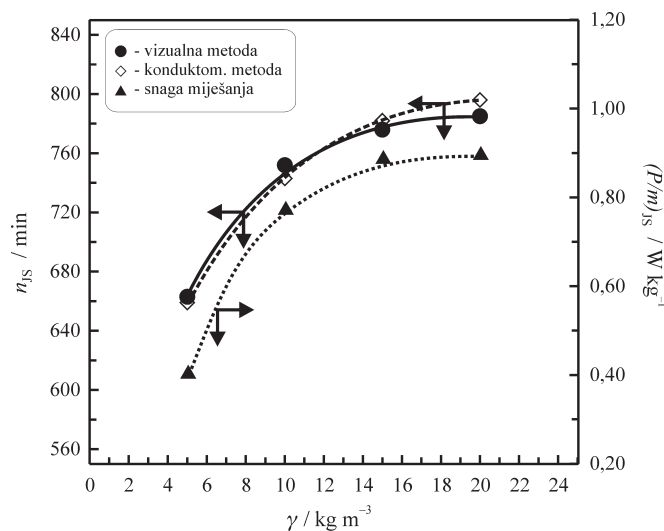
Slika 2 – Utjecaj koncentracije suspendiranih plutajućih čestica na vrijeme homogenizacije sustava; $d_p = 350 \mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $h_1/H = 0,25$; $s/H = 0,25$

Fig. 2 – Effect of floating solids concentration on mixing time; $d_p = 350 \mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $h_1/H = 0,25$; $s/H = 0,25$

U ispitivanom sustavu vrijeme homogenizacije čiste kapljevine smanjuje se eksponencijalno s povećanjem brzina vrtnje mješala, što je slučaj i pri uporabi drugih tipova mješala.^{16,17}

Premda je uobičajeni način prezentacije rezultata ovakvih analiza pomoću bezdimenzijskih značajki $nt_m - n_{Re}$, ovdje su isti prikazani odnosom $t_m - n$. Razlog je isključivo specifičan oblik krivulja koje se dobiva takvim prikazom. Iz slike 2 uviđa se da prisustvo plutajućih čestica u kapljevini znatno povećava vrijeme potrebno za homogenizaciju sustava. Pri određenim brzinama vrtnje mješala to povećanje iznosi i do $3 \cdot t_m(\gamma = 0)$. Naime, prisustvo plutajućih čestica u kapljevini smanjuje cirkulacijsku brzinu čiste kontinuirane faze, što uzrokuje povećanje vremena homogenizacije sustava. Krivulje dobivene pri radu sa suspenzijama karakteriziraju dva izražena vrha koja se pojavljuju pri različitim intenzitetima miješanja. Prvi od njih pojavljuje se u području relativno malih brzina vrtnje mješala, $n \approx 250 \text{ min}^{-1}$. Nastajanje tog prvog vrha posljedica je postupne ugradnje plutajućih čestica u osnovnu masu kapljevine. Ukoliko je intenzitet miješanja u sustavu slab, čestice se uglavnom zadržavaju na površini kapljevine stvarajući uz stijenku posude i u neposrednoj blizini razbijala virova izražene nakupine. Rezultati dobiveni pri $n = 200 \text{ min}^{-1}$, i to osobito pri nižim masenim koncentracijama čestica u sustavu ($\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$), ukazuju da izmjerene vrijednosti

vremena homogenizacije proizlaze od izmiješanosti samo čiste kapljevine. U tom slučaju vrijednosti t_m za čistu kapljevnu i suspenziju neznatno se razlikuju. Povećanjem intenziteta miješanja ugradnja plutajućih čestica u masu kapljevine postaje intenzivnija, što se izravno odražava na povećanje vrijednosti t_m sustava. To je dakle glavni razlog pojavljivanja prvog vrha na spomenutoj krivulji. Stoga se područje brzine vrtnje mješala $n = 200-250 \text{ min}^{-1}$ može definirati kao razdoblje početka ugradnje plutajućih čestica u osnovnu masu kapljevine. S daljnjim povećanjem brzine vrtnje, tj. pri $n = 250-500 \text{ min}^{-1}$, vrijednosti t_m suspenzije eksponencijalno se smanjuju s povećanjem brzine vrtnje mješala. Međutim, pri $n > 500 \text{ min}^{-1}$ dolazi do pojave novog vrha na krivulji $t_m - n$. Taj se vrh pojavljuje pri brzini vrtnje mješala koja je potrebna za uspostavu stanja potpune suspenzije plutajućih čestica, n_{JS} . Naime, u preliminarnim ispitivanjima ovog rada vrijednosti n_{JS} određivane su općeprihvaćenom vizualnom Joostenovom metodom. Uočena je veoma dobra podudarnost tih rezultata s brzinama vrtnje mješala pri kojima se pojavljuje drugi vrh na krivulji $t_m - n$ (slika 3). S obzirom na relativno mala odstupanja vrijednosti n_{JS} dobivenih tim dvjema metodama, ($\pm 2,5 \%$), metoda određivanja t_m u ovisnosti o broju okretaja mješala može se doista prihvatiti kao metoda s kojom je moguće određivanje stanja potpune suspenzije plutajućih čestica. Nakon tog drugog vrha, daljnjim povećanjem brzine vrtnje mješala ulazi se u područje stanja intermedijalne suspenzije. Stupanj homogenosti sustava povećava se, a vrijednosti t_m ponovno teže vrijednostima dobivenim čistom kapljevnom.



Slika 3 – Utjecaj koncentracije suspendiranih plutajućih čestica na vrijednosti n_{JS} i $(P/m)_{JS}$; $d_p = 350 \mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $h_1/H = 0,25$; $s/H = 0,25$

Fig. 3 – Effect of floating solid loading on n_{JS} and $(P/m)_{JS}$; $d_p = 350 \mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $h_1/H = 0,25$; $s/H = 0,25$

Rezultati ispitivanja ukazuju na to da se vrijednosti n_{JS} , kao i pripadajuće vrijednosti $(P/m)_{JS}$ povećavaju s povećanjem koncentracije plutajućih čestica (slika 3). Očito je da povećanje koncentracije čestica u sustavu zahtijeva veću srednju brzinu kapljevine u sustavu da bi se postiglo stanje potpune suspenzije čestica. To se potom odražava i na vrijednosti utrošene snage miješanja. Odnos navedenih veličina može se prikazati pomoću sljedećih relacija:

$$n_{JS} \propto \gamma^{0,12} \quad (\text{vizualna metoda}) \quad (1)$$

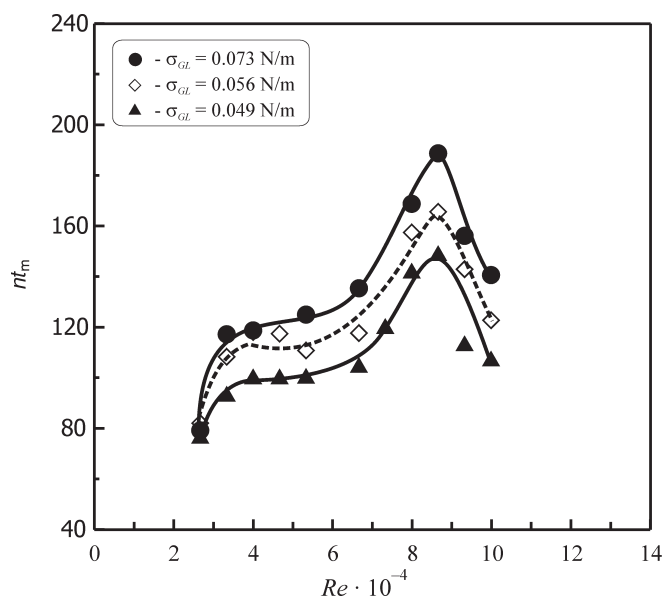
$$n_{JS} \propto \gamma^{0,14} \quad (\text{kondukt. metoda}). \quad (2)$$

Slične vrijednosti eksponenta u jednadžbama (1) i (2) ukazuju na veoma dobro slaganje vrijednosti n_{JS} dobivenih dvjema različitim metodama.

Navedeni rezultati nisu u potpunosti u skladu s rezultatima koje su u svojim radovima dobili *Thring* i suradnici.¹⁸ Ti autori, radeći s plutajućim česticama u standardnim miješalicama zaključuju da koncentracija plutajućih čestica nema utjecaja na vrijednosti n_{JS} . Međutim, ovim se radom utvrdilo da taj utjecaj ipak postoji. On nije tako naglašen kao kod sedimentirajućih čestica, ali je stvaran. Potvrda toj tvrdnji su i rezultati dobiveni konduktometrijskom metodom također prikazani na slici 3.

Površinska napetost na granici faza kapljevina/zrak također može utjecati na postupak suspendiranja plutajućih čestica. Ukoliko ista pospješuje kvašenost čestica, tada će potpomagati djelovanju turbulentnih vrtloga u nastojanju disperzije čestica u kapljevini. Međutim, postoji mogućnost da površinska napetost djeluje i potpuno suprotno. Zbog prevelike napetosti na granici faza kapljevina/zrak, turbulentni vrtlozi mogli bi biti onemogućeni u nastojanju "zahvaćanja" čestica. Stoga se u ovom radu prišlo sagledavanju njenog utjecaja kako na vrijeme homogenizacije tako i utrošak snage miješanja suspendiranog sustava. Vrijednosti površinske napetosti mijenjane su pridodavanjem određene količine propanola u ispitivani sustav. Mjerenja su obavljena pri tri različite vrijednosti σ_{GL} : $78,05 \cdot 10^{-3}$; $56,18 \cdot 10^{-3}$ i $49,30 \cdot 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$.

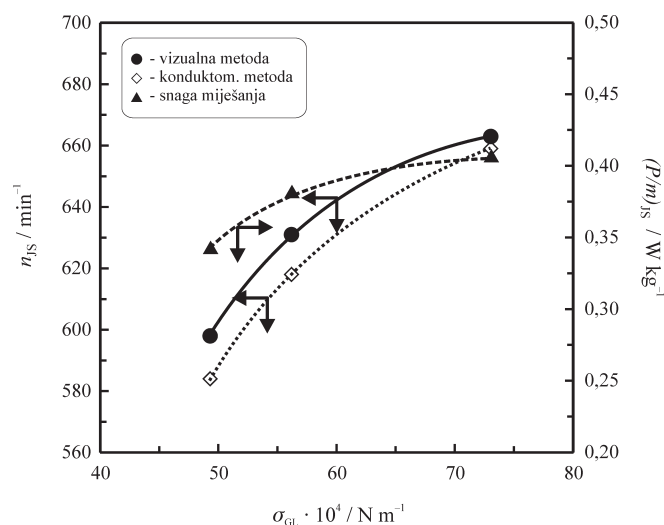
Uočeno je da su u ispitivanom području brzine vrtnje mješala vrijednosti t_m niže što su i vrijednosti površinske napetosti niže (slika 4). Sile koje djeluju na jedinicu duljine površine kapljevine tada su manjeg intenziteta, tako da



Slika 4 – Utjecaj površinske napetosti na granici faza kapljevina/zrak na vrijeme homogenizacije sustava; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $h_1/H = 0,25$; $s/H = 0,25$

Fig. 4 – Effect of surface tension at the liquid phase on the time of system homogenization; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $h_1/H = 0,25$; $s/H = 0,25$

turbulentni vrtlozi lakše zahvaćaju čestice s površine i unose ih u osnovnu masu kapljevine. Stoga je pri nižim vrijednostima σ_{GL} potrebno kraće vrijeme za postizanje zahtjevanog stupnja homogenosti ispitivanog sustava.



Slika 5 – Utjecaj površinske napetosti na granici faza kapljevina/zrak na vrijednosti n_{JS} i $(P/m)_{JS}$; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $h_1/H = 0,25$; $s/H = 0,25$

Fig. 5 – Effect of surface tension on n_{JS} and $(P/m)_{JS}$; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $h_1/H = 0,25$; $s/H = 0,25$

Iz slike 5 uviđa se da je i brzina vrtnje mješala, odnosno utrošak snage potreban za postizanje stanja potpune suspenzije također manji što su vrijednosti σ_{GL} niže. Odnos analiziranih veličina i površinske napetosti u ispitivanom sustavu je sljedeći:

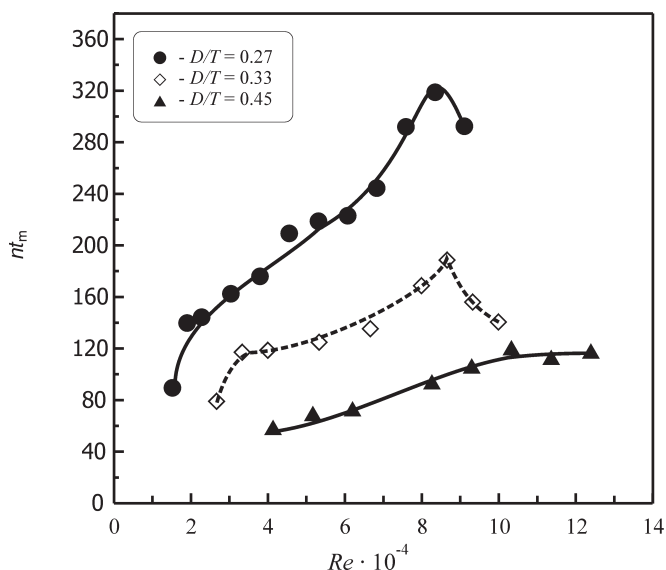
$$n_{JS} \propto \sigma_{GL}^{0,25} \quad (\text{vizualna metoda}) \quad (3)$$

$$n_{JS} \propto \sigma_{GL}^{0,29} \quad (\text{kondukt. metoda}). \quad (4)$$

I u ovom slučaju vrijednosti eksponenta su veoma slične, što potvrđuje tvrdnju o mogućnosti primjene t_m - n metode pri određivanju stanja potpune suspenzije plutajućih čestica.

Daljnja ispitivanja u radu izvedena su s ciljem određivanja optimalnih geometrijskih karakteristika primijenjenog tipa mješala pri provedbi suspendiranja plutajućih čestica.

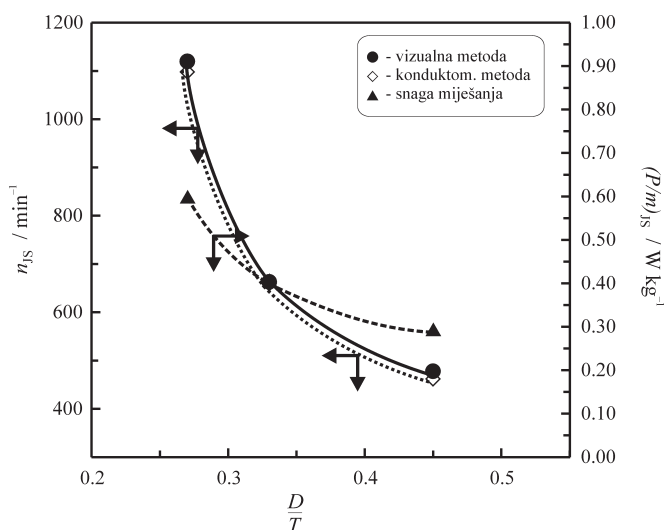
Tijekom eksperimenta primijenjena su četiri različita promjera mješala tipa 3-PTD ($D/T = 0,27$ – $0,45$). Udaljenost donjeg mješala od dna posude, kao i razmak između mješala održavani su konstantnim i iznosili su $h_1/H = 0,25$, odnosno $s/H = 0,25$. Rezultati ukazuju na to da s povećanjem promjera mješala vrijednosti bezdimenzijskog vremena homogenizacije nt_m smanjuju (slika 6). Najniže vrijednosti nt_m postižu se uz primjenu mješala najvećeg ispitivanog promjera $D = 0,132 \text{ m}$ ($D/T = 0,45$). Za postupak suspendiranja čvrstih čestica ponajprije je odgovorno makromjerilo turbulencije, odnosno primarni turbulentni vrtlozi. Makromjerilo turbulencije određeno je isključivo geometrijskim dimenzijama primijenjenih mješala.^{19,20} Što je mješalo veće, promjer primarnog vrtloga biva veći, a time i količina energije raspoložive za proces ugradnje čestica u osnovnu masu kapljevine. To je dakle, osnovni razlog



Slika 6 – Utjecaj veličine mješala na vrijeme homogenizacije sustava; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \mu\text{m}$, $h/H = 0,25$; $s/H = 0,25$

Fig. 6 – Effect of impeller diameter on dimensionless mixing time; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \mu\text{m}$, $h/H = 0,25$; $s/H = 0,25$

što su vrijednosti $t_{m,r}$ kao i n_{JS} niže primjenom mješala navedenog promjera.



Slika 7 – Utjecaj veličine mješala na vrijednosti n_{JS} i $(P/m)_{JS}$; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \mu\text{m}$, $h/H = 0,25$; $s/H = 0,25$

Fig. 7 – Effect of impeller diameter on n_{JS} and $(P/m)_{JS}$; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \mu\text{m}$, $h/H = 0,25$; $s/H = 0,25$

Na slici 7 prikazane ovisnosti vrijednosti n_{JS} o omjeru (D/T) mogu se izraziti kao:

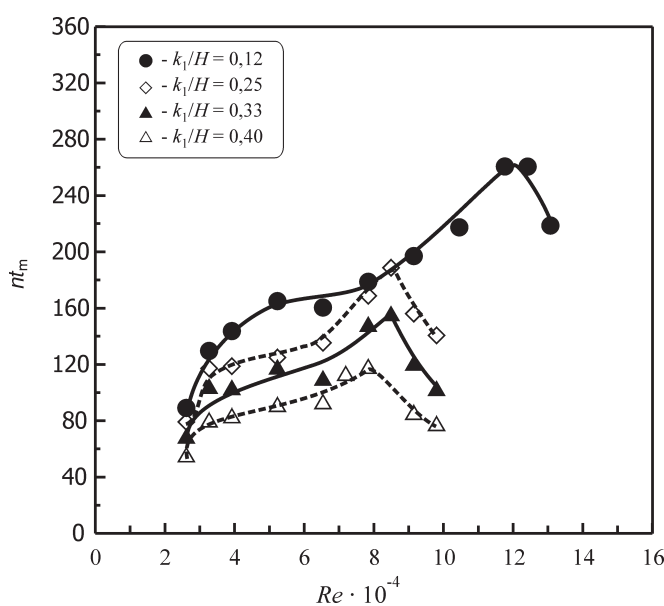
$$n_{JS} \propto (D/T)^{-1,61} \quad (\text{vizualna metoda}) \quad (5)$$

$$n_{JS} \propto (D/T)^{-1,65} \quad (\text{kondukt. metoda}). \quad (6)$$

Iz prikazanih rezultata također se uočava da se s povećanjem promjera mješala utrošak snage $(P/m)_{JS}$ smanjuje. U prvi tren takav zaključak može djelovati zbunjujuće jer je u suprotnosti s onim što se intuitivno očekuje imajući na

umu relaciju $P \propto \rho N^3 D^5$. Međutim, u ovom radu je utrošak snage isključivo određen za stanje potpune suspenzije, tj. pri n_{JS} . Kako se u sustavu s dva mješala s povećanjem promjera mješala vrijednosti n_{JS} izrazito smanjuju, štoviše za oko 3 puta, tako se i vrijednosti utroška snage smanjuju. Očito je da u ovom slučaju to smanjenje brzine vrtnje mješala nadvladava utjecaj učinka promjera mješala.

Lokacija korištenih mješala, tj. njihova udaljenost od dna posude također ima utjecaj na vrijednosti $t_{m,r}$, n_{JS} i $(P/m)_{JS}$. U radu je taj učinak proučavan uz uporabu dva 3-PTD mješala promjera $D = 0,106 \text{ m}$ ($D/T = 0,25$), čija je međusobna udaljenost uvijek bila konstantna ($s = 0,092 \text{ m}$; $s/H = 0,25$). Mijenjala se isključivo udaljenost prvog, tj. donjeg mješala od dna posude, i to u području h_1/H od 0,12 do 0,40.



Slika 8 – Utjecaj udaljenosti donjeg mješala od dna posude na vrijeme homogenizacije sustava; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $s/H = 0,25$

Fig. 8 – Effect of N_{Re} on nt_m for the different impeller clearances of lower impeller; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $s/H = 0,25$

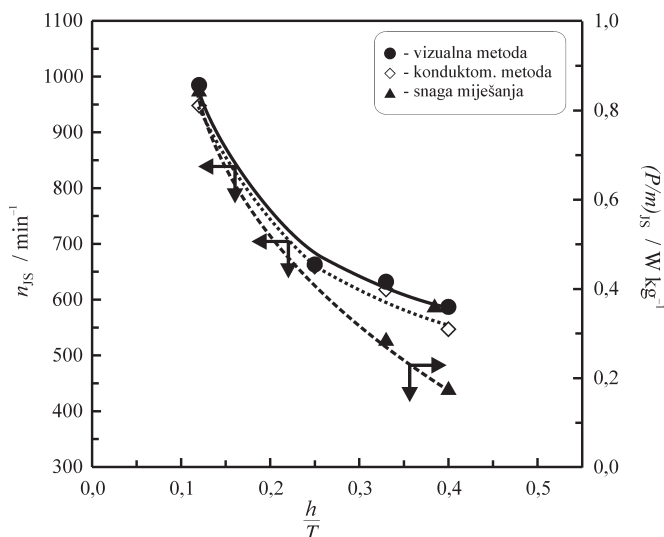
Slika 8 ukazuje da se s povećanjem vrijednosti h_1/H vrijeme homogenizacije u ispitivanom području intenziteta miješanja smanjuje. Najniže vrijednosti t_m dobivene su pri poziciji $h_1/H = 0,4$. Kako je međusobna udaljenost mješala bila konstantna s povećanjem udaljenosti prvog mješala od dna posude, drugo mješalo se približavalo površini kapljevine. Tako locirano, ono ima izrazit utjecaj na postupak ugradnje čvrstih čestica u kontinuiranu fazu, što se izravno odražava na smanjenje vrijednosti t_m i n_{JS} . Ovisnost vrijednosti n_{JS} ispitivanog sustava i omjera h_1/H može se izraziti kao:

$$n_{JS} \propto (h_1/T)^{-0,43} \quad (\text{vizualna metoda}) \quad (7)$$

$$n_{JS} \propto (h_1/T)^{-0,45} \quad (\text{kondukt. metoda}) \quad (8)$$

Iz slike 9 zapaža se da se vrijednosti $(P/m)_{JS}$ također smanjuju s povećanjem udaljenosti h_1/H .

U ovom slučaju dodatni razlog takvog ponašanja je pojava aeracije, tj. uvođenje zraka u masu kapljevine koja se zbi-



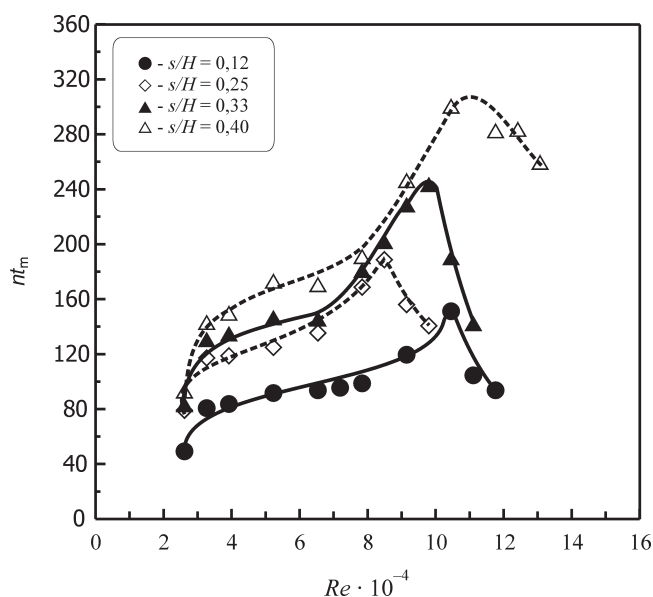
Slika 9 – Utjecaj c_1/H na vrijednosti n_{JS} i $(P/m)_{JS}$; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $s/H = 0,25$

Fig. 9 – Effect of c_1/H on n_{JS} and $(P/m)_{JS}$; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $s/H = 0,25$

va pri intenzivnijem miješanju sustava. Aeracija je izraženija što se mješalo nalazi bliže površini kapljevine. Uvođenjem zraka u suspenziju dolazi do formiranja kavitacijskih struktura, osobito u zoni oko gornjeg mješala, što se izravno odražava na utrošenu snagu miješanja.

Utjecaj međusobne udaljenosti mješala na vrijednosti t_m , n_{JS} i $(P/m)_{JS}$ prikazan je na slici 10. Ispitivanja su izvršena uz uporabu dva mješala promjera $D = 0,106 \text{ m}$ ($D/T = 0,35$) pri konstantnom omjeru $h_1/H = 0,25$.

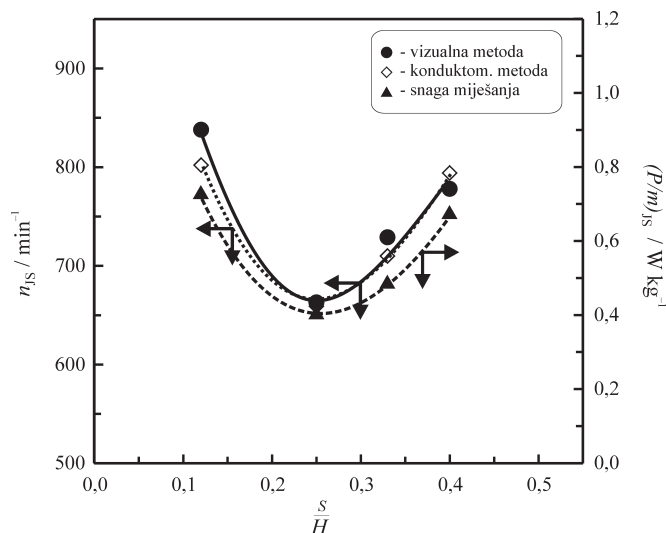
Povećanjem međusobne udaljenosti mješala vrijeme homogenizacije sustava se smanjuje. Najniže vrijednosti t_m postižu se pri razmaku mješala $s = 0,150 \text{ m}$ ($s/H = 0,4$).



Slika 10 – Utjecaj udaljenosti između dva mješala na vrijeme homogenizacije sustava; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $h_1/H = 0,25$

Fig. 10 – Effect of spacing between impeller on dimensionless mixing time; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $h_1/H = 0,25$

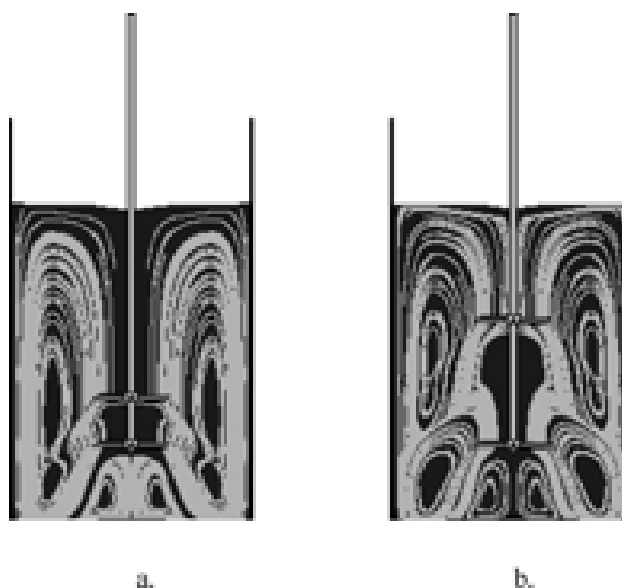
Međutim međusobna udaljenost mješala utječe i na vrijednosti n_{JS} , odnosno $(P/m)_{JS}$. Te ovisnosti su nešto specifičnije, što se zapaža na slici 11. Najniže vrijednosti postižu se pri $s/H = 0,25$, da bi daljnjim povećanjem razmaka ponovno došlo do povećanja njihovih vrijednosti.



Slika 11 – Utjecaj vrijednosti s/H na n_{JS} i $(P/m)_{JS}$; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $h_1/H = 0,25$

Fig. 11 – Effect of s/H on n_{JS} and $(P/m)_{JS}$; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $h_1/H = 0,25$

Vrijednost n_{JS} odnosno $(P/m)_{JS}$ očito su posljedica toka kapljevine u sustavu uzrokovanog specifičnim lociranjem mješala. Kao prilog ovoj tvrdnji izveden je detaljniji hidrodinamički opis razmatranog sustava primjenom programskog paketa *VisiMix 2000 Turbulent*. Navedeni paket omogućuje simulaciju toka kapljevine u razmatranom reaktorskom sustavu (slika 12). Ukoliko je razmak između mješala



Slika 12 – Utjecaj udaljenosti dvaju 3-PTD mješala na tok suspenzije u miješalici; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $h_1/H = 0,25$

Fig. 12 – Floating suspension flow patterns obtained in dual 3-PTD impeller stirred vessel at different spacing between impellers; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $h_1/H = 0,25$

relativno mali, npr. $s = 0,046$ m ($s/H = 0,12$), na slici 12a uočava se izrazito međudjelovanje tokova koje stvaraju pojedina mješala. Centar vrtloga toka donjeg mješala pomaknut je prema dnu posude, što je izravna posljedica djelovanja toka gornjeg 3-PTD mješala. Međutim, kako su oba mješala poprilično udaljena od površine na kojoj su locirane plutajuće čestice, primjetan je i slab utjecaj sveukupnog toka kapljevine na stanje površine. Povećavanjem razmaka mješala međutjecaj tokova postaje manje izražen. Centri obaju vrtloga nalaze se neposredno ispod razine horizontalnih osi mješala, a cijeli sustav ravnomjernije je izložen utjecajima osnovnog toka. Zato su analizirane veličine niže nego u prethodnom slučaju. Međutim, ako se međusobna udaljenost mješala i dalje povećava ($s/H > 0,25$), dolazi do stvaranja dva, gotovo nezavisna aksijalna toka. U zoni između mješala, neposredno uz osovinu, kao i u zoni ispod donjeg mješala zapažaju se i izražena područja slabije učinkovitosti operacije miješanja (slika 12b). Sve to rezultira suprotnim učinkom, tj. povećanjem vrijednosti n_{JS} i $(P/m)_{JS}$ u ispitivanom sustavu.

Na osnovi dobivenih rezultata određena je i konstanta vremena homogenizacije, k_m . Poznavajući tu konstantu moguće je provesti prosudbu vremena homogenizacije u sličnim sustavima koji pri suspendiranju plutajućih čestica rabe dva 3-PTD tipa mješala. Općenito, stupanj homogenosti nekog sustava definira se na sljedeći način:²¹

$$U(t) = 1 - e^{-k_m t_m}, \quad (9)$$

iz čega proizlazi i vrijeme homogenizacije:

$$t_m = \frac{-\ln(1 - U(t))}{k_m}. \quad (10)$$

S obzirom da je u ovom radu stupanj zahtijevane homogenosti iznosio 98 %, tj. 0,98, izraz (10) poprima oblik:

$$t_m = \frac{3,8}{L_m} \quad (11)$$

Pomoću eksperimentalnih podataka došlo se do spoznaje da je bezdimenzijska konstanta vremena homogenizacije funkcija sljedećih varijabli:

$$\frac{k_m}{n} = 0,046 \frac{(D/T)^{1,05} (T/H)^{0,5} (h_1/H)^{0,43}}{\gamma^{0,29} (s/H)^{0,51} \sigma_{GL}^{0,45}}. \quad (12)$$

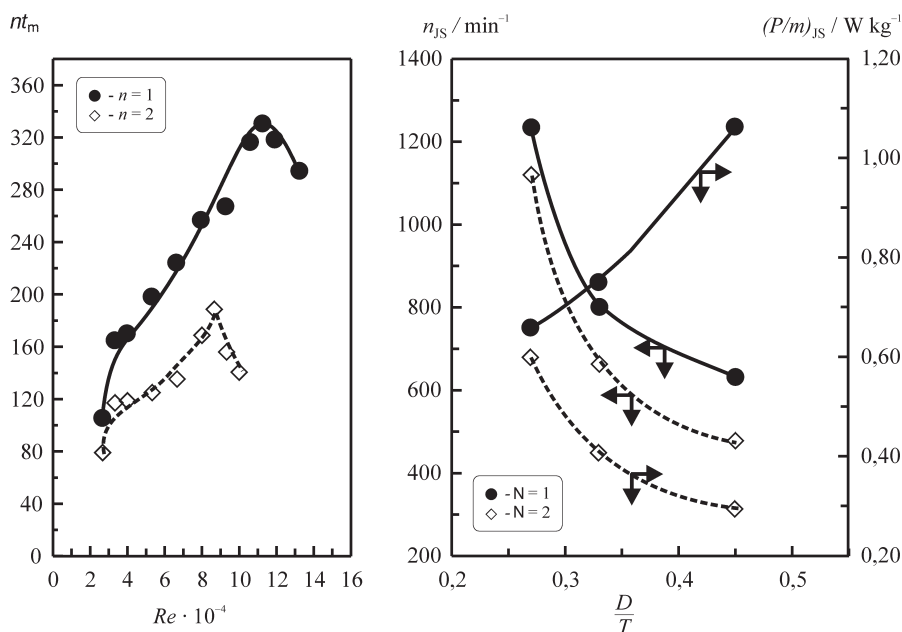
Navedena relacija pokazuje veoma dobro slaganje s eksperimentalnim podacima. Do izrazitijeg odstupanja dolazi jedino u području oko vrijednosti n_{JS} gdje to odstupanje iznosi oko 7–11 %.

Uspoređujući rezultate ovog rada s onima dobivenim pri suspendiranju plutajućih čestica uporabom miješajućeg sustava sa samo jednim 3-PTD mješalom, uočava se da se vrijednosti t_m , n_{JS} i $(P/m)_{JS}$ bitno smanjuju pridodavanjem drugog mješala na zajedničku osovinu. Svakako, iznos tog smanjenja usko je povezan s geometrijom, odnosno tipom primijenjenog mješala i njegovom dobavom. Sljedeća ispitivanja trebala bi biti usmjerena upravo na usporedbu, u ovom radu ispitivanog 3-PTD tipa mješala s drugim tipovima koji se uobičajavaju upotrebljavati pri suspendiranju čvrstih čestica.

Zaključci

Temeljem provedenih eksperimenata i dobivenih rezultata koji se odnose na postupak suspendiranja plutajućih čestica s dva 3-PTD mješala koja usmjeravaju tok suspenzije aksijalno prema dnu posude, mogu se donijeti sljedeći zaključci:

– Prisustvo plutajućih čestica u kapljevitoj fazi znatno povećava vrijeme homogenizacije sustava. To povećanje vre-



Slika 13 – Usporedba sustava s jednim i dva 3-PTD mješala pri suspendiranju plutajućih čestica; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \text{ }\mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $h_1/H = 0,25$; $s/H = 0,25$

Fig. 13 – Comparison between single and double 3-PTD impeller systems; $\gamma = 5 \text{ kg m}^{-3}$, $d_p = 350 \text{ }\mu\text{m}$, $D/T = 0,33$, $h_1/H = 0,25$; $s/H = 0,25$

mena homogenizacije suspenzije u odnosu na vrijeme homogenizacije čiste kapljevine iznosi i do $3t_{m(\gamma=0)}$.

– Vrijeme homogenizacije suspenzije povećava se s povećanjem koncentracije suspendiranih plutajućih čestica. Koncentracija čestica također ima utjecaj i na vrijednost brzine vrtnje mješala potrebnog za postizanje stanja potpune suspenzije n_{JS} i na utrošenu snagu miješanja po jedinici mase suspenzije pri tom stanju $(P/m)_{JS}$.

– Određivanje vremena homogenizacije u ovisnosti o brzini vrtnje mješala može se sugerirati kao metoda određivanja stanja potpune suspenzije plutajućih čestica.

– Promjer upotrebljenih aksijalnih mješala, njihova udaljenost od dna posude kao i međusobna udaljenost mješala čine bitne čimbenike pri odabiru optimalne konfiguracije miješalice za provedbu suspendiranja plutajućih čestica. Te veličine bitno utječu na vrijednosti t_m , n_{JS} i $(P/m)_{JS}$.

– Sagledavanjem vremena homogenizacije sustava pri raznim intenzitetima i uvjetima miješanja bezdimenzijska konstanta vremena homogenizacije ima sljedeći oblik:

$$\frac{k_m}{n} = 0,046 \frac{(D/T)^{1,05} (T/H)^{0,5} (h_1/H)^{0,43}}{\gamma^{0,29} (s/H)^{0,51} \sigma_{GL}^{0,45}}$$

– Na osnovi dobivenih rezultata može se zaključiti da pridodavanje novog mješala na zajedničku osovinu u miješalici u kojoj se provodi suspendiranje plutajućih čestica ima pozitivan učinak na taj postupak. Učinak se odražava u smanjenju vrijednosti vremena homogenizacije, brzine vrtnje mješala potrebne za postizanje stanja potpune suspenzije i u smanjenju utroška snage miješanja po jedinici mase suspenzije.

Popis simbola List of symbols

- b – širina razbijala virova, m
– širina razbijala virova, m
- γ – srednja masena koncentracija suspendiranih plutajućih čestica, kg m^{-3}
– solids concentration, kg m^{-3}
- h_1 – udaljenost donjeg mješala od dna posude za miješanje, m
– clearance from tank bottom of lower impeller, m
- d – promjer mješala, m
– agitator diameter, m
- d_p – promjer suspendiranih čestica, m
– particle diameter, m
- H – visina stupca kapljevine u posudi za miješanje, m
– height of liquid from bottom of vessel, m
- k_m – konstanta vremena homogenizacije, s^{-1}
– mixing-rate constant, s^{-1}
- m – masa suspenzije, kg
– suspension mass, kg
- N – broj mješala, –
– number of impellers, –
- n – brzina vrtnje mješala, min^{-1} ili s^{-1}
– impeller speed, rps or rpm

- n_{JS} – brzina vrtnje mješala pri stanju potpune suspenzije, min^{-1} ili s^{-1}
– impeller speed at just suspended conditions, rps or rpm
- nt_m – bezdimenzijsko vrijeme homogenizacije, –
– dimensionless mixing time, –
- Re – Reynoldsova značajka, $(= nd^2\rho/\mu)$, –
– Reynolds number, $(= nd^2\rho/\mu)$, –
- P – snaga miješanja, W
– impeller power draw, W
- $(P/m)_{JS}$ – snaga miješanja po jedinici mase suspenzije pri stanju potpune suspenzije, W kg^{-1}
– power consumption per unit mass at just suspended conditions, W kg^{-1}
- s – međusobna udaljenost mješala, m
– spacing between impellers, m
- T – promjer posude za miješanje, m
– vessel diameter, m
- t_m – vrijeme homogenizacije, s
– mixing time, s
- V – obujam traser, m^3
– volume of tracer, m^3
- w – širina krilaca mješala, m
– blade width, m
- μ_L – dinamička viskoznost kapljevine, Pas
– viscosity of liquid, Pas
- ρ_L – gustoća kapljevine, kg m^{-3}
– density of liquid, kg m^{-3}
- ρ_p – gustoća čestica, kg m^{-3}
– density of particle, kg m^{-3}
- w_p – maseni udjel čestica u suspenziji, %
– mass fraction of solid, %
- σ_{GL} – površinska napetost na granici faza kapljevina/zrak, N m^{-1}
– surface tension, N m^{-1}

Literatura References

1. N. Harnby, M. F. Edwards, A. W. Nienow, *Mixing in Process Industries*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1997, str. 364–392.
2. K. S. M. S. Raghav Rao, J. B. Joshi, *AIChE J.* **34**:8 (1988) 1332.
3. K. S. M. S. Raghav Rao, J. B. Joshi, *Chem. Eng. J.* **39** (1988) 111.
4. N. Kuzmanić, B. Ljubičić, *Chem. Eng. J.* **84** (2001) 325.
5. K. Takahashi, S. Sasaki, *J. Chem. Eng. Japan* **32**:1 (1999) 40.
6. N. Kuzmanić, D. Rusic, *Ind. Chem. Eng. Res.* **38** (1999) 2794.
7. N. Kuzmanić, E. Kessler, *Ind. Chem. Eng. Res.* **36** (1997) 5015.
8. D. I. Ellis, J. C. Godfrey, N. Majidian, *Inst. Chem. Eng. Symp. Ser. 108*, Bradford, UK, 1988, s. 181.
9. P. M. Armenante, J. P. Mmbaga, 7th Eur. Conf. on Mixing, Brugge, Belgium, 1991, s. 555.
10. R. R. Hemrajani, D. L. Smith, R. M. Koros, B. I. Tarmy, 6th Eur. Conf. on Mixing, Pavia, Italia, 1988., s. 259.
11. A. Bakker, J. J. Frijlink, *Chem. Eng. Res. Des.* **67** (1989) 208.
12. E. Ryzski, *Chem. Eng. J.* **31** (1985) 75.
13. S. Ruszkowski, 8th Eur. Conf. on Mixing, Cambridge, UK, 1994, s. 283.

14. G. E. H. Joosten, J. G. M. Schilder, A. M. Broere, *Trans. I. Chem. E.* **55** (1977) 220.
15. Harrop, K. L et al., *Recents Progres an Genie des Procedes* **11**:52 (1997) 41.
16. V. B. Rewatkar, J. B. Joshi, *Chem. Eng. Comm.* **102** (1991) 1.
17. M. Zlokarnik, *Stirring – Theory and Practice*, Wiley-VCH, Weinheim, 2001, str. 97–111.
18. R. W. Thring, M. F. Edwards, *Ind. Eng. Chem. Res.* **29** (1990) 676.
19. M. Hraste, *Mehaničke operacije – Inženjerstvo disperznih sustava*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1990, str. 129–134.
20. J. J. Ulbrecht, G. K. Patterson, *Mixing of Liquids by Mechanical Agitation*, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1985, str. 273–280.
21. J. B. Fasano, A. Bakker, R. Penney, *Chem. Eng. Aug.* **1994** 110.

SUMMARY

Determination of the Mixing Time and Power Consumption for Floating Solid-Liquid Dispersion in Mechanically Agitated Tank Provided with Multiple Impellers

N. Kuzmanić and R. Žanetić

In the process industry contact between solids and liquids is frequently obtained by the use of the mechanically agitated vessels. Today there is a considerable body of research activities on the suspension of solids heavier than the liquid medium. However, only a few studies have been reported on the complete drawdown of floating solids in liquid by agitation, although dispersion of floating particles is a process of significant industrial importance. The predominant motivation for the present work is to investigate capability of the agitated system provided with multiple impellers on the suspension of floating solid material in liquid.

Experiments were performed in cylindrical flat bottom vessel with internal diameter of 0.32 m. The tank was equipped with four baffles placed at 90° around the vessel periphery. The suspension of floating solids (PEHD particles) was stirred by two down-pumping three-pitched blade turbines (3-PTD type of impeller); ($D/T = 0.27–0.45$; blade angle – 30°). The influence of floating solids concentrations, surface tension, impeller diameter, off-bottom impeller clearance as well as the spacing between impellers on the mixing time, values of n_{JS} and $(P/m)_{JS}$ were examined in detail. Mixing time values were measured by conductivity measurements using a pulse technique, whereas, the power consumption was determined by the torque table. The critical impeller speed for the complete suspension of floating solid particles, n_{JS} , was determined using Joosten visual method. In this case the value of n_{JS} was defined as the speed at which all stagnant zones of floating solids at the liquid surface had just disappeared.

On the basis of the experimental results and observations, could be concluded that the application of the second 3-PTD impeller on the same shaft improves the performance of the agitation system for the process of floating solids suspension. It was observed that the presence of additional (second) impeller actually produced the reduction in the power consumption to achieve complete suspension of floating particles, in the minimum impeller speed for the complete suspension of floating solid particles, n_{JS} , as well as decrease of mixing time of system examined.

University of Split, Faculty of Chemical Technology,
Department of Chemical Engineering,
Tselina 10/V, 21000 Split, Croatia

Received May 16, 2003
Accepted June 4, 2003