

Modificirano diskasto mešalo z asimetričnimi lopaticami za dispergiranje velikih količin plina v fermentorju

Andrej BOMBAČ

Izvleček: V delu so predstavljene osnovne karakteristike mešala za dispergiranje velikih količin zraka pri fermentacijskem procesu. Radialno diskasto mešalo z asimetrično zapognjenimi lopaticami (ABT) je bilo razvito in patentirano kot zadnje v sklopu raziskave modificiranih mešal v Laboratoriju za dinamiko fluidov in termodinamiko (LFDT) na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani. Analiza osnovnih karakteristik mešala v modelni mešalni napravi standardne geometrijske konfiguracije zajema meritve (a) moči mešala pri mešanju kapljevine in pri dispergiranju zraka v vodi vse do nastanka in (b) nastanek poplavnega stanja in (c) čase pomešanja. Disipacija energije ABT-mešala je pri mešanju kapljevine v režimih delovanja industrijskih naprav zelo majhna, izraženo s številom moči $\sim 1,75$. Pri dispergiranju zraka v vodo mešalo pri istih vrtljajih ($Fr = 0,3$) ob zelo majhnem zmanjšanju moči ($<16\%$) dispergira bistveno večjo (53%) količino zraka kot standardno Rushtonovo mešalo in pri tem dosega tudi krajše čase pomešanja. Za primerjavo učinkovitosti tega mešala z drugimi mešali so v delu povzeti tudi izsledki iz naših predhodnih raziskav.

Ključne besede: mešanje, dispergiranje zraka, ABT diskasto mešalo z asimetričnimi lopaticami, moč mešanja, poplavno stanje, čas pomešanja

■ 1 Uvod

V farmacevtski industriji je pri ne-katerih izvedbah fermentacijskega procesa potrebno zagotoviti zelo velike količine zraka. Pri tem se za dispergiranje zraka najpogosteje uporabljajo vitki reaktorji z večstopenjskim mešalom^[1,12,13,14,15]. Takšno večstopenjsko mešalo lahko tvorijo enaka mešala, kot npr. večstopenjsko Rushtonovo mešalo^[1,4,12,13], ali pa kombinacija aksialnih in radialnih mešal^[14,15], ki v zadnjem času prevladujejo. Izbira primerne mešala je za dano geometrijsko konfiguracijo mešalne posode ključnega pomena za optimalno izvedbo tehnološkega procesa fermentacije: v fermentorju mora biti zagotovljeno ustrezno to-

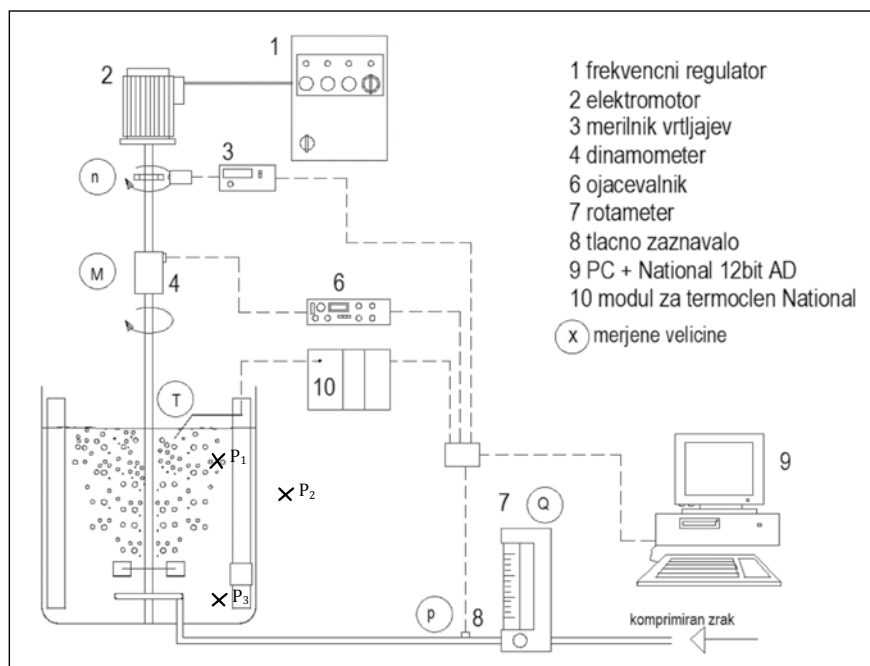
kovno polje, ki preskrbi organizme z zrakom po celotnem volumnu kapljevine. Vsaka zastojna (mrtva) cona lahko povzroči odmiranje kultur ali pa napačne produkte fermentacije. Večstopenjsko mešalo ustrezne konfiguracije tako zagotavlja ustrezno cirkulacijo snovi v fermentorju in s tem čim bolj enakomerno porazdelitev plinaste faze po volumnu kapljevine, kar predstavlja ustrezen hidrodinamski režim. Za popis takšnih razmer moramo poznati osnovne karakteristike takšnega večstopenjskega mešala, kot so npr. moč mešanja, prirastek plinaste faze, čas pomešanja, stična površina itn.^[3,5,6,7]

Pri večstopenjskem mešalu je spodnje mešalo zaradi prevelike količine vnesenega zraka lahko poplavljen, pri tem postane porazdelitev plinaste faze izrazito nehomogena, spremenijo se tudi ostale osnovne karakteristike. Z vidika procesne

operacije je poplavno stanje neučinkovita operacija. Pri večstopenjskem mešalu poplavno stanje nastopi celo pri nižjih pretokih zraka kot pri dispergiranju z enim mešalom^[4]. Pri običajnih izvedbah vnosa zraka z razpršilnim obročem na dnu fermentorja je spodnje mešalo ključnega pomena za učinkovito dispergiranje. Pri tem je na voljo precej izvedb radialnih mešal, od klasičnega Rushtonovega mešala do različnih izvedb turbinskih in diskastih mešal z različnimi oblikami lopatic^[5,9,13,15,16].

V nadaljevanju je obravnavano mešalo z asimetričnimi lopaticami (ABT), ki je bilo razvito in patentirano^[2] v LFDT posebej za dispergiranje velikih količin zraka. Od doslej razvitih in postopno izpopolnjevalnih mešal v LFDT (mešalo z zavitiimi lopaticami – TBT, mešalo z zapognjenimi lopaticami z zarezo – SBT)^[16] dosega ABT-mešalo pri disper-

Doc. dr. Andrej Bombač, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



Slika 1. Merilna linija

giranju zraka najmanjšo disipacijo mehanske energije v kapljevino, velik prirastek plinaste faze, majhno zmanjšanje moči pri dispergiranju zraka ter poplavno stanje pri bistveno večjih količinah vnesenega zraka kot ostala mešala^[2].

Za določitev osnovnih karakteristik mešala so bile izvedene številne meritve tako pri mešanju kapljevine kot pri dispergiranju zraka v vodi z enim mešalom pri standardni geometrijski konfiguraciji mešalne posode. Raziskava poplavnega stanja je potekala pri različnih vrtilnih frekvencah mešala in različnih pretokih zraka, vsakokrat pri konstantni vrtilni frekvenci mešala v smeri naraščajočega pretoka zraka vse do nastanka poplavnega stanja (angleško Loading-Flooding transition, L→F). Moč mešanja je prikazana v obliki števila moči, pretok zraka pa s pretočnim številom, značilnim za naprave industrijskih velikosti. Iz meritev moči je bilo ugotovljeno, da je moč mešanja ABT-mešala zelo majhna za radialno mešalo, na področju delovanja industrijskih naprav je število moči $Ne < 2$. Pri dovajanju plina v kapljevino pa mešalo ob majhnem zmanjšanju moči ($< 16\%$) dispergira bistveno večjo (53 %) količino zraka kot primerjano Rushtonovo mešalo in je zelo primerno za dovajanje velikih količin plina pri procesu.

2 Merilna linija in preizkus

Meritve moči mešanja so potekale na mešalni napravi, katere osnovo predstavljata pokončna cilindrična posoda iz akrilnega stekla (notranjega premera $T = 450$ mm in maksimalne višine $H = 1350$ mm) z zaobljenimi robovi in ravnim dnom ter pogonska mešalna gred, na katero so lahko nameščena različna mešala (kot enostopenjsko ali večstopenjsko mešalo), *slika 1*.

Na steni posode so osnosimetrično nameščeni štirje motilniki toka, podroben opis vseh geometrijskih razmerij je v delu^[4], višina namesti-

tve mešala je na $T/3$. Merilna linija je prikazana na *sliki 1*, podrobnejši opis merilnih naprav in točnost izmerjenih vrednosti, ponovljivost meritev itn. so podani v delih^[1,4,5,16]. Za delovno kapljevino sta bila uporabljena vodovodna voda in zrak iz razvoda stisnjenega zraka na FS, oboje pri sobni temperaturi.

Časi pomešanja so bili izračunani po metodi *motnja-odziv*, kjer je bila za 'motnjo' uporabljena količina 1 dm^3 vroče vode, odziv pa je predstavljal časovni potek temperature, podrobno predstavljeno v delu^[10,16]. Čas pomešanja t_{95} je definiran kot razlika med končnim časom (t_k), ko je temperatura dosegla vrednost $\pm 5\%$ končne vrednosti, in začetnim časom ob vnosu motnje (t_z). Časi pomešanja so bili izračunani iz temperaturnih zapisov na treh lokacijah^[17]:

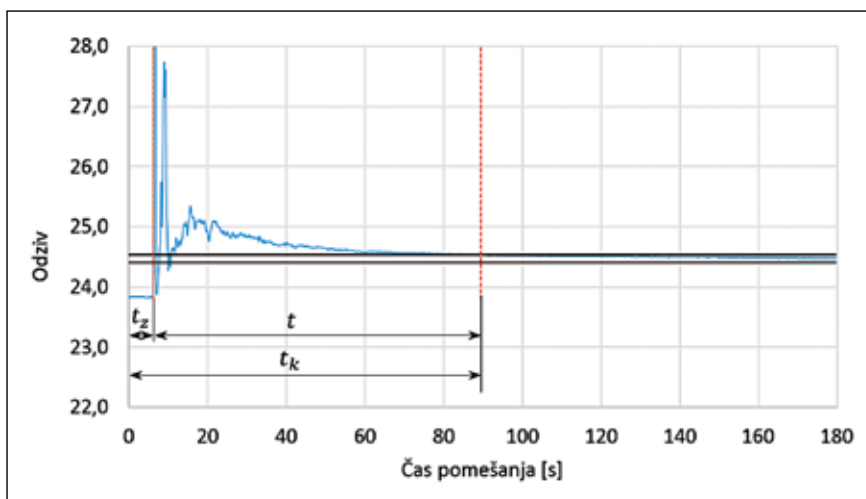
$P_1(r_1, z_1)$: ($T/4, 7$ od osi mešala, $T/4, 5$ od gladine),

$P_2(r_2, z_2)$: ($T/2, 2$ od osi mešala, $T/3$ od gladine) in

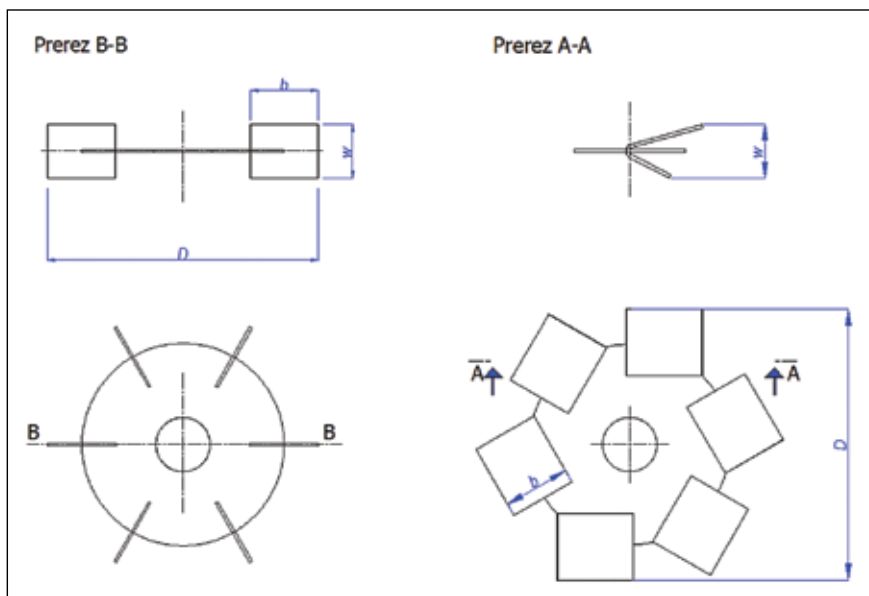
$P_3(r_3, z_3)$: ($T/8$ od osi mešala, $T/50$ pod spodnjim robom mešala).

Na *sliki 2* je predstavljen časovni potek temperature na merilni lokaciji po vnosu vroče vode.

Za tipalo je bil uporabljen termoclen Ni-CrNi (tip K) s premerom zaznavala $0,2 \text{ mm}$. Tipalo je bilo priključeno na ojačevalnik signala proizvajalca National Instruments.



Slika 2. Temperaturni odzivi z merilne lokacije P_1



Slika 3. Standardno RuT-mešalo (levo) in modificirano ABT-mešalo (desno)

Odzivnost zaznavala je bila 750 °C/s, kar je zadoščalo za meritev časov pomešanja. Beleženje odziva je potekalo s frekvenco 10 Hz, čas posamezne meritve je trajal 360 s.

Globalni delež plinaste faze (dpf) je bil pri dispergiranju zraka definiran kot razmerje volumna zraka V_g z volumnom kapljevine V , kar lahko za cilindrično posodo izrazimo kot:

$$\alpha_g = (H_g - H)/H_g \quad (1)$$

pri čemer pomenita: H_g – višina gladine pri dispergiranju zraka, H – višina gladine vode brez dovajanja zraka. dpf je bil izmerjen vsakokrat pri $n = \text{konst.}$ in postopnem povečevanju pretoka dovajanega zraka z merjenjem višine gladine v mešalni posodi. Meritve višine so bile izmerjene za vsak posamezen hidrodinamski režim petkrat, za nadaljnjo analizo je vzeta njihova povprečna vrednost.

Modificirano mešalo ABT premera $T/3$ je prikazano na sliki 3 (desno), za primerjavo je prikazano tudi Rushtonovo mešalo (levo).

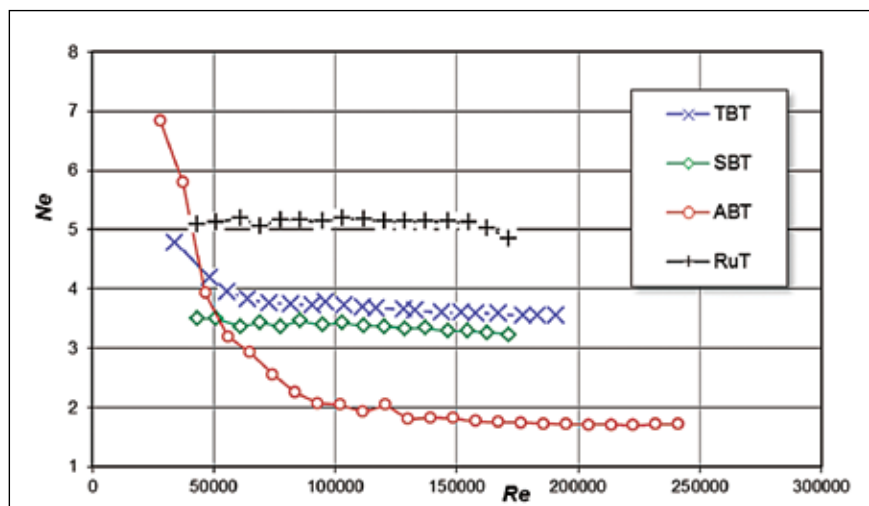
Lopatica ABT-mešala je v sredini po svoji dolžini (b) zapognjena v obliki črke V, pri tem pa je nagib zgornjega dela manjši od spodnjega, zgornji del pa daljši od spodnjega, kot je prikazano na sliki 3, prerez A-A. Obe mešali imata enak premer di-

ska, enako dolžino (b) in višino (w) lopatic ter dimenzijo mešala (D), kot je prikazano na sliki 3.

3 Rezultati in razprava

3.1 Moč mešanja v vodi

Pri mešanju vode z ABT-mešalom so bile izmerjene moči mešala pri različnih vrtilnih frekvencah v razponu od 50 do 600 vrt/min. Moč mešanja je izražena s številom moči oz. Newtonovim številom, vrtilna frekvenca pa z Reynoldsovim številom. Za primerjavo so podane tudi vrednosti ostalih mešal (iz sklopa raziskav v LFDT)^[5,7,8,11,16], kot je prikazano na sliki 4.

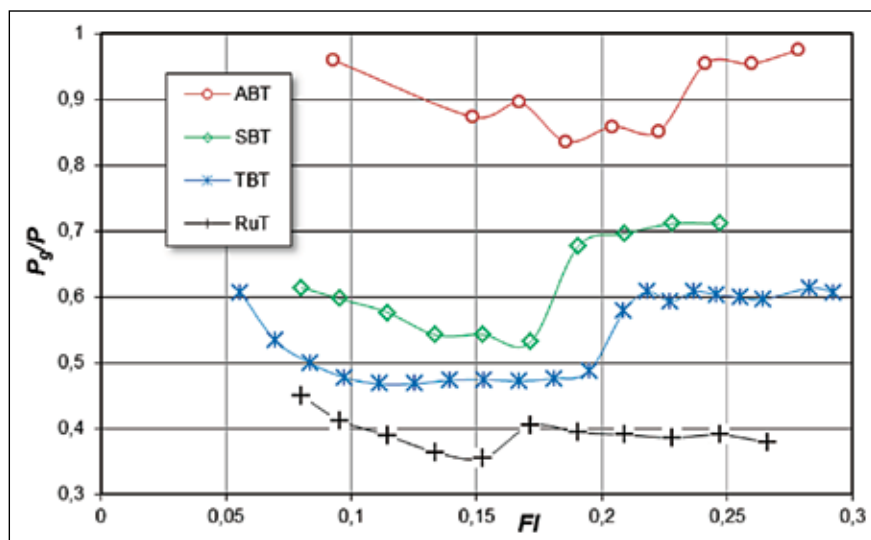
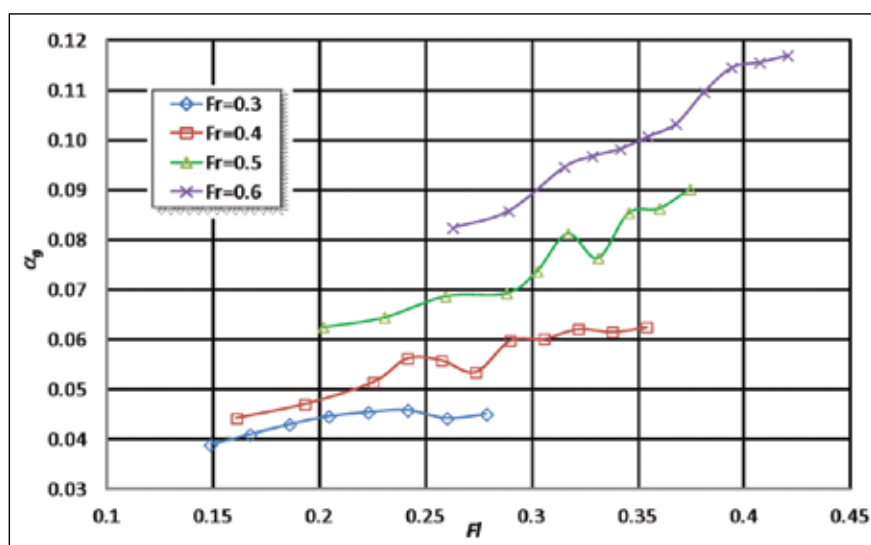
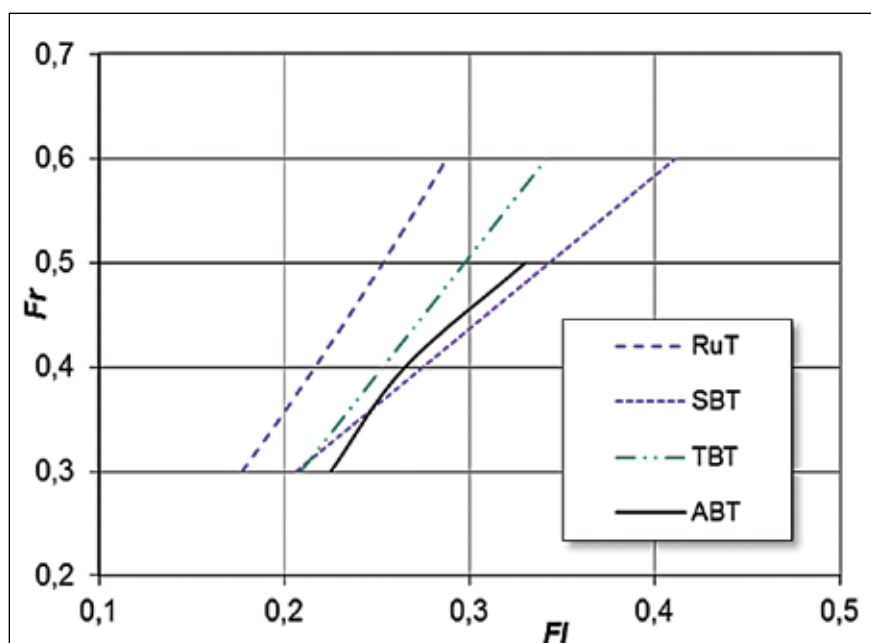


Slika 4. Odvisnost števila moči od Reynoldsovega števila pri mešanju v vodi različnih diskastih mešal

Vrtilna frekvenca mešala je naraščala od 50 min⁻¹ do 650 min⁻¹. Kot je razvidno s slike 4, se v območju $Re > 110000$ vrednost ABT-mešala ustali in znaša $Ne \sim 1,75$, povprečna vrednost za standardno RuT-mešalo pri enakih režimih je $\sim 5,13$ ^[5]. Pri tem pa se pri RuT-mešalu karakteristika moči z naraščanjem vrtiljajev ($Re > 150000$) manjša zaradi površinske aeracije, to je vdora zraka s površine v kapljevino. Takšno stanje se obravnava kot dispergiranje zraka z manjšim dpf . Pri ostalih mešalih, kot npr. pri TBT, SBT in ABT, v primerljivem režimu ni bilo zaznati površinske aeracije.

3.2 Dispergiranje zraka v vodo

Moč mešala je pri dispergiranju zraka navadno manjša kot pri mešanju v kapljevini in se z naraščanjem pretoka zraka navadno manjša. Razlog je v slabenju črpalne zmogljivosti mešala, saj so podtlačna področja lopatic zapolnjena s plinom, kar predstavlja tako imenovane plinske votline. Z večanjem pretoka zraka postajajo plinske votline večje, črpalna zmogljivost mešala pa vse manjša. Ko postanejo vzgonske sile vzpenjajoče se plinaste faze prevladujoče (ob izrazito slabi primarni cirkulaciji kapljevine izstopajočega toka iz mešala), nastopi poplavno stanje. Pri meritvi moči mešala se to stanje odraža kot porast moči (glede na predhodni režim), razmerje


 Slika 5. Razmerje moči pri $Fr = 0,3$

 Slika 6. dpf v odvisnosti od pretočnega števila FI


Slika 7. Meja poplavnega stanja mešal

P_g/P kot lokalni minimum predstavlja zadnje, mejno stanje dispergiranja (angl. loading), ki mu sledi poplavno stanje (angl. flooding).

Na *sliki 5* so prikazane vrednosti P_g/P pri dispergiranju zraka z ABT-mešalom v odvisnosti od pretoka zraka ter za primerjavo vrednosti drugih diskastih mešal (pri istem režimu $Fr = 0,3$). Več kot očitno je, da RuT-mešalo najprej poplavlja pri $FI = 0,17$, pri tem pa primarna cirkulacija izstopajočega toka iz mešala z naraščanjem pretoka slabi, moč se pri dispergiranju v zadnjem stanju pred poplavo zmanjša za kar 65%! S primernejšo obliko lopatic^[5] mešalo TBT poplavlja nekoliko kasneje pri $FI \sim 0,21$ – pri dispergiranju pa je še vedno opazno zmanjšanje moči za 52 %. Mešalo SBT^[16] ima sicer manjše zmanjšanje moči pri dispergiranju, poplavlja pa nekoliko prej kot TBT-mešalo. Iz obrazloženega izhaja, da ABT-mešalo kot zadnje od obravnavanih v skupini dosega poplavno stanje pri $FI = 0,24$, pri tem pa pri dispergiranju dosega majhno zmanjšanje moči, zgolj 18 %. To praktično pomeni, da mešalo ohranja cirkulacijo dvofaznega sistema v posodi tudi pri višjih pretočnih številih oz. pretokih vnesenega zraka. Pri višjih številih ($Fr=0,6$) po tej metodi poplavnega stanja ABT mešala ni bilo možno zaznati.

Poplavno stanje je pri dispergiranju z enim mešalom^[5] možno zaznati tudi iz spremembe dpf , kot je prikazano na *sliki 6*. S povečevanjem vnosa zraka v kapljevino se viša gladina kapljevine vse do neke mejne vrednosti pri dispergiranju. Ob nadaljnjem minimalnem povečanju vnesenega zraka nastane poplavno stanje, kar se odraža kot znižanje vrednosti dpf . Ta stanja so še evidentna pri $Fr = 0,3, 0,4$ in $0,5$, medtem ko pri $Fr = 0,6$ ni zaznati poplavnega stanja.

Tako so na osnovi nizov meritev za ABT-mešalo podane vrednosti nastanka poplavnega stanja, kot je prikazano na »tokovni mapi« – *slika 7*. Za primerjavo so podane še meje poplavnega stanja drugih mešal SBT, TBT in RuT, povzeto po predhodnih

Tabela 1. Parametri regresijske krivulje enačbe (1)

Mešalo	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>
ABT	32,64	-0,464	0,97
TBT	19,913	-0,3162	0,96
RuT	32,978	-0,378	0,9231
SBT	26,26	-0,2932	0,912

delih^[5,7]. Kot je razvidno, zmore SBT-mešalo dispergirati celo nekoliko večjo količino zraka kot ABT-mešalo pred nastopom poplavnega stanja, vendar je bistvena razlika med njunim delovanjem v tem, da ABT-mešalo pri tem disipira za približno 20 % manj energije, slika 5.

3.3 Čas pomešanja pri mešanju v vodi

Časi pomešanja ABT-mešala so bili na osnovi meritev aproksimirani po že predstavljenem kriteriju za modificirana diskasta mešala RuT, TBT in SBT^[5,10] v odvisnosti od moči mešal:

$$t_{95} = a \cdot P^b \quad (2)$$

kjer so koeficienta *a* in *b* ter korelacijski koeficient *R* prikazani v tabeli 1.

S slike 8 je razvidno, da se z večanjem moči mešanja čas pomešanja pri vseh obravnavanih mešalih eksponentno krajša. Večja moč mešala za individualno mešalo v osnovi lahko predstavlja večjo črpalno zmogljivost mešala oziroma intenzivnejšo cirkulacijo ter s tem povezano krajši čas pomešanja. Razlike v času pomešanja med diskastimi mešali enakih gabaritov pa so pri isti moči mešanja lahko povezane le še z obliko lopatic posameznega mešala oziroma z izstopajočim dvofaznim tokom iz mešala. Tako je razvidno, da so npr. pri SBT-mešalu časi pomešanja zelo dolgi, tudi za 100 % in več daljši od časov pri ABT-mešalu, kar seveda močno vpliva na samo učinkovitost mešala, kot je obravnavano v nadaljevanju.

Izmerjeni časi pomešanja so bili primerjani tudi z vrednostmi po virih iz literature, kriterij (Ruszkowski 1994, Grenville s sod. 1995) cit.^[5] izhaja iz

opravljenih meritev časov pomešanja kot povzetih vrednosti (*t*₉₅) po drugih virih z različnimi mešali:

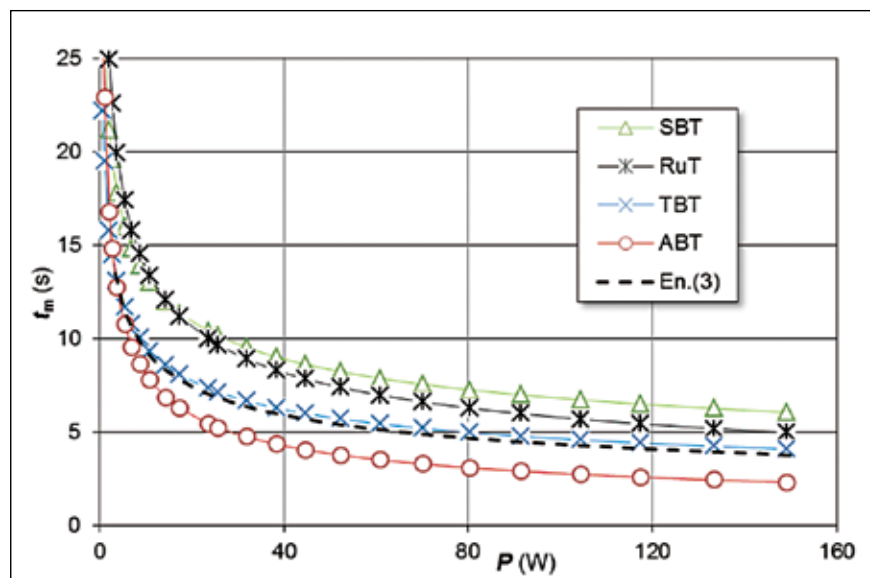
$$t_m = 5,3 \cdot \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \left(\frac{1}{Ne^{\frac{1}{3}}}\right) \cdot \left(\frac{T}{D}\right)^2. \quad (3)$$

Čas pomešanja po kriteriju (3) velja za poljubno obliko mešala znotraj robnih pogojev $1/3 < D/T < 1/2$ in $H = T$. Primerjava izmerjenih vrednosti z izračunanimi po zgornjem kriteriju kaže relativno dobro ujemanje v medsebojni odvisnosti parametrov $P - t_m$, pojavi pa se vprašanje smiselnosti same primerjave absolutnih vrednosti. Namreč, že sama vrednost *Ne* za RuT-mešalo je pri standardni konfiguraciji po virih iz literature^[22] med $4,8 < Ne < 6,3$, kar predstavlja odstopanje že v osnovi od izmerjenih med -7 do 23 %. Prav tako tudi različne eksperimentalne metode določanja časa pomešanja medsebojno odstopajo tako v fizikalni osnovi (temperaturni odziv, sprememba konduktivnosti, metoda razbarvanja, ...) kot tudi po kriteriju določitve doseženega stanja pomešanja. Tako je lahko pomešanje doseženo po krite-

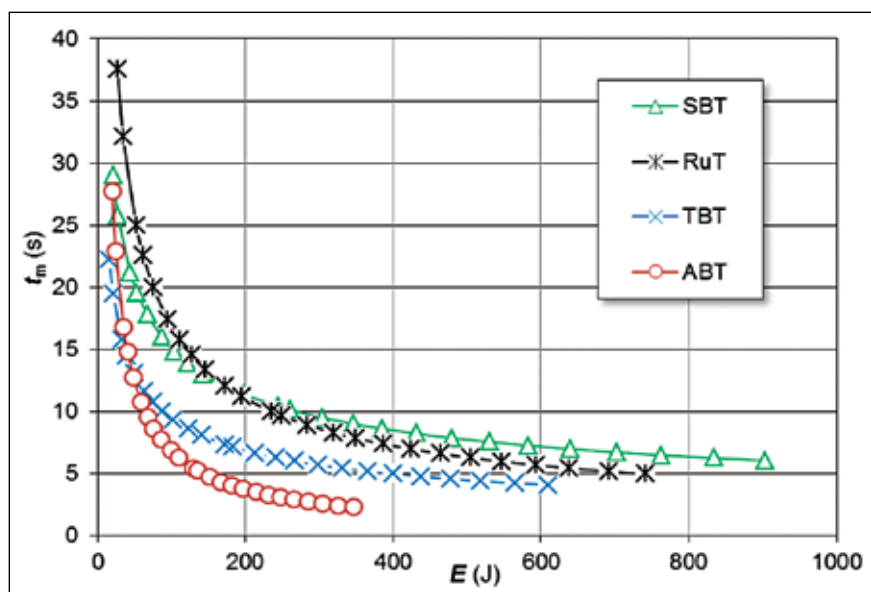
riju (i) $A_h = \pm 0,5 \times \Delta A$ ^[18,19] ali pa (ii) $A'_h = \pm 1 \%$ ^[20], kjer *A* predstavlja poljubno merjeno veličino, *A'* pa njeno fluktuacijo. Če izhajamo iz lokalnih meritev, potem je dodatno treba upoštevati še vpliv same lokacije (*r*, *z*, *φ*), saj so medsebojna odstopanja od -6 % do 11 % od skupne srednje vrednosti^[20]. Metoda motnja/odziv določa tudi neko minimalno količino vnesene snovi, ki predstavlja motnjo. V našem primeru izlitje enega litra vroče vode (kot motnje) traja ocenjeno med 0,75 in 1 s. Ta čas vlitja je neposredno vključen v čas pomešanja, medtem ko so časi vnosa motnje po metodi spremembe konduktivnosti, razbarvanja, *pH* (vnos 3 ml kisline, solne raztopine, ...) precej krajši.

Čas pomešanja, izražen z lokalnimi spremembami poljubne veličine, predstavlja samo čas, pri katerem so nehomogenosti na izbrani lokaciji v posodi, kar pa ne pomeni, da dosežemo različna mešala enake rezultate procesa ob enaki moči mešanja, kot je razbrati iz različnih virov^[18,19,20]. Za kvaliteten produkt procesa je pomembno tudi odstopanje homogenosti po volumnu kapljevine v posodi, kar je prikazano v nadaljevanju, slika 12. Iz povedanega sledi, da je zgolj čas pomešanja dokaj groba ocena mešanja. Primernejša cenilka je učinkovitost mešanja, ki je postulirana z najmanjšo disipacijo energije mešal ob enakem doseženem času pomešanja.

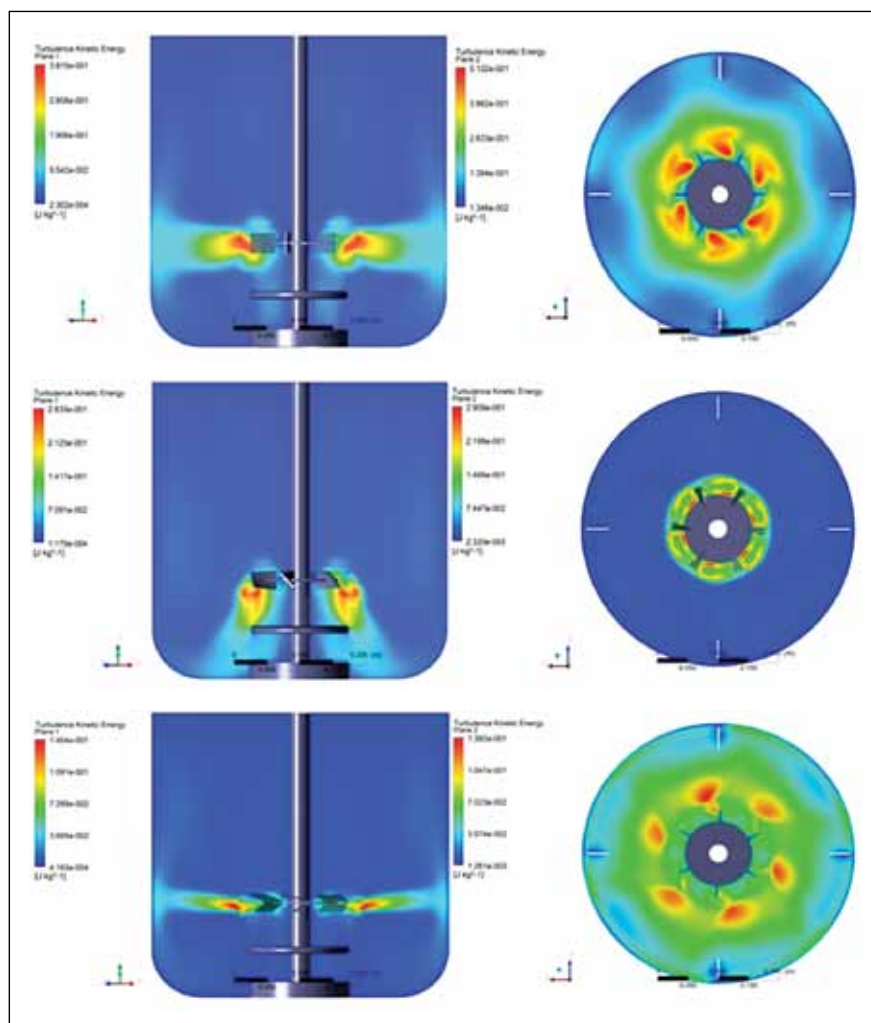
$$E = t_m \times P \quad (3)$$



Slika 8. Časi pomešanja različnih diskastih mešal v odvisnosti od moči mešanja



Slika 9. Učinkovitost različnih diskastih mešal



Slika 10. Turbulenčna kinetična energija v tokovnem polju pri mešanju z mešali RuT, TBT in ABT ^[11]

Tako je s slike 9 takoj razvidno, da so ob enaki disipirani energiji mešal časi pomešanja zelo različni; za enak čas pomešanja, kot ga dosega

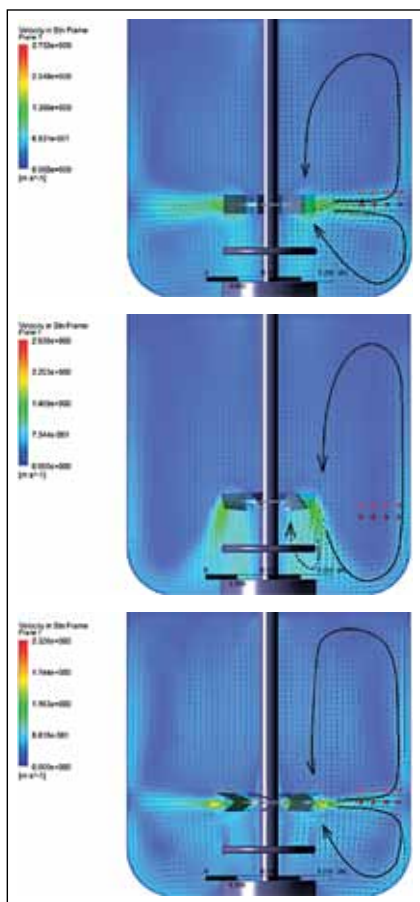
ABT-mešalo (5 s), disipira TBT-mešalo približno 3-krat več, RuT-mešalo pa 5,5-krat več energije!

Iz podrobnejše analize s pomočjo računalniške dinamike tekočin (CFD – angl.) pri mešanju v vodi z različno oblikovanimi lopaticami na diskastem mešalu^[11] (in ni predmet obravnav v tem delu) je še razvidno, da se npr. tokovna polja kot tudi drugi parametri medsebojno dokaj razlikujejo pri uporabi omenjenih mešal. Tako je s slike 10 razvidno, da turbulentna kinetična energija pri mešanju z RuT-mešalom v izstopajočem toku iz mešala predstavlja največ turbulence, kar je razvidno iz presečne vzdolžne in prečne ravnine v višini sredine mešala, desno zgoraj. Radialno usmerjen izstopajoč tok iz mešala se ob steni posode razdeli v zgornjo in spodnjo cirkulacijsko zanko, kot je razvidno iz tokovnega polja z vektorji hitrosti na *sliki 10*, zgoraj.

Precej drugačne so razmere pri TBT-mešalu: dosega nekoliko nižje vrednosti turbulentne kinetične energije, izstopajoč tok iz mešala je pri mešanju v vodi usmerjen aksialno navzdol (ki pa se popolnoma spremeni pri dispergiranju zraka in postane radialen) in ustvarja eno glavno cirkulacijsko zanko. Tokovno stanje je zelo podobno sicer aksialnim mešalom, katerih osnovni namen je predvsem zagotoviti intenzivno cirkulacijo s čim manj turbulence. Pri ABT-mešalu je turbulentna kinetična energija precej manjša in se pojavlja v ožjem pasu. Izstopajoč tok iz mešala je radialen in se ob steni razdeli na zgornjo in spodnjo cirkulacijsko zanko, cirkulaciji sta intenzivnejši kot pri RuT-mešalu.

Na *sliki 12* je prikazano širjenje motnje v presečni ravnini $r-z$ v že razvitem toku pri mešanju v vodi z RuT-mešalom. Rdeča barva predstavlja doseženo stanje pomešanja v odstopanju $\pm 5\%$ od končne vrednosti.

Iz časovnega razvoja mešanja je potrjena predhodna trditev, da čas pomešanja (izražen z lokalnimi spremembami poljubne veličine) predstavlja zgolj čas, v katerem so nehomogenosti na izbrani lokaciji v posodi. To se posebej lepo vidi pri zadnjem času 4,7 s (spodaj desno), ko je na lokaciji x (pri meritvah) že doseženo pomešanje kljub (še) pri-



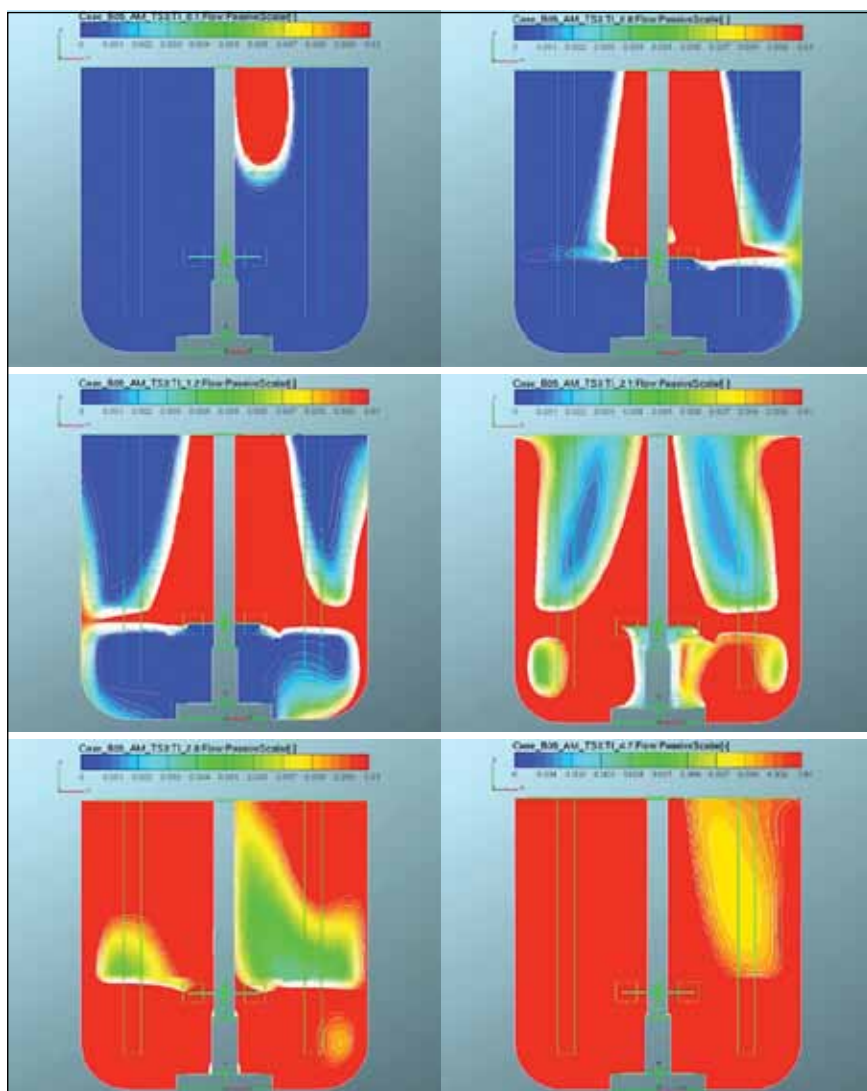
Slika 11. Tokovno polje z vektorji hitrosti za mešali RuT in ABT ^[11]

sotnim nehomogenostim v kapljevini v neposredni bližini.

■ 4 Zaključek

V prispevku je predstavljena učinkovitost novo razvitega in patentiranega mešala z asimetrično zapognjenimi lopaticami (ABT) pri mešanju in dispergiranju zraka v vodo z enim mešalom v STC-konfiguraciji mešalne posode. Za primerjavo učinkovitosti tega mešala so v delu povzeti tudi izsledki iz naših predhodnih raziskav drugih diskastih mešal (RuT, TBT, SBT). Meritve moči mešanja so potekale pri mešanju kapljevine in dispergiranju zraka v posodi z enim mešalom standardne geometrijske konfiguracije vse do eventualnega nastanka poplavnega stanja.

Število moči ABT-mešala dosega pri mešanju kapljevine zelo majhno vrednost, v območju delovanja industrijskih naprav je število moči skoraj konstantna vrednost in znaša ~1,75.



Slika 12. Širjenje motnje v ustvarjenem tokovnem polju z RuT-mešalom po 0,1, 0,9, 1,2, 2,1, 2,8, in 4,7s ^[23]

Pri dispergiranju zraka v vodo mešalo ohranja svojo črpalno zmogljivost, kar izhaja iz majhnega zmanjšanja moči ($P_g/P = 84\%$) pri dispergiranju ob bistveno večji količini zraka (53 %) kot pri Rushtonovem mešalu ali pri preostalih dveh mešalih. Do nastanka poplavnega stanja zmore ABT-mešalo ob manjši moči mešanja kot RuT dispergirati ~40 % večjo količino vnesenega zraka kot primerjano mešalo. Časi pomešanja so od predstavljenih mešal (pri enaki moči mešal) najkrajši pri mešanju z ABT-mešalom. Še opaznejša pa je razlika v učinkovitosti mešal: tako ob enakem času pomešanja ABT-mešala (5s) disipira TBT-mešalo približno 3-krat več, RuT-mešalo pa 5,5-krat več energije.

Opravljenе so bile tudi analize z računalniško dinamiko tekočin pri mešanju z omenjenimi mešali, ki

omogočajo »vpogled« v tokovno polje izbranega mešala.

Oznake:

- b – širina lopatice mešala (m)
- D – premer mešala (m)
- E – disipirana energija mešala (J)
- g – zemeljski pospešek (m/s^2)
- H – višina vode v posodi (m)
- q – volumski pretok (m^3/s)
- n – vrtilna frekvenca mešala (s^{-1})
- P, P_g – moč mešala pri mešanju kapljevine oz. dispergiranju (W)
- t_{95} – čas pomešanja pri doseženem $\pm 5\%$ -odstotnem odstopanju od končne vrednosti
- T – premer posode (m)

w – višina lopatice mešala (m)
 ν – kinematična viskoznost (m²/s)
 a_g – delež plinaste faze, tudi dpf (%)
 ρ – gostota (kg/m³)

Brezdimenzijska števila

Reynoldsovo število:

$$Re = D^2 n / \nu$$

Newtonovo število:

$$Ne = P / (\rho n^3 D^5)$$

Frouddovo število: $Fr = n^2 D / g$

Pretočno število: $Fl = q / (n D^3)$

Okrajšave:

L→F – prehod iz dispergirnega v poplavno stanje

ABT – mešalo z asimetrično zapognjenimi lopaticami

TBT – mešalo z zavrtimi lopaticami

SBT – mešalo z zapognjenimi lopaticami z zarezo

Reference

- [1] Bombač, A., Vpliv geometrijskih parametrov na Newtonovo število pri aeraciji v posodi z mešali (Effects of geometrical parameters on Newton number in an aerated stirred tank). *Strojniški vestnik*, 44, 3/4, 105–116, 1998
- [2] Bombač, A., Diskasto mešalo z asimetrično zapognjenimi lopaticami : SI 24012 (A), 2013-09-30. Ljubljana: Ministrstvo za gospodarski razvoj in tehnologijo, Urad RS za intelektualno lastnino, 2013
- [3] Avinash, R., Khopkar, Philippe, A. Tanguy, CFD simulation of gas-liquid flows in stirred vessel equipped with dual Rushton turbines: influence of parallel, merging and diverging flow configurations. *Chemical Engineering Science*, 63, 3810–3820, 2008
- [4] Bombač, A., Žun, I., Individual impeller flooding in aerated vessel stirred by multiple-Rushton. *Chemical Engineering Journal*, 116, 2, 85–95, 2006
- [5] Bombač, A., Žun, I., Dispergiranje zraka v posodi z modificiranim diskastim mešalom z zavrtimi lopaticami = Air dispersing in a vessel with modified twist blade disk impeller. V: Glavič, P. (ur.), Brodnjak-Vončina, D. (ur.). Slovenski kemijski dnevi 2005, Maribor, 22. in 23. september 2005. Maribor: FKKT, 1–8, 2005
- [6] Wernersson, E. S., Christian Trägårdh, C. (1999), Turbulence characteristics in turbine-agitated tanks of different sizes and geometries, *Chemical Engineering Journal*, 72, 97–107, 1999
- [7] Bombač, A., Žun, I., Eksperimentalna raziskava učinkovitosti modificiranega turbinskega mešala = Experimental research of efficiency of modified disk type impellers. V: Kuhljevi dnevi 2005, Podčetrtek, 22.–23. september 2005. Korelc, J. (ur.), Zupan, D. (ur.). Zbornik del. Ljubljana: Slovensko društvo za mehaniko, 41–48, 2005
- [8] Bombač, A., Beader, D., Žun, I., Mixing times in a stirred vessel with a modified turbine. *Acta Chimica Slovenica*, 59, 4, 707–721, 2012
- [9] Bombač, A. Meritve zaznave poplavnega stanja in deleža plinaste faze na industrijskem fermentorju F001-30m³. Ljubljana, Fakulteta za strojništvo, 2013
- [10] Bombač, A., Žun, I., Flooding-Recognition Methods in a Turbine-Stirred Vessel. *J. Mech. Engng.*, 2002, 48, 663–676.
- [11] Matijević, I., Numerične simulacije pomešanja vode v mešalni posodi z različnimi mešali. Diplomsko delo, FS, Ljubljana, 2013.
- [12] Zhang, Lifeng, Pan, Qinmin, Rempel, G. L., Liquid phase mixing and gas hold-up in a multistage-agitated contactor with co-current upflow of air/viscous fluids. *Chemical Engineering Science*, 61, 18, 6189–6198, 2006
- [13] Vrabel P., van der Lans, R. G. J. M., van der Schot, F. N., Luyben, K. C. A. M., Bo Xu, Enfors, S. O., CMA: integration of fluid dynamics and microbial kinetics in modeling of large-scale fermentations. *Chemical Engineering Journal*, 84, 3, 463–474, 2001
- [14] Vrabel, P.; van der Lans, R. G. J. M., Luyben, K. C. A. M., Boon, L., Nienow, A. N., Mixing in large-scale vessels stirred with multiple radial or radial and axial up-pumping impellers: modelling and measurements. *Chemical Engineering Science*, 55, 23, 5881–5896, 2000
- [15] Magelli, F., Montante, G., Pinelli, D., Paglianti, A., Mixing time in high aspect ratio vessels stirred with multiple impellers. *Chemical Engineering Science*, 101, 712–720, 2013
- [16] Bombač, A., Žun, I., Power consumption and mixing time in stirring with modified impellers. V: Magelli, F. (ur.), Baldi, G. (ur.), Brucato, A. (ur.). Proceedings of the 12th European Conference on Mixing, Bologna, Italy, 27–30 June, 2006. Milano, Italy: AIDIC Servizi S.r.l., 153–160, 2006
- [17] Paul L. E., Atiemo-Obeng A. V., Kresta M. S., Handbook of Industrial Mixing – Science and Practice, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, 2004
- [18] Vasconcelos, J. M. T., Orvalho, C. P., Rodrigues, A. M. A. F., Alves, S. S., Effect of Blade Shape on the Performance of Six Bladed Disk Turbine Impellers. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39, 203–213, 2000
- [19] Nienow, A. W., On impeller circulation and mixing effectiveness in the turbulent flow regime. *Chemical Engineering Science*, 52, 2557–2565, 1997
- [20] Haucine, I., Plasari, E., David, R., Effects of the Stirred Tank's Design on Power Consumption and Mixing time in Liquid Phase, *Chem. Eng. Technol.* (23), 7–15, 2001
- [22] Roman, R. V., Tundoze, R. Z., Studies on Transfer processes in Mixing Vessels. *Chemical Engineering Journal*, 61, 83–93, 1996
- [23] Bombač, A., Beader, D., Žun, I., Računalniška analiza porabe energije in časov pomešanja v posodi z modificiranim turbinskim mešalom = CFD analysis of the power consumption and mixing time in a stirred vessel with a modified turbine impeller. V: Kuhljevi dnevi, 24. september 2009, Cerklje na Gorenjskem. Boltežar, M. (ur.), Slavič, J. (ur.). Zbornik del. Ljubljana: Slovensko društvo za mehaniko, 25–32, 2009

Modified disk impeller with asymmetric blades for dispersing at high gas flow rate

Abstract: The paper presents the basic characteristics of a modified impeller for air dispersing by high flow rates in the fermentation process. An asymmetrically curved blades turbine (ABT) was developed and patented as the last one in a series of research works on modified disk impellers in the Laboratory for Fluid Dynamics and Thermodynamics (LFDT) at the Faculty of Mechanical Engineering in Ljubljana. The analysis of the ABT impeller basic characteristics on a model scale mixing device includes the following measurements: (a) the mixing power in liquid mixing and in air dispersing up to the flooding occurrence, (b) the loading to flooding transitions ($L \rightarrow F$) and (c) the mixing times. The energy dissipation of an ABT impeller in the range of hydrodynamic regimes at an industrial scale operation is found to be very small; the power number equals ~ 1.75 . When air is being dispersed into water, while experiencing a very small reduction in power ($< 16\%$), at the same stirrer speed ($Fr = 0.3$), the ABT impeller is capable of dispersing a substantially higher amount of air (53 %) than the Rushton turbine and it also achieves shorter mixing times. To compare the efficacy of this impeller with other modified impellers, some results of our preliminary research are summarized.

Key words: liquid mixing, air dispersing, ABT impeller, mixing power, flooding, mixing time





ON-LINE BORZA RAZISKOVALNIH NALOG:
www.studentsforindustry.eu



**SEMINARSKA
NALOGA**



**RAZISKOVALNA
NALOGA**



PROJEKT



**ZAKLJUČNA
NALOGA**



**PREVAJANJE,
LEKTORIRANJE**



PRAKSA



Naložba v vašo prihodnost
 Operacijo delno financira Evropska unija
 Evropski sklad za regionalni razvoj



REPUBLIKA SLOVENIJA
**SLUŽBA VLADE REPUBLIKE SLOVENIJE ZA RAZVOJ
 IN EVROPSKO KOHEZIJSKO POLITIKO**



SI HR
 EVROPSKO TERITORIALNO SODELOVANJE

**ŠTUDENTI
IN DIJAKI**

**PROFESORJI
IN MENTORJI**

**PODJETJA IN
ORGANIZACIJE**

**Podjetja, preoblikujte
svoje poslovne
in razvojne izzive
v raziskovalne
naloge in projekte
za študente in dijake!**