

# Temperaturni odziv kot čas pomešanja pri raziskavi v mešalni posodi

Andrej BOMBAČ, Dečan BEADER, Iztok ŽUN

**Izvleček:** V delu so predstavljeni časi pomešanja pri mešanju kapljevine v posodi s standardnim Rushtonovim mešalom (RuT) in patentiranim turbinskim mešalom z dvema diskoma (DDT). Za določitev časa pomešanja je bila uporabljena metoda motnja–odziv. Kot motnja je bila uporabljena manjša količina vroče vode, ki je bila vlita v kapljevino tik nad njeno gladino, odziv pa je predstavljala sprememba temperature kapljevine na merilni lokaciji. Rezultati so bili dobljeni na dva načina: (a) iz meritev na preizkusni napravi ter (b) na osnovi računalniške dinamike tekočin. Izračunane vrednosti so nekoliko, vendar konsistentno, večje od izmerjenih.

**Ključne besede:** temperatura, motnja–odziv, čas pomešanja, mešalna posoda, Rushtonovo mešalo, mešalo z dvema diskoma, računalniška dinamika tekočin

## ■ 1 Uvod

Zaradi omejene samoočiševalne sposobnosti narave je nujno vse presežne količine komunalnih odpadnih voda očistiti s pomočjo različnih čistilnih naprav. Pri tem postopke čiščenja praviloma intenziviramo zaradi pospešitve prenosa snovi. Da povečamo delež kisika v odpadni vodi, vanjo dovajamo zrak ob intenzivnem mešanju kapljevine. Pri tem so seveda izvedbe mešanja zelo raznolike, kot npr.: aeracija vode s posebnimi površinskimi mešali v odprtih bazenih [12], mešanje vode v posodah z mešali [1–4, 6–8, 11], z vnosom zraka v vodilno cev [10] oziroma z ejetorji [11].

Na splošno velja, da je pri enaki disipirani energiji mešala najbolj

učinkovito tisto mešalo, ki dosega pri enaki stopnji učinkovitosti pomešanja najkrajši čas. Na disipacijo energije mešala odločilno vplivajo geometrijska razmerja med posodo in mešalom [1]; če pa se omejimo na standardno konfiguracijo dodatno še oblika in izvedba mešala (radialno, aksialno) [2] ter različne oblike lopatic enakih geometrijskih razmerij [4, 7] in izvedbe motilnikov toka [8].

Z večanjem vrtilne frekvence mešala se večja moč mešala, kar posredno predstavlja večjo črpalno zmogljivost mešala, to pa intenzivnejšo cirkulacijo kapljevine ter s tem povezano krajši čas pomešanja [3, 4]. V literaturi je najti precej različnih kriterijev določitve časa pomešanja, ki se medsebojno razlikujejo predvsem po fizikalnih osnovah in uporabljenih kriterijih. S tem se pojavi vprašanje smiselnosti primerjave absolutnih vrednosti časov pomešanja, saj že izmerjene vrednosti Ne-števíla Rushtonovega mešala pri standardni konfiguraciji nihajo po virih iz literature [4] od –10 % do 23 % glede na našo izmerje-

no vrednost [1]. Poleg tega se različne eksperimentalne metode določanja časa pomešanja medsebojno precej razlikujejo v fizikalnih osnovah (temperaturni odziv, sprememba konduktivnosti, metoda razbarvanja, ...) ter kriterijih določitve stanja pomešanja [2, 3, 7]. Če izhajamo iz lokalnih meritev na različnih lokacijah ( $r$ ,  $z$ ,  $f$ ), potem je dodatno treba upoštevati še vpliv same lokacije, saj so medsebojna odstopanja od –6 % do 11 % od skupne srednje vrednosti [2]. Posamične metode zahtevajo tudi različno minimalno količino vnesene snovi (motnje), s tem pa tudi različne čase vnosa "motnje".

V tem delu sta obravnavani eksperimentalna in CFD-raziskava časa pomešanja kapljevine v mešalni posodi. Za mešanje sta bili izmenično uporabljeni mešali RuT in DDT. Določitev časa pomešanja je potekala po metodi motnja–odziv, kjer je bila kot motnja uporabljena manjša količina vnesene vroče vode v kapljevino tik nad njeno gladino, sprememba temperature kapljevine na merilni loka-

Doc. dr. Andrej Bombač, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo; Dečan Beader, univ. dipl. inž., AVL-AST, d. o. o., Maribor; Prof. dr. Iztok Žun, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

ciji pa njen odziv. Rezultati so bili dobljeni na dva načina: (a) iz meritev na preizkusni napravi ter (b) na osnovi računalniške dinamike tekočin, pri čemer je bila spremljana fluktuacija brezdimenzijske temperature na enaki lokaciji kot na meritvah na preizkusni napravi. Izbrana je bila samo ena lokacija, saj je šlo predvsem za medsebojno primerjavo izmerjenih in izračunanih vrednosti pri enakih vrtilnih frekvencah mešala. Iz primerjave rezultatov je razvidno, da se časi CFD zelo dobro ujemajo z izmerjenimi vrednostmi in potrjujejo aplikativnost preproste in poceni metode motnja-odziv z vročo vodo. Časi pomešanja se na splošno z večanjem vrtilne frekvence mešala krajšajo.

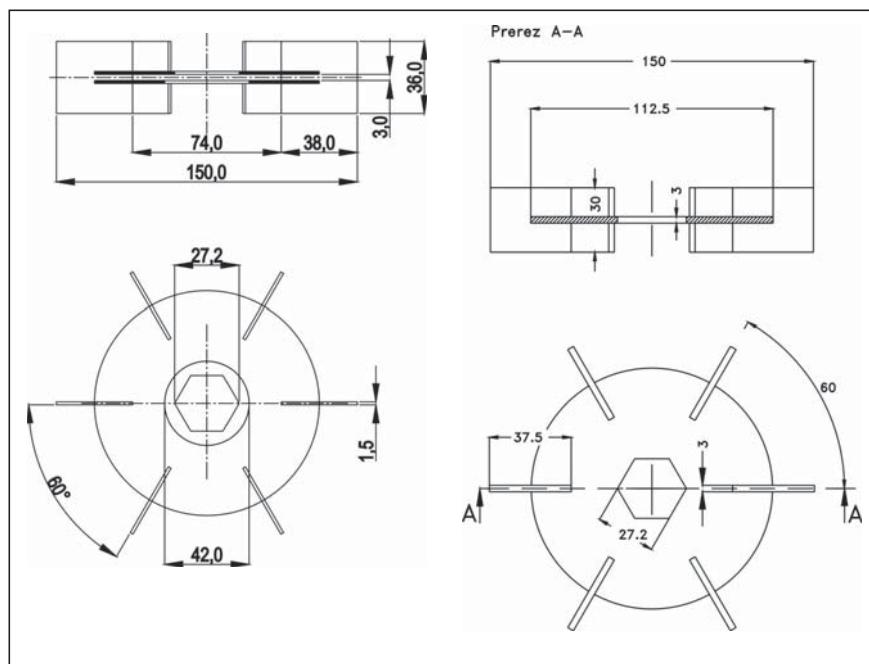
## ■ 2 Merilna linija in preizkus

Mešanje kapljevine je potekalo v posodi premera  $T = 450$  mm, opremljeni s štirimi motilniki toka. Razmerje med višino kapljevine v posodi in premerom posode je bilo  $H/T = 1$ . Mešali, enakih premerov  $T/3$  sta bili nameščeni na višini  $H/3$ . Za izvajanje mešanja sta bili uporabljeni mešali RuT in DDT. Značilne dimenzije mešal so prikazane na sliki 1.

Pri vseh meritvah je bila uporabljena demineralizirana voda ( $m = 70,35$  kg) pri sobni temperaturi. Vrtilna frekvenca je bila merjena z IR-merilnikom z absolutno napako merjenja  $\pm 1$  vrt/min. HBM-ov merilnik momenta je imel napako meritev  $\pm 0,02$  Nm.

Za določitev časa pomešanja je bila pri obeh izvedbah mešanja, z mešalom RuT in DDT, uporabljena metoda motnja-odziv [3, 5]. Za motnjo je bila uporabljena voda ( $1 \text{ dm}^3$ ) temperature  $90\text{--}95$  °C, ki je bila vlita v posodo tik nad gladino nad merilno lokacijo termoelementa, odziv pa je predstavljal sprememba temperature na merilni lokaciji. Naš časovni okvir opazovanja ni presegel 20 s, porast temperature zaradi samega mešanja je bil pri tem zanemarljivo majhen.

Meritve temperature so potekale na lokaciji  $(r, z, j) = (65 \text{ mm}, 420 \text{ mm}, 45^\circ)$ , na sliki 2 je prikazana kot oznaka x. Ta lokacija je bila določena glede na raziskave drugih avtorjev [4] in

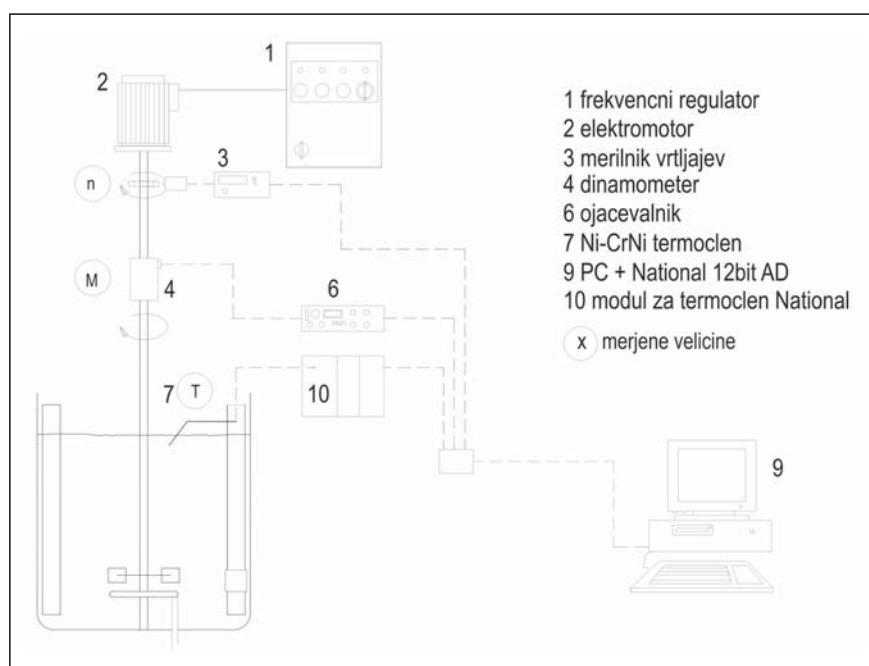


Slika 1. Mešalo DDT (levo) in mešalo RuT (desno)

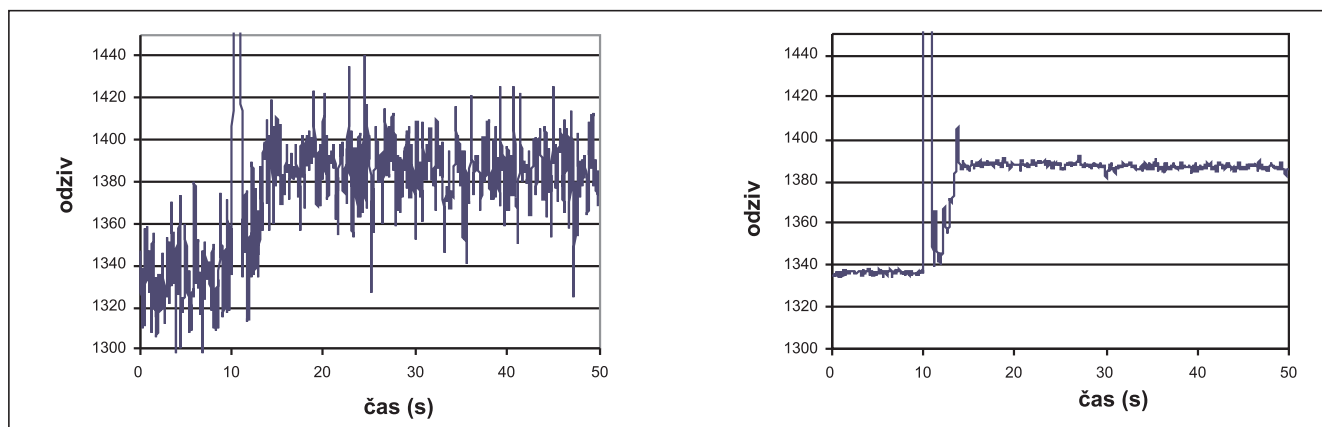
je najmanj odstopala od povprečja treh lokacij, kot so (i) tik pod gladino, (ii) v iztekajočem toku iz mešala in (iii) ob steni posode.

Za termočlen je bil uporabljen par Ni-CrNi (tip K), premer tipala 0,2 mm. Tipalo je bilo priključeno na predojačevalnik proizvajalca National Instruments. Hitrost maksimalnega temperaturnega odziva termočlena je bila pri 3-kratni ponovitvi med  $440$  in  $550$  °C/s, kar je zadoščalo za meritve časov pomešanja, hkrati pa

je bil temperaturni odziv bistveno »počasnejši« od motenj v osnovnem signalu. Beleženje odziva je potekalo s frekvenco  $1000$  Hz, čas posamezne meritve je bil  $60$  s. Na sliki 3 je prikazan dejanski časovni odziv kot arbitražna vrednost (temperatura izražena z napetostjo v binarni skali) 12-bitnega AD-pretvornika (National Instruments) z vsemi motnjami, ki nastopijo v osnovnem signalu. Iz analize motenj pri zajemu podatkov z višjimi frekvencami se je izkazalo, da so bili časi motenj krajši od  $10\text{--}4$



Slika 2. Merilna linija



Slika 3. Dejanski (levo) in filtrirani (desno) odziv termočlena

s, kar je omogočilo enostavno prepoznavo in izločanje motenj. *Filtrirani signal* je prikazan na *sliki 3*.

Za nadaljnjo proceduro je bil takšen signal s 1000 Hz (zapisi/s) povprečen in preveden na 10 Hz. Relativna napaka pri ponovljivosti časov pomešanja na osnovi treh meritev je bila manjša od  $\pm 10\%$ .

### 3.1 Temperaturni odziv kot kriterij določitve časa pomešanja

Izhajajoč iz 1. glavnega zakona termodinamike lahko ohranitev energije za opazovani termodinamski sistem zapišemo:

$$Q_{12} = \Delta U_{12} + W_m \quad (1)$$

kjer je  $Q_{12}$  – izmenjana toplota sistema z okolico,  $\Delta U_{12}$  – sprememba notranje energije sistema in  $W_m$  – vloženo delo. Izmenjano toploto z okolico lahko zanemarimo, saj je temperatura vode v posodi pred vnosom enaka temperaturi okolice, po vnosu motnje pa zanemarljivo višja.

Vloženo mehansko delo je za izvajanje mešanja odvisno od intenzitete mešanja in je za obravnavano časovno obdobje enako:

$$W_m = Ne \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5 \cdot t_m \quad (2)$$

pri čemer pomenijo:  $Ne$  – brezdimenzijsko število moči ( $P/\rho n^3 d^5$ ),  $P$  – moč mešala,  $n$  – vrtilna frekvenca mešala,  $d$  – premer mešala,  $\rho$  – gostota kapljevine in  $t_m$  – čas pomešanja.

Sprememba notranje energije sistema je podana s spremembo stanj pred

vnosom in po vnosu vode (kot motnje) v sistem za vse udeležene medije, kar lahko zapišemo kot:

$$\Delta U_{12} = c_v \cdot m_1 (T_k - T_1) + c_v \cdot m_2 (T_k - T_2) + c_a \cdot (T_k - T_a) \quad (3)$$

kjer pomenijo:  $m_2$  – masa in  $T_2$  – temperatura vnesene vode,  $m_1$  – masa in  $T_1$  – temperatura vode v posodi pred pomešanjem,  $m_a$  – masa in  $T_a$  – temperatura mešalne naprave,  $c_v$  – specifična toplota vode ter  $C_a$  – toplotna kapaciteta mešalnega sklopa. Zadnji člen enačbe 4 predstavlja spremembo notranje energije mešalnega sklopa, ki je v stiku z vodo. Pri tem je toplotna kapaciteta mešalnega sklopa enaka:

$$c_a = \sum m_{ai} \cdot c_{ai}$$

in zajema mešalno gred z mešalom ter posodo z motilniki toka. Glede na majhno maso sklopa in manjše specifične toplote delov mešalnega sklopa je toplotna kapaciteta približno enaka  $\sim 10\%$  vrednosti toplotne kapacitete vode. Tako lahko iz enačb 2 in 4 izrazimo končno temperaturo pomešanja:

$$T_k = \frac{W_m + c_w (m_1 \cdot T_1 + m_2 \cdot T_2) + C_a \cdot T_a}{c_w (m_1 + m_2) + C_a} \quad (4)$$

Izračunana končna temperatura je v nadaljevanju služila za kontrolno vrednost pri izračunih.

#### 3.1.1 Izračun časov pomešanja iz merjenih temperatur

Časi pomešanja so bili izračunani po metodi motnja–odziv [2, 5, 7], kjer je motnjo predstavljala vlita vroča voda

(opisano v pogl. 2), odziv pa je bila ustrezna sprememba temperature. Iz časovnega zapisa temperaturnega odziva je bil čas pomešanja definiran s sledečim kriterijem:

$$t_m = t_k - t_z \quad (5)$$

pri čemer je začetni čas odziva  $t_z = t_i$  določen s pogojem:

$$T_i \geq \text{Avg}(T_{i-10}; T_i) \times 1,05; i = 1, \dots, N \quad (6)$$

in končni čas  $t_k = t_f$ , ko velja, da je temperatura v  $i$ -tem koraku dosegla povprečno vrednost naslednjih 10 izmerkov v odstopanju  $\pm 5\%$  od končne temperature pomešanja:

$$T_i \geq \text{Avg}(T_i; T_{i+10}) - 0,05 \times \Delta T \wedge T_i \leq (\text{Avg}(T_i; T_{i+10}) + 0,05 \times \Delta T), i = 1, \dots, N \quad (7)$$

Temperaturna razlika med začetno in končno temperaturo je enaka  $\Delta T = T_z - T_k$  ter  $T_i$ -temperatura in  $t_f$  čas pri  $i$ -tem koraku zapisa.

#### 3.1.2 Računalniški izračun časov pomešanja

Moč mešanja je bilo na preizkusni napravi relativno enostavno izmeriti, izmerjene vrednosti pa so služile validaciji (model turbulence, stenske funkcije, izbrana gostota mreže ob stenah gredi, izbran model rotiranja mešala, ...) pri CFD-izračunu tokovnega polja. Tako je bilo  $Ne$ -število izračunano na osnovi njegove definicije  $Ne = P/\rho n^3 d^5$ . Moč mešala  $P$  je v tem primeru podana z izrazom  $P = 2\pi n \tau$ , kjer je moment  $\tau$  zaviralne sile  $F$  na stični površini med kapljevino in gredjo z mešalom določen z integracijo izraza  $\tau = \int r \times F$ , pri

čemer  $r$  predstavlja vektor razdalje med opazovanim površinskim elementom in osjo rotacije gredi. Izračun tokovnega polja je pred izvajanjem prehodnega pojava dosegel stacionarno stanje. Predpostavimo, da je sprememba prostornine zaradi vlitja vroče vode zanemarljiva in gladina kapljevine vseskozi ravna (ob dodajanju  $1 \text{ dm}^3$  vroče vode temperature  $95 \text{ }^\circ\text{C}$  se masa tekočine v sistemu nekoliko poveča (približno za  $1,45 \%$ ) in povzroči dvig gladine tekočine za približno  $1,4 \%$ ). Na osnovi teh predpostavk obravnavamo mešanje kapljevine kot enofazni sistem z momentno, kontinuitetno in energijsko enačbo za eno samo fazo, kar je zapisano v splošni diferencialni obliki:

$$\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{\rho} \hat{V}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (8)$$

$$\hat{\rho} \frac{\partial \hat{V}_i}{\partial t} + \hat{\rho} \hat{V}_j \frac{\partial \hat{V}_i}{\partial x_j} = \hat{\rho} g_i - \frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \hat{V}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{V}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \hat{V}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] - \hat{\rho} (2\hat{V}_k + \omega_l x_m \varepsilon_{lmk}) \omega_j \varepsilon_{jkl} \quad (9)$$

$$\hat{\rho} \left( \frac{\partial \hat{\Omega}}{\partial t} + \hat{V}_j \frac{\partial \hat{\Omega}}{\partial x_j} \right) = \hat{\rho} \hat{q}_g + \frac{\partial \hat{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\hat{\tau}_j \hat{V}_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda \frac{\partial \hat{T}}{\partial x_j}) \quad (10)$$

kjer so:

$$\hat{V}_i = \hat{U}_i - \omega_j x_k \varepsilon_{jkl}, \quad \hat{W}_i = \omega_j x_k \varepsilon_{jkl}$$

$$\text{in } \hat{\Omega} = C_p \hat{T} + \frac{1}{2} (\hat{V}_i \hat{V}_i - \hat{W}_i \hat{W}_i)$$

Oznake pomenijo:  $V_i$  – relativna hitrost,  $\rho$  – gostota,  $g_i$  – gravitacijski vektor,  $p$  – tlak,  $\omega_i$  – vektor rotacije,  $\mu$  – viskoznost,  $x_i$  – vektor položaja,  $U_i$  – vektor hitrosti,  $\varepsilon_{ijk}$  – permutacijski simbol in  $\lambda$  – toplotna prevodnost. Modeliranje turbulentnih tokov zahteva primerne postopke, s katerimi dosledno opišemo učinke fluktuacij hitrosti in ostalih skalarnih veličin v osnovnih ohranitvenih enačbah. Za reševanje teh enačb smo izbrali metodo Reynoldsovega povprečenja. Tako sta v sistem enačb vpeljeni dve dodatni spremenljivki: turbulentni napetostni tenzor in turbulentni to-

plotni fluks. Ker je Reynoldsovo število večje od  $3 \times 10^5$  ( $n \geq 100 \text{ min}^{-1}$ ), je sistem enačb zaključen s Standardnim  $k-\varepsilon$  modelom turbulence za velika Reynoldsova števila. Ta k zgornjem sistemu enačb prispeva še dve enačbi in sicer za turbulentno kinetično energijo ( $k$ ) in njeno disipacijo ( $\varepsilon$ ):

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P + G - \varepsilon + G - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (11)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{D} = \left( C_{\varepsilon 1} P + C_{\varepsilon 3} G + C_{\varepsilon 4} k \frac{\partial U_k}{\partial x_k} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon \right) \frac{\varepsilon}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \quad (12)$$

kjer so:

$$P = -2\mu_t S : S - \frac{2}{3} [\mu_t (trS) + k] (trS),$$

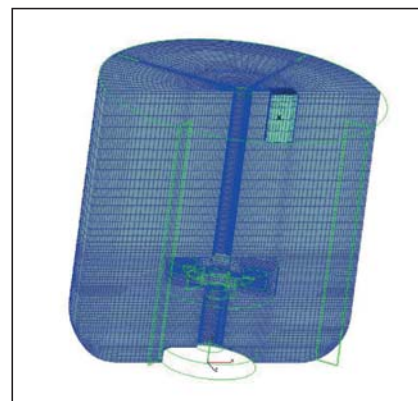
$$S = \sqrt{S_j S_j}, \quad G = -\frac{\mu_t}{\rho \sigma_p} \nabla \rho,$$

$$\text{in } \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Oznake pomenijo:  $\mu_t$  – turbulentna viskoznost in  $\sigma_k$  – turbulentno Prandtlovo število ( $\sigma_k = 1$ ),  $C_{\varepsilon i}$  pa konstante modela. Izračun je bil narejen s komercialnim računalniškim paketom *AVL Fire* [9], ki rešuje integralsko obliko danih enačb po metodi kontrolnih volumnov.

Geometrija in mreža: Uporabljena je bila računska mreža s 489800 (RuT) oziroma 602550 (DDT) celicami in ustrezno gostoto, kar omogoča konsistentno uporabo standardne zidne funkcije. Mreža je kombinirana iz blok strukturirane za posodo (v obeh primerih enaka) ter avtomatično generirane nestrukturirane mreže za mešalo RuT ter blok strukturirane mreže za mešalo DDT, *slika 4*. Vse mreže so bile generirane znotraj predprocesorja *AVL Fire* [9].

Začetni in robni pogoji: Začetno stanje predstavlja voda pri sobni temperaturi. Na stenah gredi in mešala so kot robni pogoj bile uporabljene obodne hitrosti ter konstantna temperatura, enaka temperaturi okolice. Na



Slika 4. Mreža modela

stenah posode je bila prav tako predpisana temperatura enaka temperaturi okolice ( $T_1 = 293,15 \text{ K}$ ), na gladini kapljevine pa simetrija.

Konvergenčni pogoj: Kriterij konvergence je bil v primeru DDT dosežen z reduciranim preostankom, manjšim kot  $1 \times 10^{-3}$ , razen pri skalarju, kjer je bil  $1 \times 10^{-7}$ . Pri RuT je bil uporabljen normalizirani ostanek, manjši od  $1 \times 10^{-4}$ , razen pri skalarju, kjer je bil ta kriterij  $1 \times 10^{-5}$ . Za določanje časa pomešanja je bila uporabljena fluktuacija brezdimenzijske temperature  $\theta = (T - T_l)/(T_{max} - T_l)$  v višini  $5 \%$  njene končne povprečne vrednosti na enaki lokaciji, kot so bile izvedene meritve na preizkusni napravi [6]. Ker so motilniki toka od mešala dovolj oddaljeni, da le minimalno vplivajo na tokovne razmere ob mešalu, je lahko uporabljena tehnika "Multiple reference frame" – hkratna uporaba večjega števila referenčnih koordinatnih sistemov. Območje neposredno ob mešalu obravnavamo v rotirajočem koordinatnem sistemu, v katerem se vpliv rotacije odraža v dodatnih členih, povezanih s Coriolisovo in centrifugalno silo. V tem območju sistem enačb rešujemo v celoti. Nasprotno zunaj ožjega območja okoli mešala (torej v večjem delu računskega območja) rešujemo poenostavljen sistem enačb, ki ne vsebuje členov, povezanih z rotacijo, vektor relativne hitrosti  $V_i$ , pa formalno nadomestimo z vektorjem hitrosti  $U_i$ . V prvem koraku je sistem enačb (8–12) reševan kot časovno neodvisen (MRF, steady-state).

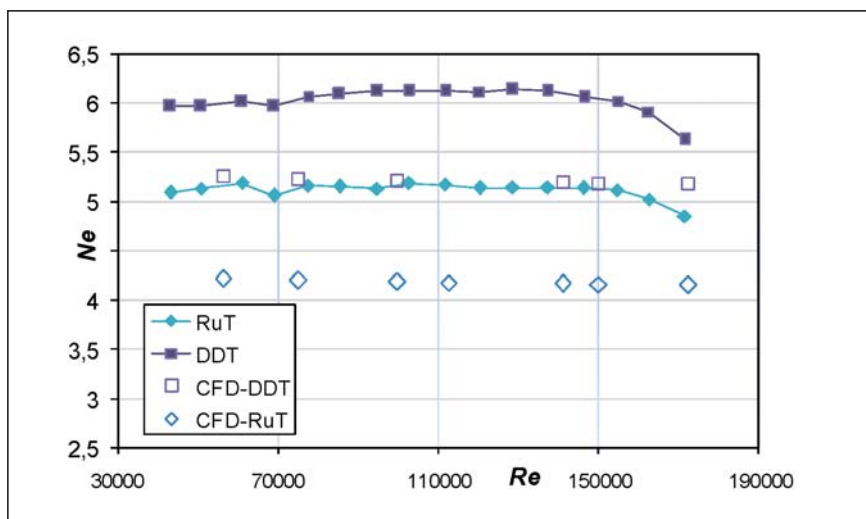
Tako je večkratno skrajšan čas izračuna. Ko je bilo doseženo stacio-

narno stanje, je bil izračun hitrostnega polja "zamrznjen", simulacija pa nadaljevana z izračunom spremembe koncentracije brezdimenzijske temperature. Ta je bila z vrednostjo 1 inicirana v prostornini okoli merilnega mesta, vse dokler ustrezeni delež kapljevine ni dosegel skupne prostornine dodane tople vode ( $1 \text{ dm}^3$ ). To stanje je bilo doseženo po približno eni sekundi simulacije (pri  $n = 266 \text{ min}^{-1}$ ), kar tudi ustreza ocenjenemu času dolivanja vroče vode pri samem eksperimentu. Čas pomešanja je bil določen na osnovi fluktuacije brezdimenzijske temperature  $\theta$  na lokaciji meritev ( $r, z, \varphi$ ) = (65 mm, 420 mm, 45°).

## 4 Rezultati in razprava

### 4.1 Moč mešala

Moč mešala je bila merjena na gredi pri različnih vrtilnih frekvencah vse do nastanka površinske aeracije [1]. Odvisnost moči mešanja od vrtilne frekvence mešala je podana posredno preko Newtonovega in Reynoldsovega števila, kot je prikazano na *sliki 5*. Vzrok zmanjšanja vrednosti  $Ne$  (pri  $Re > 137000$  za mešalo RuT in  $Re > 146000$  za mešalo DDT) je vdor zraka z gladine v kapljevino, kar je vidno po ozkih in dolgih vrtincih vzdolž mešalne gredi. Povprečne vrednosti Newtonovega števila so: 5,15 za mešalo RuT in 6,04 za mešalo DDT [6]. Pri tem mešalo DDT dosega za ~17 % večjo vrednost  $Ne$  od mešala RuT. Vzrok za to je vsekakor pripisati



Slika 5. Prikaz izmerjenih in izračunanih  $Ne$ -števil za mešali RuT in DDT

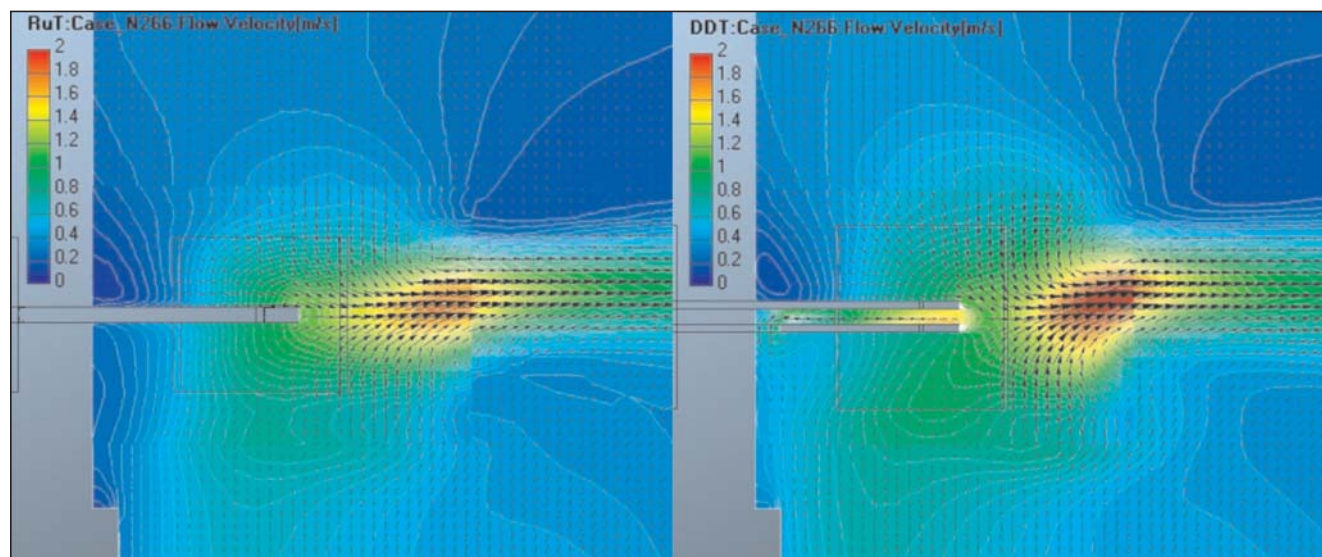
predvsem nekoliko višjim lopaticam ter dodatnemu iztekanju kapljevine med diskoma. Vse skupaj povzroči izrazitejši izstopajoč tok iz mešala, kar je razvidno iz CFD-izračuna hitrostnega polja izstopajočega toka, *slika 6*. S CFD-izračunom tokovnega polja je omogočen kvalitativen vpogled vanj in primerjava različnih veličin med mešanjem z mešalom RuT in DDT. Na *sliki 6* so prikazani vektorji hitrosti v  $r$ - $z$  ravnini na  $\frac{1}{2}$  med motilnikoma toka. Na desni *sliki* je razviden izstopajoč tok izmed dveh diskov, ki v področju za lopatico dodatno pospešuje izstopajoč tok iz mešala. Pri analizi CFD je bilo  $Ne$ -število izračunano na osnovi moči mešala in vrtilne frekvence, kot je bilo to razloženo v točki 3.1.2.

Vrednosti so prikazane na *sliki 5*. Povprečna vrednost izračunanih

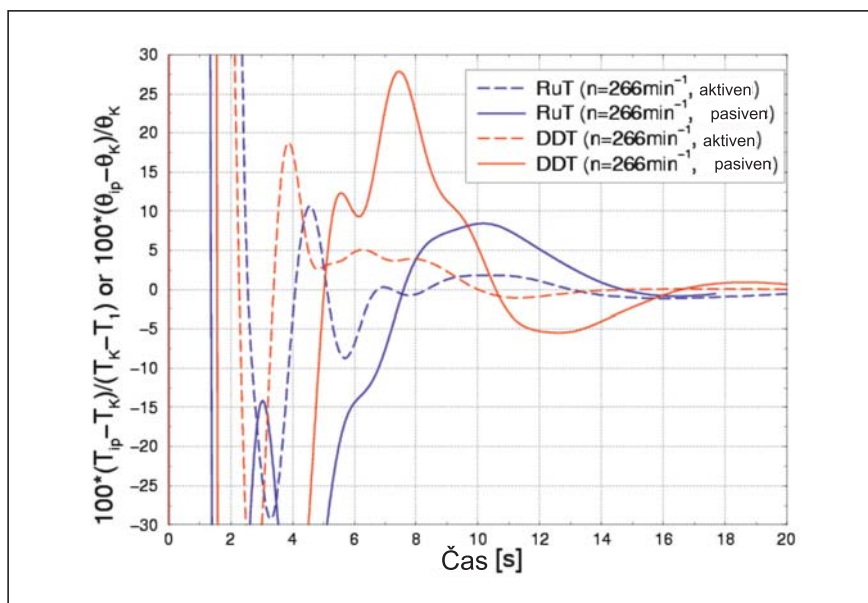
$Ne$ -števil je pri mešalu RuT 4,19, kar predstavlja ~18 % manjšo vrednost od izmerjenega povprečja. Pri mešalu DDT je povprečna vrednost izračunanih  $Ne$ -števil 5,22, kar predstavlja za ~14 % manjšo vrednost od izmerjenega povprečja. Odstopanja, čeprav konsistentna, lahko pripisemo predvsem pomanjkljivosti modela turbulence, uporabi stenskih funkcij, izbrani gostoti mreže ob stenah gredi in mešala ter izbranemu modelu rotiranja mešala.

### 4.2 Čas pomešanja

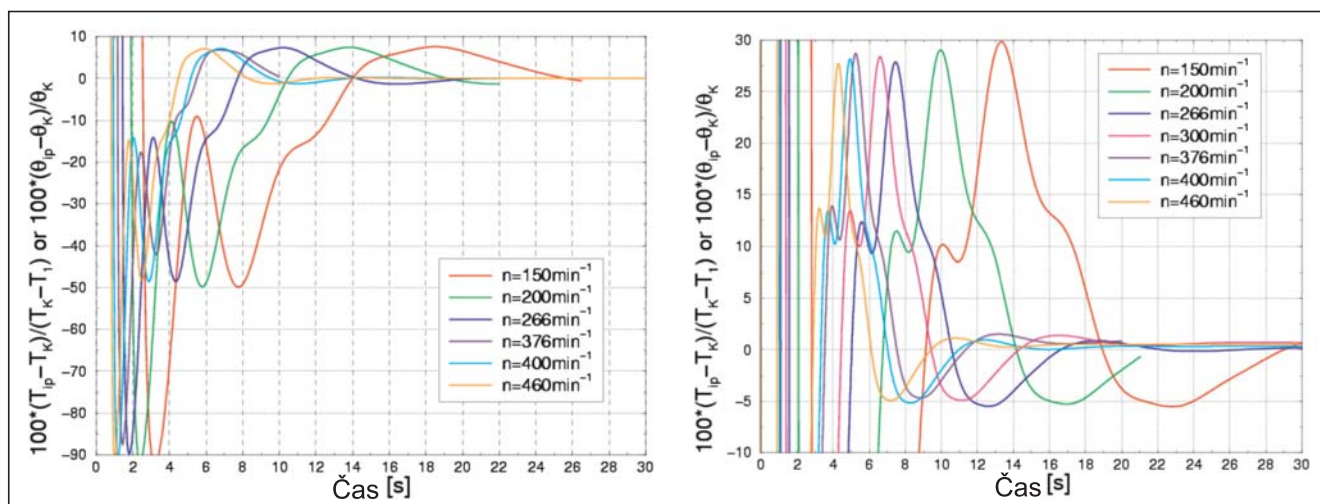
Na *sliki 7* je podan izsek CFD izračunane temperature odziva za lokacijo termoelementa pri  $n = 266 \text{ min}^{-1}$ . Črtkana linija predstavlja relativna odstopanja (%) izračunanih vrednosti temperature odziva v



Slika 6. Hitrostno polje izstopajočega toka mešala RuT in DDT



Slika 7. Čas pomešanja na osnovi: dejanskega temperaturnega odziva in brezdimenzijske temperature



Slika 8. Čas pomešanja pri različnem številu vrtljajev (RuT levo in DDT desno)

primeru upoštevanja celotnega sistema enačb (en. 8–12), polna pa odziv brezdimenzijske temperature  $\theta = (T - T_1) / (T_2 - T_1)$  po tem, ko je bilo hitrostno polje "zamrznjeno". Pri dani motnji je čas pomešanja pri obeh mešalih večji, če ga ocenimo na osnovi odziva brezdimenzijske temperature. Oblika krivulje pri obeh mešalih sledi obliki krivulje dejanskega temperaturnega odziva (črtkana linija). Pri dani motnji lahko sklepamo, da izklop momentne enačbe (četudi s tem izgubimo del informacije) za medsebojno primerjavo rezultatov ne bo kritičen, hkrati pa veliko pridobimo na računskem času (CPU).

Na sliki 8 vidimo časovni odziv brezdimenzijske temperature  $\theta$  po "za-

mrznitvi" momentne in energijske enačbe pri različnem številu vrtljajev za primer mešala RuT in DDT.

Pri izbranem kriteriju za doseg časa pomešanja ( $\pm 5\%$  končne tempera-

ture) gradienti temperaturnih odzivov v njegovi okolici niso več tako izraziti, zlasti pri odzivih mešala DDT, kot je to razvidno s slike 8. Če se striktno držimo postavljenega kriterija, bi v primeru  $n = 266 \text{ min}^{-1}$  lahko sklepali, da je čas pomešanja približno 13,5 s (pri  $-5\%$ ). Če bi ta kriterij nekoliko omilili, potem bi čas lahko ocenili na približno 10 s (pri  $+5\%$ ). Podobno velja tudi, če opazujemo relativna odstopanja temperature ob upoštevanju vseh enačb, slika 7. Pri 300, 376 in  $400 \text{ min}^{-1}$  pa ostajamo znotraj izbranih toleranc. Podoben pojav zasledimo tudi pri samem eksperimentu, kjer prav tako naletimo na nepričakovana odstopanja, (tabela 1) v primeru RuT pri  $376 \text{ min}^{-1}$  in v primeru DDT pri  $267 \text{ min}^{-1}$  in  $400 \text{ min}^{-1}$ .

Zato sklepamo, da bi sam kriterij lahko bodisi poostri (manj primerno za izvajanje meritev na preizkusni napravi) bodisi omilili ter tako pridobili pri zanesljivosti postopka (primerneje pri CFD-izračunu). Alternativno bi lahko

Tabela 1. Primerjava izmerjenih [6] in izračunanih časov pomešanja

Vrt. frekvenca	Izmerjeni časi (s)		Izračunani časi (s)	
	RuT	DDT	RuT	DDT
$n \text{ (min}^{-1}\text{)}$				
150	17,3	9,0	21,2	18,1
200	11,9	8,0	15,8	13,5
267	8,5	10,0	11,7	10,0
376	8,9	4,9	8,1	7,2
400	5,4	5,3	7,8	6,6
460	4,6	4,3	6,8	5,8

izbrali neko drugo merilno mesto (lokacijo termoelementa), pri katerem so gradienti izbranega temperaturnega odziva izrazitejši. Sicer je razvidno, da se z večanjem vrtilne frekvence mešala večja disipirana moč mešala, kar posredno predstavlja večjo črpalno zmogljivost mešala in intenzivnejšo cirkulacijo oziroma krajši čas pomešanja.

S CFD-izračunom je podan tudi kvalitativen vpogled v časovno-krajevni razvoj umešanja dodane kapljevine in je skladen z vizualnim opazovanjem dodanega barvila. V nadaljevanju je prikazan potek pomešanja v  $r$ - $z$  ravnini lokacije termoelementa pri vrtilni frekvenci  $267 \text{ min}^{-1}$ , prikazano na slikah 9 za mešalo RuT in 10 za mešalo DDT. Rdeča barva predstavlja vnese no vodo s temperaturo, ki je višja oz. enaka končni, modra barva predstavlja začetno nižjo temperaturo.

Pri obeh mešalih se motnja takoj ob vnosu sprva širi v smeri cirkulacije, to je navzdol proti mešalu, kjer z izstopajočim tokom izteka iz mešala. Pri mešalu DDT je zelo opazen izrazit radialno izstopajoč tok v smeri proti posodi mešala, posebej v primerjavi z mešalom RuT. Tok se ob steni posode razdeli v zgornjo in spodnjo cirkulacijsko zanko. Iz nadaljnjega razvoja tokovnega polja sledi, da je pomešanje najprej doseženo v spodnjem delu ter kasneje tudi v zgornjem delu posode. V času, ko je na lokaciji termoelementa x-pomešanje že doseženo, pa v bližnji okolici še ni, kot je to razvidno z zadnje sekvence slik 9 in 10. Čase pomešanja v območju vrtilne frekvence mešala na eksperimentalni napravi (tabela 1) dovolj dobro popiše sledeča enačba:

$$t_m = a + b \cdot \ln(n), \quad (13)$$

pri tem sta koeficienta  $a$  in  $b$  določena po metodi najmanjših kvadratov. Vrednosti koeficientov  $a$  in  $b$  ter odstopanja  $R$  so za obe mešali prikazani v tabeli 2.

Na sliki 11 so prikazane vrednosti meritev, korelirane po en. 13 za različne vrtilne frekvence. Razvidno je, da se z večanjem vrtilne frekvence (moči mešanja) čas pomešanja pri obeh mešalih eksponentno krajša. Omenjeni me-

**Tabela 2.** Parametri regresijske krivulje po enačbi (13)

Mešalo	a	b	R
RuT	66,736	-10,127	0,945
DDT	48,021	-7,154	0,7928

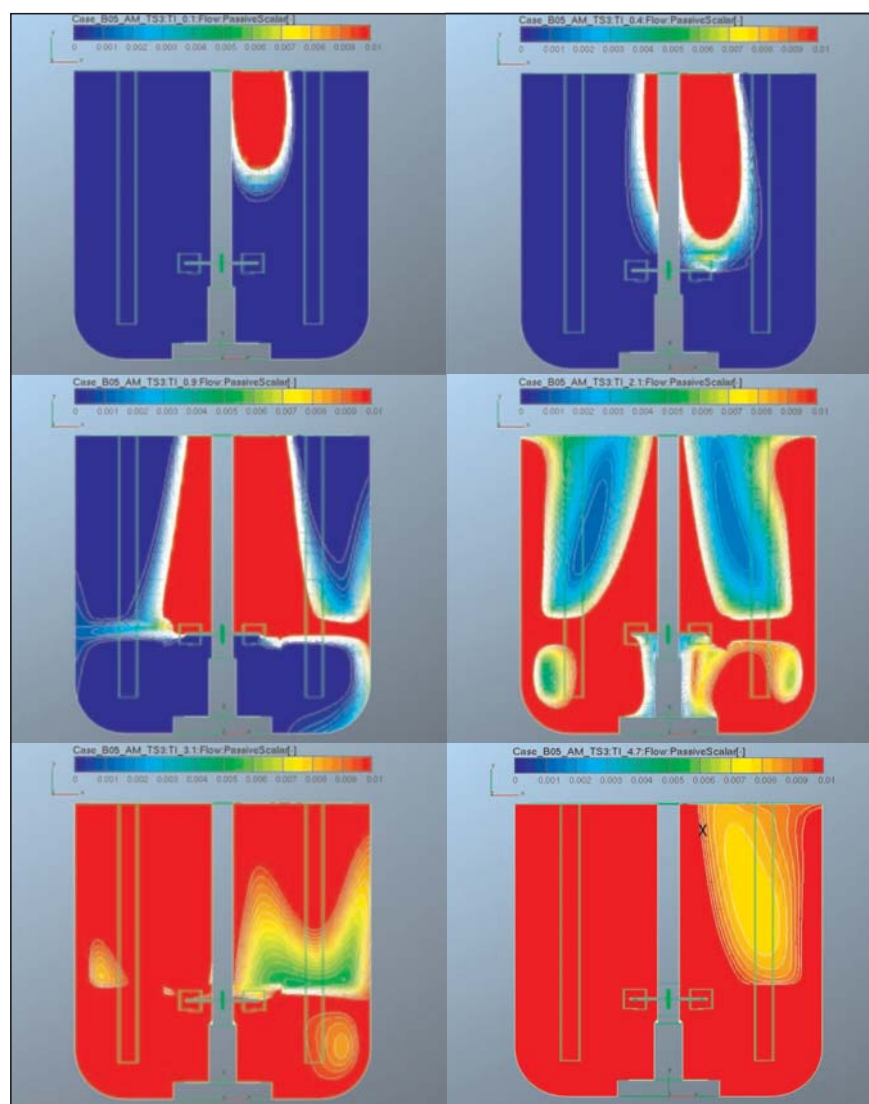
šali imata radialno izstopajoč tok iz mešala, ki se ob steni posode razdeli na zgornjo ter spodnjo cirkulacijsko zanko. Večja disipirana moč mešala DDT torej posredno predstavlja večjo črpalno zmogljivost mešala oziroma intenzivnejšo cirkulacijo ter s tem povezano krajši čas pomešanja na merilni lokaciji. Krajše čase pomešanja dosega mešalo DDT, kar je skladno z večjo disipacijo energije mešala. V literaturi je najti kar nekaj kriterijev, ki čas pomešanja za poljubno izvedbo mešala v okviru standardnih razmerij korelirajo predvsem z močjo mešanja. Pri tem je pomembno navesti,

da čas pomešanja predstavlja samo čas, dosežen na določeni lokaciji, časi pomešanja so lahko glede na

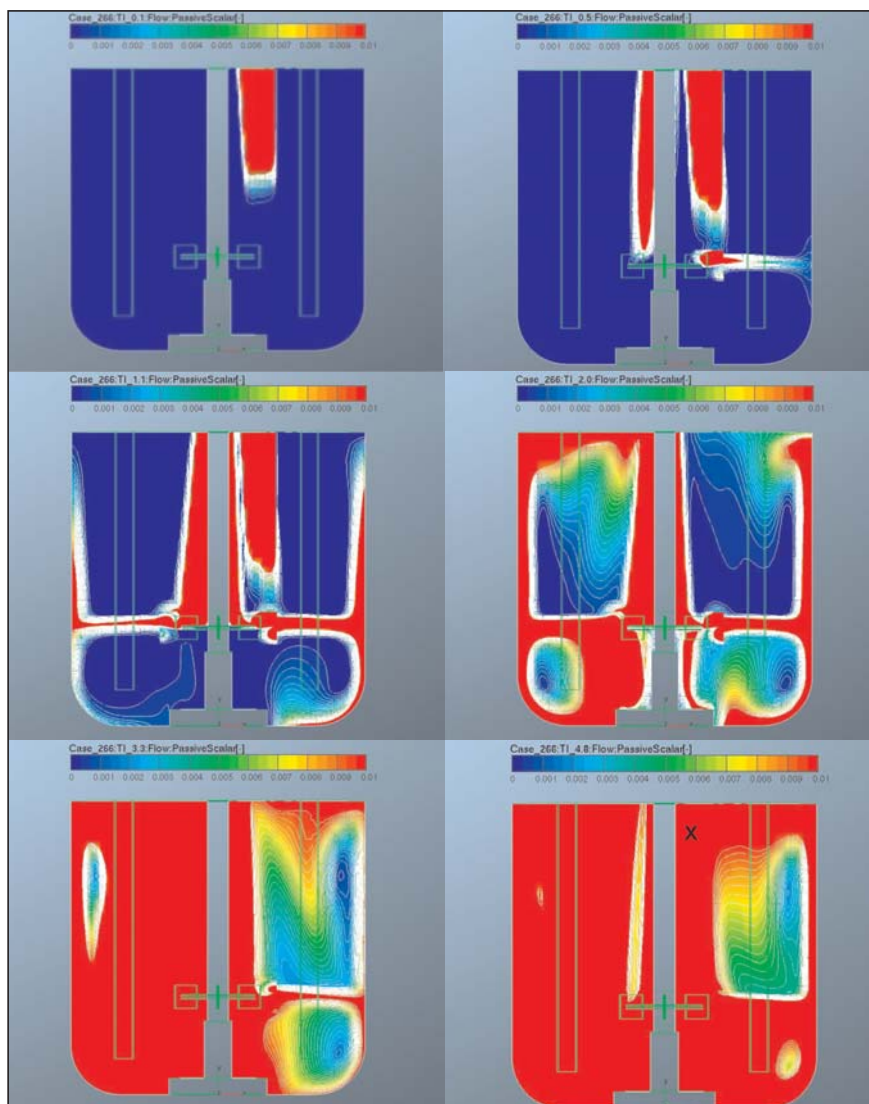
različne merilne lokacije različni [2]. Iz CFD-prikaza razvoja pomešanja, prikazano na slikah 9 in 10, sledi, da so nehomogenosti, kljub doseženemu pomešanju na izbrani lokaciji, v posodi še vedno lahko prisotne. Različna mešala torej ne dosegajo enakih rezultatov procesa. Iz tega sledi, da je čas pomešanja dokaj groba ocena mešalne učinkovitosti.

### 4.3 Primerjava vrednosti

Ujemanje izmerjenih in CFD-vrednosti časov pomešanja je dobro. Zadnje so, predvsem zaradi izbranega pristopa



**Slika 9.** Časovno-krajevni razvoj pomešanja pri mešalu RuT



Slika 10. Časovno-krajevni razvoj pomešanja pri mešalu DDT

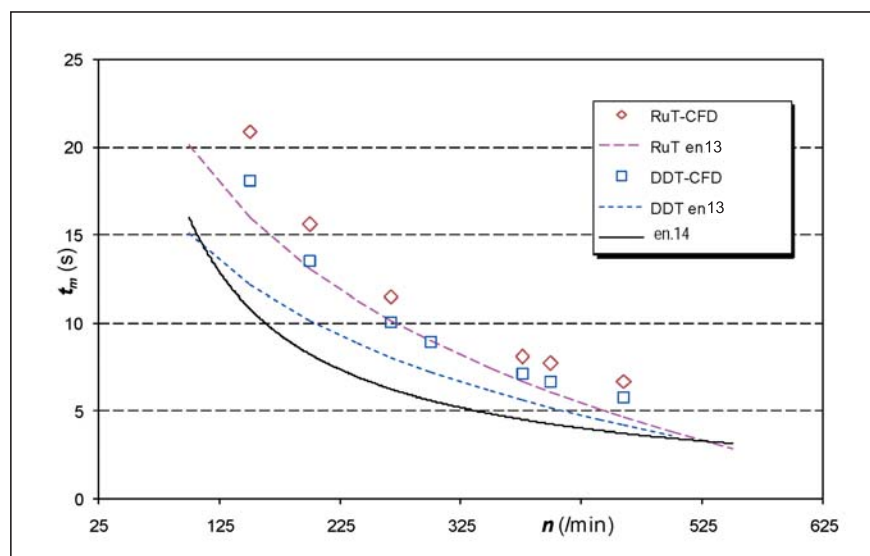
“zamrznitve” hitrostnega polja ter tako doseženim nekajkrat krajšim časom izračuna, konsistentno višje od izmerjenih; v povprečju za 20 % pri mešalu RuT in 22 % pri mešalu DDT. Ta odstopanja lahko pripišemo že omenjeni pomanjkljivosti  $k$ -modela turbulence kot tudi stenskih funkcij, izbrani gostoti mreže ob stenah gredi in mešala, itn. Podobne so tudi ugotovitve v delu [13], kjer so CFD izračunani časi pomešanja pri uporabi  $k$ - $\epsilon$  modela daljši od izmerjenih. Vpliv različnih merilnih lokacij dodatno poveča relativno odstopanje (izračunanih vs. izmerjenih vrednosti) od 11 % do 40 % [15]. Pri mešanju z več stopenjskim mešalom [14] je najti celo za 2–3 krat večje izračunane čase pomešanja od izmerjenih. Vpliv omenjenih odstopanj zasledimo tudi pri izračunani vrednosti Ne-števíla, ki je namreč ~18 % manjše od povprečja izmerjenih vrednosti

pri mešalu RuT in ~14 % manjše pri mešalu DDT. CFD-časi pomešanja pa so bili primerjani tudi z vrednostmi po

kriteriju [3], ki izhaja zgolj iz merjenih vrednosti disipirane energije pri mešanju z različnimi mešali in geometrijski razmerji:

$$t_m = 5,3 \cdot \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \left(\frac{1}{Ne^{\frac{1}{3}}}\right) \cdot \left(\frac{T}{D}\right)^2 \quad (14)$$

Enačba (14) velja pri pogojih  $1/3 \leq D/T \leq 1/2$  in  $H = T$ , vrednosti za obe mešali pa so predstavljene na sliki 10 s polno linijo. Časi pomešanja se tako za mešalo RuT kot za DDT po omenjenem kriteriju med seboj praktično ne razlikujejo, kar ni skladno niti z izmerjenimi niti s CFD izračunanimi vrednostmi. Primerjava absolutnih vrednosti porabe energije kot časov pomešanja s tistimi po virih iz literature je lahko zgolj orientacijska. Že vrednost Ne-števíla standardnega Rushtonovega mešala se po virih iz literature [6] zelo razlikuje: od 4,8 in 6,3. Podobna odstopanja je najti prav tako pri časih pomešanja. Različne eksperimentalne metode določanja časa pomešanja namreč temelje na različnih fizikalnih osnovah, kot npr.: temperaturni odziv, sprememba konduktivnosti, metoda razbarvanja, itn. Vsaka metoda 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



Slika 11. Preizkusno izmerjene in CFD izračunane vrednosti časov pomešanja



raztopine, ...) precej krajši. V uporabi so tudi različni kriteriji določanja doseženega stanja pomešanja. Tako je lahko pomešanje doseženo po kriteriju: (i)  $A_h = 1 \pm 0,05 \times \Delta A$  [3,7] ali pa (ii)  $A'_h = \pm 1 \%$  [2], kjer  $A$  predstavlja poljubno merjeno veličino,  $A'$  pa njeno fluktuacijo. Na celoten rezultat vpliva tudi lokacija meritev ( $r, z, \phi$ ), tako da je dodatno treba upoštevati še vpliv same lokacije. Po viru [4], kjer so bili časi pomešanja merjeni na treh različnih lokacijah, so bile izmerjene sledeče vrednosti: (i) najkrajši čas je bil dosežen v bližini mešala in je bil za 10 % krajši od povprečja vseh treh lokacij, (ii) v bližini stene posode je bil daljši za 6 % od povprečja in (iii) na lokaciji tik pod gladino je bil za približno 4 % daljši od povprečja.

## ■ 5 Zaključki

V prispevku je podana analiza temperaturnega odziva kot indikatorja časa pomešanja pri mešanju v posodi z mešalom. Opravljene so bile meritve časov pomešanja pri mešanju v posodi z Rushtonovim mešalom ter mešalom z dvema diskoma na preizkusni napravi ter računalniški izračun. Za čas pomešanja je bila uporabljena metoda motnja-odziv, kjer je bila kot motnja vlita manjša količina vroče vode, odziv pa je predstavljala sprememba temperature kapljevine.

Izračun moči mešanja in časov pomešanja pri mešanju kapljevine v posodi s standardnim Rushtonovim mešalom in modificiranim mešalom z dvema diskoma je bil opravljen s programskim paketom AVL Fire. Uporabljena je bila tehnika hkratne uporabe večjega števila referenčnih koordinatnih sistemov. Izračunana moč mešanja je zajemala vse zaviralne sile na stični površini med kapljevino in gredjo z mešalom, čas pomešanja je bil izračunan po enakem principu in na enaki lokaciji kot pri meritvah na mešalni napravi.

Rezultati CFD-izračuna kažejo, da je moč mešanja (Newtonovo število) konsistentno manjša od izmerjenih vrednosti, ~18 % pri mešalu RuT in ~14 % pri mešalu DDT, kar kaže na pomanjkljivost za ta primer upora-

bljenega modela turbulence ( $k-\epsilon$ ) in izbiro stenske funkcije, ki pa je predvsem posledica gostote računske mreže v funkciji omejenih računalniških zmogljivosti (CPU).

Za izračun časa pomešanja je bila uporabljena fluktuacija brezdimenzijske temperature, vzeta kot pasivni skalar ("zamrznjeno" hitrostno polje), v višini 5 % njene končne povprečne vrednosti, kar je za večkratni faktor skrajšalo čas posamičnega izračuna.

Iz medsebojne primerjave časov pomešanja je razvidno, da se izračunani časi pomešanja zelo dobro ujemajo z izmerjenimi vrednostmi in potrjujejo uporabnost izbrane metode. Rezultati so konsistentno nekoliko višji; v povprečju za 20 % pri mešalu RuT in 22 % pri mešalu DDT. Ta odstopanja lahko pripišemo že omenjeni "zamrznitvi" posameznih enačb, pomanjkljivosti uporabljenega modela turbulence kot tudi stenskih funkcij, izbrani gostoti mreže ob stenah gredi in mešala, itn. Časi pomešanja se pričakovano krajšajo z večanjem vrtilne hitrosti mešala.

## Literatura

- [1] Bombač, A., Vpliv geometrijskih parametrov na Newtonovo število pri aeraciji v posodi z mešali, *Strojniški vestnik* (44) št. 3-4, 105-116, 1998.
- [2] 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.
- [3] Nienow, A. W., On impeller circulation and mixing effectiveness in the turbulent flow regime, *Chem. Eng. Science*, (52), 2557-2565, 1997.
- [4] Roman, R. V., Tudoze, R. Z., Studies on Transfer processes in Mixing Vessels, *Chem. Eng. J.*, (61), 83-93, 1996.
- [5] Levenspiel, O., *Chemical Reaction Engineering*, 3rd Ed., Wiley & Sons, 1999.
- [6] Bombač, A., Žun, I., Eksperimentalna raziskava učinkovitosti modificiranega turbinskega mešala. *Kuhljevi dnevi* 2005,

Podčetrtek, Slovensko društvo za mehaniko, 2004.

- [7] 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.
- [8] Karcz, J., Major, M., An Effect of a Baffle Length on the Power Consumption in an Agitated Vessel, *Chem. Eng. Proc.* (37), 249-256, 1998.
- [9] AVL Fire, Manual pages, AVL-List GMBH, 2009.
- [10] BOMBAČ, A., LENARČIČ, J., Presoja izvedbe mešanja v nevtralizacijskem reaktorju z vodilno cevjo. *Ventil*, (15), 432-439, 2009.
- [11] Castillo, S, Zapico, A, Doubrovine, N, Lafforgue, C., Fonade, C., Study of a compact bioreactor for the in-line treatment of dairy wastewaters, *DESALINATION*, (214), 49-61, 2007.
- [12] Cancino, B., Design of high efficiency surface aerators, *Aquacultural Engineering*, (31) 99-115, 2004.
- [13] Aoyi Ochieng, Maurice S. Onyango, Anil Kumar, Kirimi Kiriamiti, Musonge, P., Mixing in a tank stirred by a Rushton turbine at a low clearance, *Chemical Engineering and Processing*, (47), 842-851, 2008.
- [14] Jaworski, Z., Bujalski, W., Otomo, N., Nienow, A. W., CFD study of homogenisation with dual Rushton turbines-comparison with experimental results. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part A - Research & Design*, 78, 327-333, 2000.
- [15] Montante, G., Moštek, M., Jahoda, M., Magelli, F. CFD simulations and experimental validation of homogenisation curves and mixing time in stirred Newtonian and pseudoplastic liquids, *Chemical Engineering Science*, (60), 2427-2437, 2005

## Temperature Response as Mixing Time by Research in a Stirred Vessel

**Abstract:** Presented in this work are the mixing times of stirred liquid in a vessel using the Rushton turbine (RuT) and a patented double disk turbine (DDT). Mixing time was based on the pulse-response technique where a small quantity of water was put into liquid just below the level which represented the pulse while the change of liquid temperature represented the response. The results were obtained based on measurements by the experimental device and computational fluid dynamics (CFD). Predicted values are consistently slightly higher than experimental ones.

**Key words:** temperature, pulse-response, mixing time, stirred vessel, Rushton turbine, double disk turbine, CFD

### Zahvala

To delo je del večjega projekta št. No. P2-162, ki ga financira Ministrstvo za šolstvo, znanost in šport RS.



**FLUIDNA TEHNIKA - AVTOMATIZACIJA - INDUSTRIJSKA OPREMA**



**INDUSTRIJSKA PNEVMATIKA**

cilindri, enote za vodenje, prijemala, ventili, priprava zraka, fittingi, spojke, cevi in pribor



**MERILNA TEHNIKA  
IN SENZORIKA**

senzorji in merilci sile, temperature, tlaka, magnetnega polja ter induksijski senzorji



**PROCESNA TEHNIKA**

krogelni in loputasti ventili, ploščati zasuni, pnevmatski in električni pogoni, varnostni ventili



**LINEARNA TEHNIKA**

tirna vodila, okrogla vodila, kroglična vretena, blažilci sunkov, regulatorji hitrosti



**PROFILNA TEHNIKA  
IN STROJEGRADNJA**

konstrukcijski alu profili, delovna oprema, ogrodja strojev



**STORITVE**

konstrukcija in obdelave na klasičnih in CNC strojih

**-TRADICIJA**  
**-KVALITETA**  
**-SVETOVANJE**  
**-PARTNERSTVO**  
**-FLEKSIBILNOST**  
**-VELIKE ZALOGE**  
**-POSEBNE IZVEDBE**  
**-KONKURENČNE CENE**  
**-KRATKI DOBAVNI ROKI**

**Hypex, Lesce, d.o.o.**  
 Alpska 43, 4248 Lesce  
 Tel.: +386(0)4 53-18-700 Internet: [www.hypex.si](http://www.hypex.si)  
 Fax.: +386(0)4 53-18-740 E-Mail: [info@hypex.si](mailto:info@hypex.si)