

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo

VAJE IZ BIOTEHNOLOGIJE

1. VAJA – MEŠANJE

Ljubljana, 22. 10. 2007

1. NALOGA

S pH - metrično metodo in metodo razbarvanja smo določili čase pomešanja v vodni raztopini karboksimetilceluloz (CMC) in v vodi za Rushtonovo turbino in propeler. Iz izmerjenih podatkov smo narisali grafa odvisnosti t_m proti Re in $N \times t_m$ proti Re . Z grafom smo določili vnos moči P ter energijo za doseganje homogenosti $P t_m$ pri posameznih obratovalnih pogojih.

2. OSNOVE

Mešanje je hidrodinamski proces, ki ga uporabljamo za zagotavljanje homogene sestave v bioreaktorjih. Mešanje zagotavljamo z mešali različnih oblik ali s prezračevanjem. V našem eksperimentu smo uporabili Rushtonovo turbino in propeler.

Čas, ki je potreben, da določimo določeno stopnjo homogenosti v bioreaktorju, se imenuje čas pomešanja t_m . Določamo ga lahko z merjenjem naslednjih količin: električne prevodnosti, pH, temperature, fluorescence, magnetnih lastnosti ali radioaktivnosti. Merimo lahko tudi obarvanje ali razbarvanje medija.

Časi pomešanja so odvisni od velikosti in geometrije reaktorja, intenzivnosti mešanja in lastnosti medija. Vse te spremenljivke zajema brezdimenzijsko Reynoldsovo število:

$$Re = \frac{\rho N D^2}{\eta}$$

ρ – gostota medija (kg/m^3) D – premer mešala (m)
 N – vrtilna frekvenca (s^{-1}) η – dinamična viskoznost (Pa s)

Zgornja enačba velja za newtonske tekočine, pri katerih viskoznost ni odvisna od tokovnih razmer in jo lahko izrazimo kot:

$$\tau = \eta \dot{\gamma}$$

τ – strižna napetost (Pa) $\dot{\gamma}$ – strižna hitrost (s^{-1}) η – viskoznost (Pa s)

V večini primerov imamo opravka z nenewtonskimi tekočinami, za katere velja:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad \text{in} \quad \eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = K \dot{\gamma}^{n-1}$$

K – indeks konsistence (Pa s^n)
 n – indeks tokovnega obnašanja
 η_a – navidezna viskoznost (Pa s)

Za $n < 1$ velja:

$$\dot{\gamma} = k_s N$$

k_s – konstanta strižne hitrosti mešala

Iz tega sledi Reynoldsovo število za nenewtonske tekočine:

$$Re = \frac{\rho N^{2-n} D^2}{K k_s^{n-1}}$$

$Re < 10$ – laminaren tokovni režim
 $10 < Re < 10^4$ – prehodno območje
 $Re > 10^4$ – turbulenten tokovni režim

Brezdimenzijski čas pomešanja ($N \times t_m$) za določeno geometrijsko konfiguracijo je v turbulentnem območju konstanten in neodvisen od velikosti.

Brezdimenzijski čas pomešanja za turbulentni režim so določili tudi s teorijo kroženja tekočin:

- za Rushtonovo turbino:

$$N \times t_m = 1,88 \left(\frac{aH + T}{T} \right) \left(\frac{T}{D} \right)^{\frac{13}{6}}$$

- za propeler z usmerjanjem toka tekočin navzdol:

$$N \times t_m = 6,0 \left(\frac{2H}{D} + \frac{T}{D} \right) \left(\frac{H_m}{D} \right)$$

a = 1 – če je mešalo postavljeno centralno

a = 1,33 – če je mešalo na višini $H_m = \frac{H}{3}$

T – premer mešalnega reaktorja (m)

H – višina kapljevine (m)

H_m – višina od dna reaktorja do mešala (m)

D – premer mešala (m)

Moč za pogon mešala v neprezračenem sistemu:

$$P = P_o \rho N^3 D^5$$

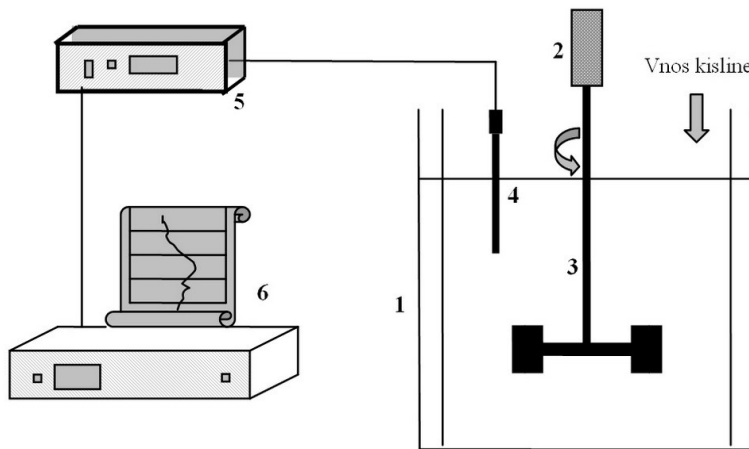
P_o – število moči

N – vrtilna hitrost (s⁻¹)

D – premer mešala (m)

ρ – gostota kapljevine (kg/m³)

3. APARATURA



LEGENDA

- 1 – mešalni reaktor
- 2 – elektromotor s frekvenčnim regulatorjem
- 3 – os z mešalom (Rushtonova turbina oz. propeler)
- 4 – pH-elektroda
- 5 – pH-meter
- 6 – zapisovalnik

4. MERITVE IN RAČUNI

Reološke lastnosti raztopine CMC:

| $S_{\dot{\gamma}}$ | S_{τ} | $\dot{\gamma}$ [s ⁻¹] | τ [Pa] | $\log \dot{\gamma}$ | $\log \tau$ |
|--------------------|------------|-----------------------------------|-------------|---------------------|-------------|
| 0,1 | 0,110 | 11,7 | 1,771 | 1,068186 | 0,248219 |
| 0,2 | 0,190 | 23,4 | 3,059 | 1,369216 | 0,485579 |
| 0,3 | 0,255 | 35,1 | 4,106 | 1,545307 | 0,613366 |
| 0,4 | 0,312 | 46,8 | 5,023 | 1,670246 | 0,700980 |
| 0,5 | 0,365 | 58,5 | 5,877 | 1,767156 | 0,769119 |
| 0,6 | 0,410 | 70,2 | 6,601 | 1,846337 | 0,819610 |
| 0,7 | 0,455 | 81,9 | 7,326 | 1,913284 | 0,864837 |
| 0,8 | 0,500 | 93,6 | 8,050 | 1,971276 | 0,905796 |
| 0,9 | 0,530 | 105,3 | 8,533 | 2,022428 | 0,931102 |
| 1,0 | 0,560 | 117,0 | 9,016 | 2,068186 | 0,955014 |

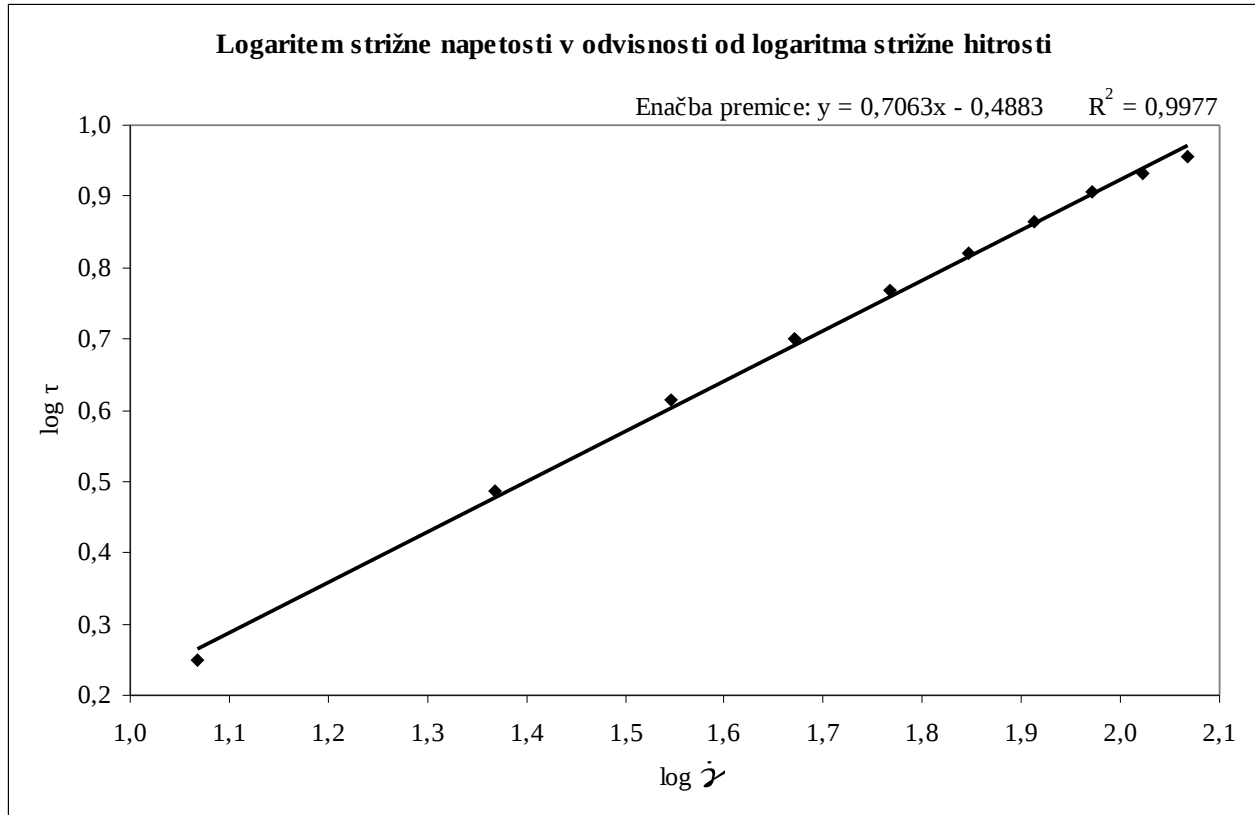
Izračun:

$$\dot{\gamma} = M \times \%D \times S_{\dot{\gamma}} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad \% \tau = 5 \text{ in } A = 3,22$$

$$\tau = A \times \% \tau \times S_{\tau} \text{ [Pa]} \quad \%D = 10 \text{ in } M = 11,7$$

$$\dot{\gamma}_1 = 11,7 \times 10 \times 0,1 = 11,7$$

$$\tau_1 = 3,22 \times 5 \times 0,110 = 1,771$$



Enačbo $\tau = K \dot{\gamma}^n$ logaritmiramo in dobimo $\log \tau = n \times \log \dot{\gamma} + \log K$.

Na grafu indeks tokovnega obnašanja (n) dobimo iz naklona premice, $\log K$ pa iz vrednosti odseka premice na ordinatni osi. Enačba premice je: $y = 0,7063x - 0,4883$.

Indeks tokovnega obnašanja: $n = 0,7063$

Indeks konsistence: $K = 0,32486 \text{ Pa}$

Izračun:

$\log K = -0,4883 \rightarrow K = 10^{-0,4883} = 0,32486$

Lastnosti mešalnika in mešal (imeli smo mešalnik v STC konfiguraciji):

| | H [m] | T [m] | H _m [m] | D [m] | k _s |
|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|----------------|
| Rushtonova turbina | 0,3 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 11,8 |
| Propeler | 0,3 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 10 |

Lastnosti tekočin v katerih smo izvajali mešanje:

| | T [°C] | ρ [kg/m ³] | η [Pa s] |
|------|--------|-----------------------------|---------------------------|
| Voda | 13,4 | 999,46 | 0,001202 |
| CMC | 21,0 | 1000 | Se spreminja (η_a) |

Mešanje z Rushtonovo turbino:

| | N [min ⁻¹] | N [s ⁻¹] | Re | pH | | Razbarvanje | |
|------|------------------------|----------------------|---------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| | | | | t _m [s] | t _m ×N | t _m [s] | t _m ×N |
| CMC | 100 | 1,667 | 123,1 | 146 | 243,3 | 60 | 100 |
| | 200 | 3,333 | 301,7 | 52 | 173,3 | 15 | 50 |
| | 300 | 5,000 | 509,8 | 34 | 170,0 | 11 | 55 |
| Voda | 50 | 0,833 | 6925,9 | 48 | 40,0 | 17 | 14,1 |
| | 100 | 1,667 | 13851,9 | 35 | 58,3 | 10 | 16,7 |
| | 200 | 3,333 | 27703,8 | 39 | 130,0 | 7 | 23,3 |

Mešanje s propelerjem:

| | N [min ⁻¹] | N [s ⁻¹] | Re | pH | | Razbarvanje | |
|------|------------------------|----------------------|---------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| | | | | t _m [s] | t _m ×N | t _m [s] | t _m ×N |
| CMC | 200 | 3,333 | 287,4 | 188 | 626,7 | 20 | 66,7 |
| | 300 | 5,000 | 485,6 | 100 | 500,0 | 14 | 70,0 |
| | 400 | 6,667 | 704,5 | 42 | 280,0 | 10 | 66,7 |
| Voda | 50 | 0,833 | 6925,9 | 39 | 32,5 | 65 | 54,2 |
| | 100 | 1,667 | 13851,9 | 28 | 46,7 | 28 | 46,7 |
| | 200 | 3,333 | 27703,8 | 26 | 86,7 | 15 | 50,0 |

Izračun:

- za CMC:

$$Re_1 = \frac{\rho N^{2-n} D^2}{Kk_s^{n-1}} = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} \times (1,667 s^{-1})^{2-0,7063} \times (0,1m)^2}{0,32486 Pa \times (11,8)^{0,7063-1}} = 123,1$$

- za vodo:

$$Re_1 = \frac{\rho N D^2}{\eta} = \frac{999,46 \frac{kg}{m^3} \times 0,833 s^{-1} \times (0,1m)^2}{0,001202 Pas} = 6925,9$$

Formuli veljati za Rushtonovo turbino kot za propeler.

Izračun časa pomešanja (t_m) in brezdimenzijskega časa pomešanja (N×t_m) iz korelacij (teoretične vrednosti).

Rushtonova turbina:

$$N \times t_m = 1,88 \left(\frac{aH + T}{T} \right) \left(\frac{T}{D} \right)^{\frac{13}{6}} =$$

$$= 1,88 \left(\frac{1,33 \times 0,3m + 0,3m}{0,3m} \right) \left(\frac{0,3m}{0,1m} \right)^{\frac{13}{6}} = 47,345$$

| | N [s ⁻¹] | N×t _m | t _m [s] |
|------|----------------------|------------------|--------------------|
| Voda | 0,833 | 47,345 | 56,84 |
| | 1,667 | 47,345 | 28,40 |
| | 3,333 | 47,345 | 14,20 |

Propeler:

$$N \times t_m = 6,0 \left(\frac{2H}{D} + \frac{T}{D} \right) \left(\frac{H_m}{D} \right) =$$

$$= 6,0 \left(\frac{2 \times 0,3m}{0,1m} + \frac{0,3m}{0,1m} \right) \left(\frac{0,1m}{0,1m} \right) = 54$$

| | N [s ⁻¹] | N×t _m | t _m [s] |
|------|----------------------|------------------|--------------------|
| Voda | 0,833 | 54 | 64,83 |
| | 1,667 | 54 | 32,39 |
| | 3,333 | 54 | 16,20 |

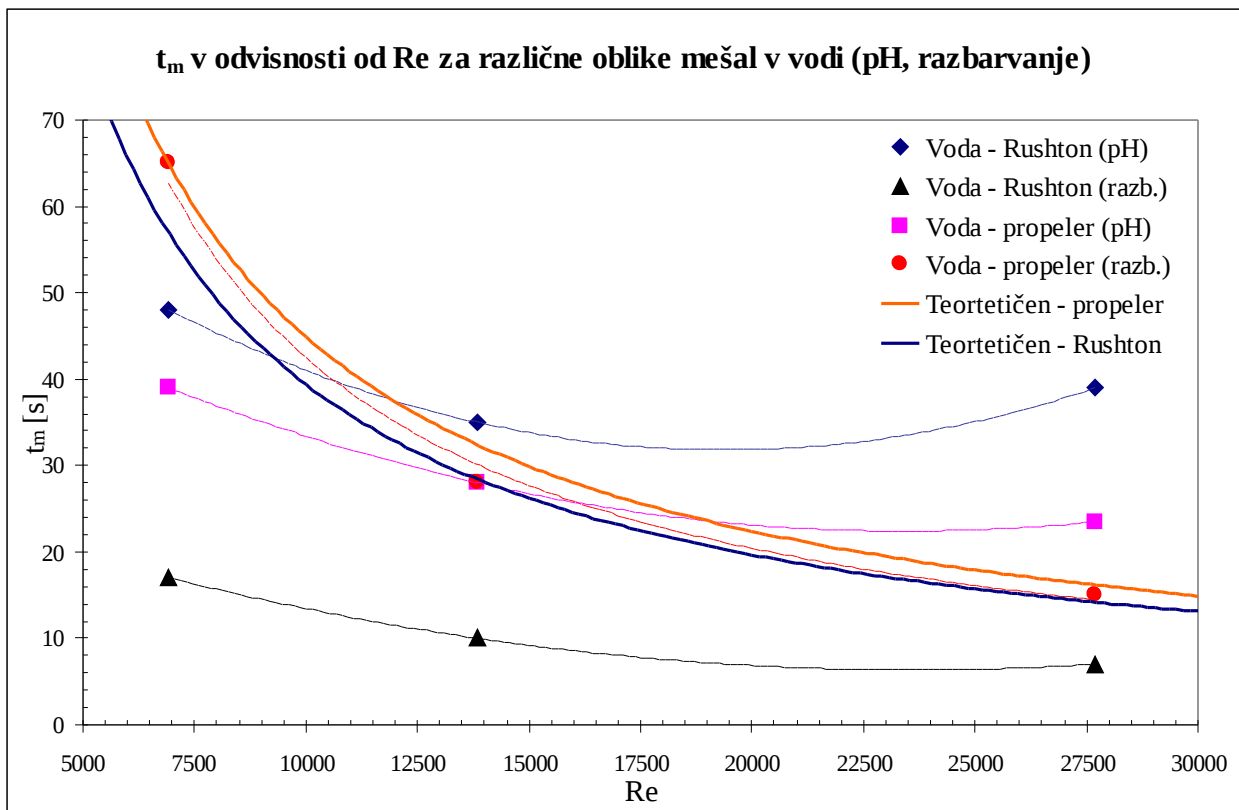
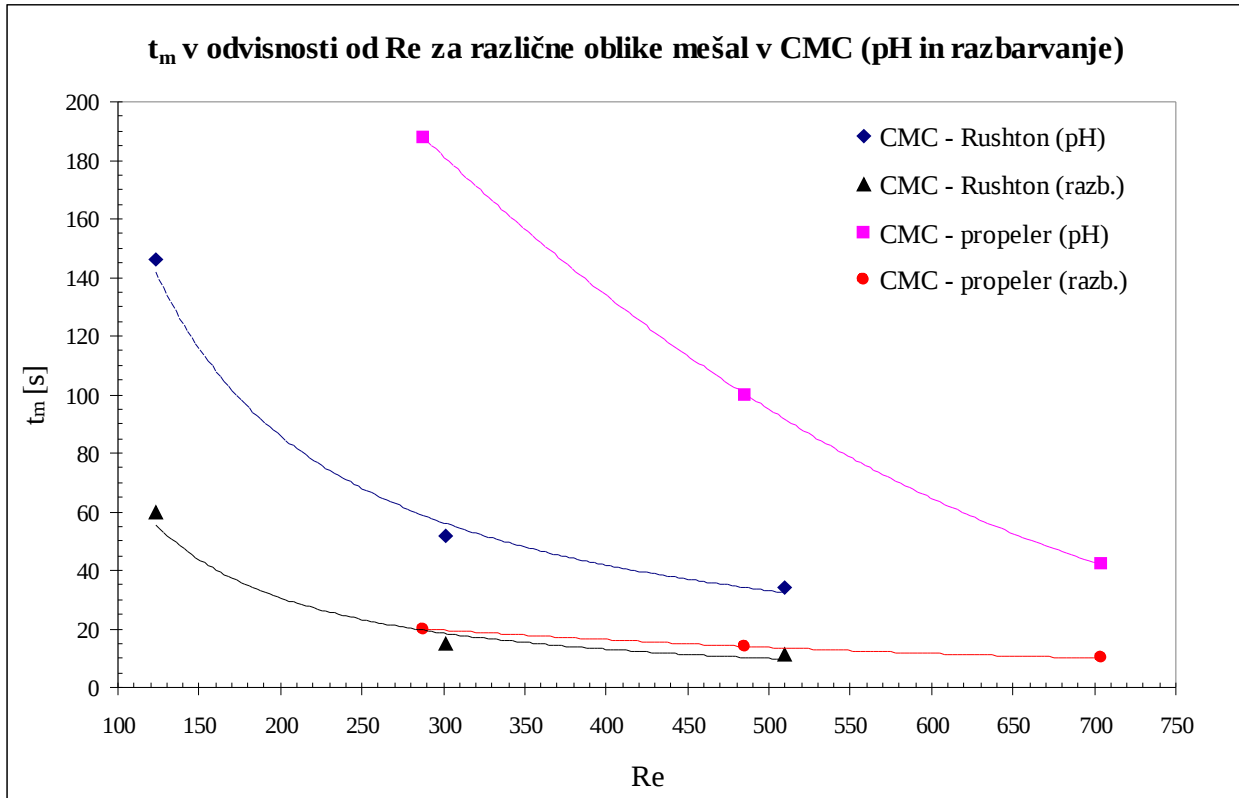
5. REZULTATI

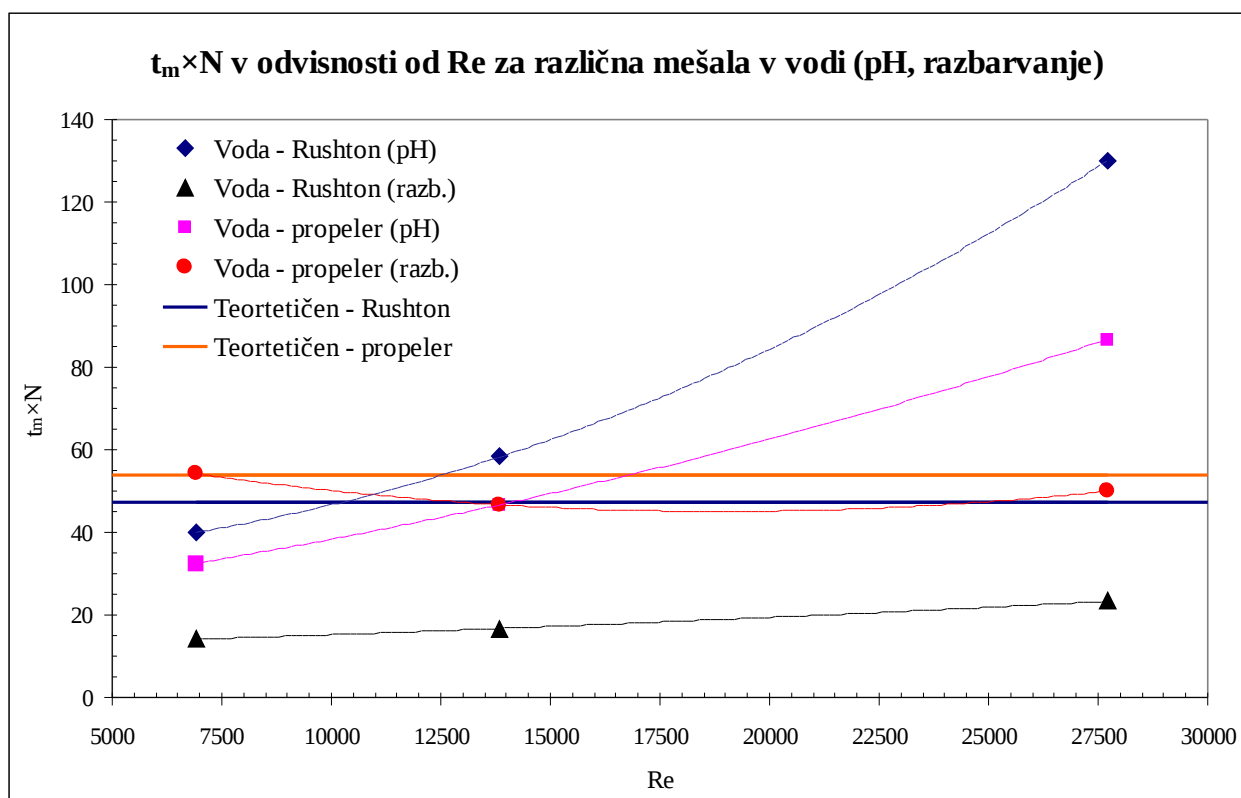
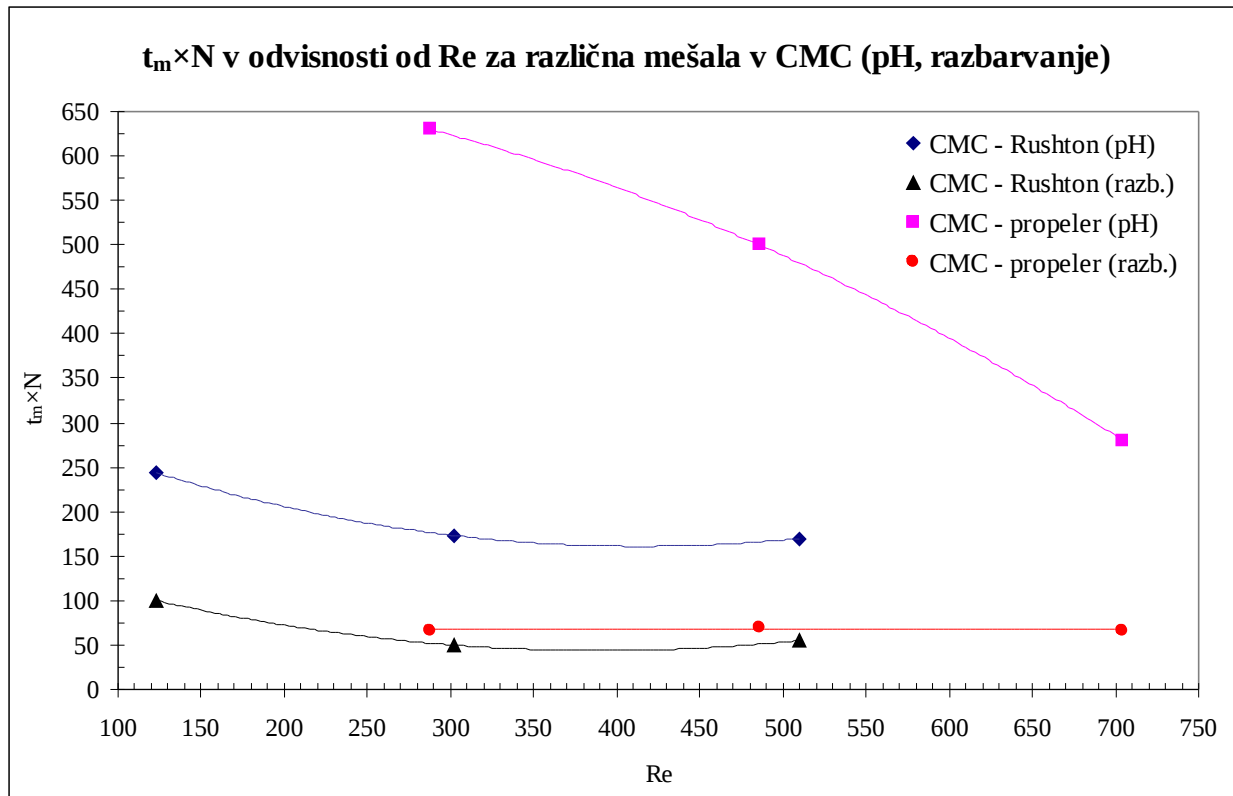
| | | N [min ⁻¹] | N [s ⁻¹] | Re | Po | P [W] | pH | | Razbarvanje | |
|----------|------|------------------------|----------------------|---------|-----|-------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| | | | | | | | t _m [s] | P×t _m [J] | t _m [s] | P×t _m [J] |
| Rushton | CMC | 100 | 1,667 | 123,1 | 3,4 | 0,157 | 146 | 22,99 | 60 | 9,45 |
| | | 200 | 3,333 | 301,7 | 3,3 | 1,221 | 52 | 63,54 | 15 | 18,33 |
| | | 300 | 5,000 | 509,8 | 3,5 | 4,375 | 34 | 148,75 | 11 | 48,13 |
| | Voda | 50 | 0,833 | 6925,9 | 4,6 | 0,026 | 48 | 1,28 | 17 | 0,45 |
| | | 100 | 1,667 | 13851,9 | 5,0 | 0,231 | 35 | 8,10 | 10 | 2,31 |
| | | 200 | 3,333 | 27703,8 | 5,0 | 1,850 | 39 | 72,16 | 7 | 12,95 |
| Propeler | CMC | 200 | 3,333 | 287,4 | 0,9 | 0,333 | 188 | 62,65 | 20 | 6,66 |
| | | 300 | 5,000 | 485,6 | 0,8 | 1,000 | 100 | 100,00 | 14 | 14,00 |
| | | 400 | 6,667 | 704,5 | 0,7 | 2,074 | 42 | 87,12 | 10 | 20,74 |
| | Voda | 50 | 0,833 | 6925,9 | 0,6 | 0,003 | 39 | 0,14 | 65 | 0,23 |
| | | 100 | 1,667 | 13851,9 | 0,6 | 0,028 | 28 | 0,78 | 28 | 0,78 |
| | | 200 | 3,333 | 27703,8 | 0,6 | 0,222 | 26 | 5,77 | 15 | 3,33 |

Iz grafa $Po = f(Re)$ smo odčitali vrednosti Po za posamezne Re in izračunali vnos moči (P) [$Nm/s = W$] in $P \times t_m$ [$Ws = J$] za merjenje spremembe pH in razbarvanja.

$$\text{Izračun: } P_{(pH)1} = Po \rho N^3 D^5 = 3,4 \times 1000 \frac{kg}{m^3} \times (1,667 s^{-1})^3 \times (0,1m)^5 = 0,157W$$

Grafi so podani v obliki diagramov ločeno za CMC in vodo (in ne ločeno po tipu mešala ker so razlike v Re za Rushtonovo turbino in propeler prevelike in bi dobili diagrame z zelo velikim razponom vrednosti Re na abscisni osi).





7. KOMENTAR

Iz grafov je razvidno, da t_m z večanjem N (in s tem tudi Re) tako pri propelerskem mešanju kot tudi pri Rushtonovi turbini padajo. Teoretično naj bi t_m za vodo padal linearno z večanjem frekvence mešanja, pri CMC pa naj bi bilo vidno odstopanje od linearnosti zaradi zmanjševanja viskoznosti, kar pa se iz grafov ne da najbolje razbrati (meriti bi morali pri več različnih frekvencah mešanja, da bi dobili več točk na grafu).

Re je za vodo višji kot za CMC in se nahaja v turbulentnem območju ($Re > 10^4$), medtem ko pri CMC velja prehodno območje ($10 < Re < 10^4$). Zaradi tega vzroka lahko pri vodi dosežemo določen t_m pri nižjih N mešala. Za propelersko mešalo so t_m višji kot za Rushtonovo turbino, kar potrjuje teoretični izračun na osnovi korelacij. $N \times t_m$ s povečevanjem Re za CMC pada, kar se sovпада s predpostavko, da smo v prehodnem območju glede na velikost Re . Za vodo naj bi pri eksperimentalnih pogojih veljal turbulentni tokovni režim (prva meritev se nahaja še v prehodnem območju). $N \times t_m$ bi morali biti konstantni, vendar niso. Še najbolj konstantne vrednosti dobimo pri meritvah, kjer smo merili čas spremembe barve indikatorja. Zakaj vrednosti $N \times t_m$ pri metodi merjenja pH naraščajo in niso kot bi pričakovali konstantne natančno ne vemo. Najverjetneje smo pri meritvah časa pomešanja z merjenjem pH naredili kakšno napako.

Opazili smo tudi, da so števila moči za Rushtonovo turbino večja kot za propeler, posledično so vnosi moči za propeler manjši. Če primerjamo energije potrebne za doseganje zelene homogenosti opazimo, da je za mešanje bolj viskoznih tekočin (npr.: CMC) energijsko bolj primerna Rushtonova turbina še posebno pri daljših časih mešanja, medtem ko je poraba energije v nizko viskoznih medijih (voda) nižja za propeler.