ROK AKADEMICKI 2012/2013

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII CHEMICZNEJ I PROCESOWEJ

AUTOR: **Magdalena Bach**

PROMOTOR PRACY: **dr inż. Wojciech Orciuch**

# PRZEGLĄD METOD MODELOWANIA LEPKOŚCI ZAWIESIN

**CEL PRACY:** OPIS I KRYTYCZNA ANALIZA **METOD MODELOWANIA LEPKOŚCI ZAWIESIN** ORAZ SFORMUŁOWANIE WNIOSKÓW DOTYCZĄCYCH ICH WYKORZYSTANIA.

**ZAKRES PRACY:**

- ANALIZA POJĘCIA ZAWIESIN I ICH PODSTAWOWYCH WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNYCH
- PRZYBLIŻENIE MODELI REOLOGICZNYCH ZAWIESIN Z UWZGLĘDNIENIEM PODZIAŁU NA:
  - NEWTONOWSKĄ FAZĘ CIĄGŁĄ
  - NIENEWTONOWSKĄ FAZĘ CIĄGŁĄ
- ZASTOSOWANIE NUMERYCZNEJ MECHANIKI PŁYNÓW (ANG. COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS, CFD), WYKORZYSTUJĄCEJ METODY NUMERYCZNE DO ROZWIĄZYWANIA ZAGADNIEŃ PRZEPŁYWU ZAWIESIN

**NA PODSTAWIE DOŚWIADCZEŃ DOSTĘPNYCH W LITERATURZE MOŻNA STWIERDZIĆ, ŻE NA LEPKOŚĆ ZAWIESIN WPŁYWA LEPKOŚĆ FAZY CIĄGŁEJ ORAZ STĘŻENIE CZĄSTEK CIAŁA STAŁEGO, WRAZ Z KTÓREGO WZROSTEM LEPKOŚĆ WZRASTA.**

**REOLOGICZNE WŁAŚCIWOŚCI DANEJ ZAWIESINY** ZALEŻĄ W WIĘKSZOŚCI OD STĘŻENIA. W PRZYPADKU, GDY FAZA CIĄGŁA WYKAZUJE WŁAŚCIWOŚCI NEWTONOWSKIE, TO PRZY BARDZO MAŁYM STĘŻENIU FAZY ROZPROSZONEJ PŁYNY BĘDĄ MIAŁY RÓWNIEŻ TAKIE WŁAŚCIWOŚCI. NATOMIAST PRZY WZROŚCIE STĘŻENIA FAZY ROZPROSZONEJ ZACZYNAJĄ POJAWIAĆ SIĘ WŁAŚCIWOŚCI NIENEWTONOWSKIE ZAWIESINY, A TO POWODUJE POWIĘKSZAJĄCE SIĘ RÓŻNICE MIĘDZY LEPKOŚCIĄ FAZY CIĄGŁEJ I LEPKOŚCIĄ ZAWIESINY.

## MODELE REOLOGICZNE ZAWIESIN

### NEWTONOWSKA FAZA CIĄGŁA

1. **Równanie Einsteina –** jedno z pierwszych równań na lepkość zawiesiny, dla roztworów rozcieńczonych
$$\eta_r = 1 + \xi\varphi$$
2. **Model Mooney 'a** – uwzględnił interakcje cząstek i zróżnicowanie wielkości cząstek , dla roztworów bardziej stężonych
$$\eta_r = exp(\frac{\xi\varphi}{1-k\varphi})$$
3. **Model Dougherty'ego-Kriegera** – uwzględniono maksymalny udział objętościowy cząstek, analizując interakcje pomiędzy cząstkami sąsiednimi
$$\eta_r = [1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}]^{-[\eta]\varphi_m}$$
4. **Model Philipsa i współpracowników –** wzięto pod uwagę, oprócz zmiany lepkości, także zmianę częstości zderzeń cząstek.

CFD

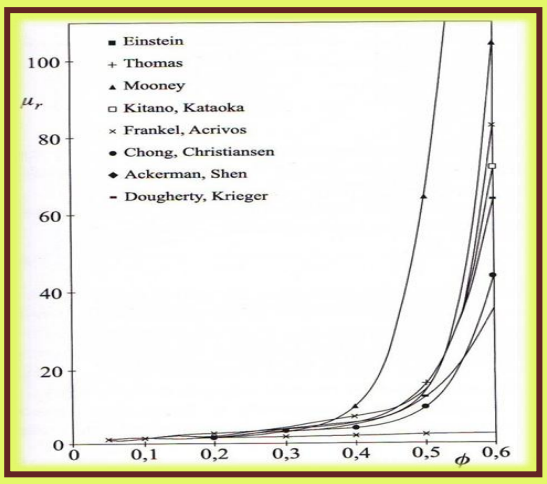
Numeryczna mechanika płynów (CFD) pozwala na cyfrowe rozwiązywanie równań tworzących dany model matematyczny procesu transportu. Analiza metodami CFD w przypadku przepływów wielofazowych jest stale w trakcie badań, w celu uzyskania zadawalającego opisu za pomocą modeli matematycznych, jednakże umożliwia otrzymanie rozwiązań z uwzględnieniem lepkości i ściśliwości. Dlatego też daje możliwość symulowania układów ciecz – ciało stałe.

### NIENEWTONOWSKA FAZA CIĄGŁA

1. Lepkość zawiesin wyznaczana jest najczęściej za pomocą jednego z trzech podstawowych modeli reologicznych.:

| Lp. | Autor | Model reologiczny | Parametry reologiczne modelu |
|---|---|---|---|
| 1 | Ostwald – de Waele | $\tau = k\dot{\gamma}^n$ | k [Pa•s$^n$]; n[-] |
| 2 | Bingham | $\tau = \tau_y + \eta_p\dot{\gamma}$ | $\tau_y$ [Pa]; $\eta_p$[Pa•s] |
| 3 | Herschel, Bulklay | $\tau = \tau_y + \eta_p\dot{\gamma}^n$ | $\tau_y$ [Pa]; $\eta_p$[Pa•s]; n[-] |

2. **Model Bachelora –** rozszerzył równanie Einsteina, dodając $c^2$, gdzie $c$ jest ułamkiem objętościowym.
$$\eta_r = 1 + \xi c + \alpha c^2$$
3. **Model Jastrzębskiego –** założył stałość parametru reologicznego $n$ tego modelu potęgowego
$$ln\frac{k^*}{k} = [\frac{2,5\varphi}{(1-K\varphi)}]^n$$
4. **Model Buyevicha i Kapbsova –** podający rozwiązanie dla dowolnego rozmiaru cząstek oraz dowolnego stężenia fazy stałej
Otrzymali asymptotyczne wyrażenie na względną lepkość badanej zawiesiny:
$$\frac{\eta_{zawiesiny}}{\eta_{fazy\ ciagłej}} = M(\varphi) = -Cln(1 - (\frac{\varphi}{\varphi^*})^{\frac{1}{3}})\ dla\ C = \frac{z\varphi^*}{2}\ dla\ (\varphi^* - \varphi) \ll \varphi^*$$
czyli dla φ -> $\varphi^*$ - bardzo stężone zawiesiny.
   - Dla dowolnego stężenia dla *Pe>>1*:
$$M_\infty = \frac{1}{(1-\varphi)^{5/2}} - C[ln(1 - (\frac{\varphi}{\varphi^*})^{\frac{1}{3}}) + \sum_{j=1}^{6}\frac{1}{j}(\frac{\varphi}{\varphi^*})^{\frac{j}{3}})]$$
   - Dla reżimu Browna, dla małych wartości $\dot{\gamma}$ -> *0* czyli dla *Pe<<1*
$$M_0 = \frac{1}{(1-\varphi)^{5/2}} + 1,3[\frac{1}{(1-\frac{\varphi}{\varphi^*})^2)} - \sum_{j=0}^{2}(1+j)(\frac{\varphi}{\varphi^*})^j)]$$

## GŁÓWNE WNIOSKI:

- **większość modeli dotyczy zawiesin cząstek ciała stałego z newtonowską fazą ciągłą; na równaniu Einsteina (dla roztworów rozcieńczonych), bazują kolejne modele reologiczne zawiesin, uwzględniające stężenia wyższe (Moonneya) – interakcje pomiędzy cząstkami i zróżnicowanie ich wielkości Analiza tych modeli (wykres obok) pozwala stwierdzić, iż dają one zadowalające i zbliżone wyniki dla zawiesin o stężeniach cząstek ciała stałego poniżej 20%, dla wyższych stężeń pomiędzy modelami dochodzi do znacznych rozbieżności.**
- **W przypadku modelowania lepkości zawiesin cząstek ciała stałego z nienewtonowską fazą ciągłą, opracowany został uniwersalny model Buyevicha i Kapbsova – współczesna teoria reologii zawiesin dla twardych cząstek kulistych, nieoddziałujących między sobą dla dowolnego stężenia fazy stałej i dowolnego rozmiaru cząstek.**