

# KARAKTER ALIRAN LARUTAN SIRUP

Fadilah<sup>1)</sup>, Elya Retna P<sup>2)</sup> dan Fetria W<sup>2)</sup>

Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik UNS

Jl. Ir. Sutami 36 A Kentingan Surakarta

**Abstract :** *Viscous fluids are often found in many chemical processes. These fluids show a deviation from Newton's law of viscosity and called non-Newtonian fluid. In this research, syrup has been treated as viscous fluid, and the characteristic of the flow has been studied. Research was conducted by flowing the syrup on a horizontally circular pipe with gravity force. At steady state the pressure drops were observed by measuring the difference height of fluid in manometer. Pressure drops were used to calculate the shear stresses and the shear rates were calculated by using the Rabinowitch's equation. It was found that the syrup was follows the Ostwald-de Waele model, eventhough it can be assumed as Newtonian fluid for simplification.*

**Key words :** *syrup, non Newtonian, shear stress, shear rate*

## Pendahuluan

Industri sirup cukup banyak terdapat di Indonesia dan beredar di pasaran dengan berbagai rasa dan merk. Sirup yang beredar kebanyakan berupa cairan kental, yang berarti mempunyai viskositas yang tinggi.

Viskositas adalah salah satu sifat fisis fluida yang sangat berpengaruh dalam perancangan peralatan industri, terutama industri kimia. Pengetahuan tentang viskositas dapat digunakan sebagai dasar untuk menentukan pola aliran fluida. Di samping itu viskositas juga penting untuk memperkirakan kebutuhan power motor pengaduk pada proses yang memerlukan pengadukan. Fluida yang kental biasanya memiliki sifat menyimpang dari karakteristik aliran fluida Newton dan disebut fluida non-Newtonian. Fluida non - Newtonian adalah fluida yang viskositasnya merupakan fungsi dari *shear stress* (tegangan geser) yang terjadi dalam fluida atau fungsi dari *shear rate* (gradien kecepatan).

Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian jenis pola aliran pada larutan sirup, sehingga karakterisasinya sebagai fluida non - Newtonian dapat diketahui. Jika karakterisasi fluida dapat diketahui diharapkan akan diperoleh data - data kuantitatif yang mendukung dalam perancangan pemipaan.

## Dasar Teori

Menurut hukum viskositas Newton, hubungan *shear stress* (tegangan geser ( $\tau_{yx}$ )) berbanding lurus dengan negatif *shear rate* (gradien kecepatan ( $dV_x/dy$ )). Konstanta yang menunjukkan perbandingan itu disebut viskositas, dan hubungan itu dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut (Bird, 1960) :

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dV_x}{dy} \dots\dots\dots (1)$$

Fluida yang mengikuti pola aliran seperti ini disebut fluida Newtonian, contoh fluida Newtonian antara lain gas murni, campuran gas, dan cairan murni dengan berat molekul rendah ( non polimer ) (Bird, 1960 ).

Fluida yang tidak mengikuti pola aliran di atas disebut fluida non-Newtonian. Untuk fluida non-Newtonian, viskositas adalah fungsi dari *shear rate*

Dengan kata lain, viskositas fluida non-Newtonian pada persamaan di atas tidak konstan pada kisaran *shear stress* dan *shear rate* yang dijumpai, tapi dapat bervariasi dengan faktor 100 atau lebih. Pengetahuan tentang bahan non-Newtonian dibahas dalam ilmu Reologi (Brodey, 1988 ).

Fluida non-Newtonian ini banyak dijumpai dalam proses industri kimia, seperti cat, slurry, suspensi padatan, kecap, sirup, saus, serta fluida -fluida yang memiliki berat molekul yang tinggi seperti polimer, baik dalam bentuk leburan maupun larutan.

Persamaan (1) di atas dapat digeneralisasi dengan persamaan yang baru yaitu :

$$\tau_{yx} = -\eta \frac{dV_x}{dy} \dots\dots\dots (2)$$

$\eta$  dapat dinyatakan sebagai fungsi  $\frac{dV_x}{dy}$  atau

$\tau_{yx}$ . Pada area dimana  $\eta$  menurun dengan meningkatnya *shear rate* disebut *fluida Pseudoplastic*, sedangkan pada area dimana  $\eta$  meningkat dengan meningkatnya *shear rate* disebut *fluida Dilatant*. Jika  $\eta$  bebas dari *shear rate* maka fluida tersebut adalah *fluida Newtonian*, dengan  $\eta = \mu$ . (Bird, 1960 )

Banyak persamaan empiris atau model-model yang diajukan untuk menggambarkan hubungan *shear stress* dan *shear rate* pada keadaan *steady state*. Lima model yang paling umum digunakan pada fluida non-Newtonian adalah model Bingham, model Otswald –de Waele, model Eyring, model Ellis, dan model Reiner – Philipof.

Dua model yang paling sering digunakan adalah

1. model Bingham,

$$\tau_{yx} = -\mu_0 \frac{dv_x}{dy} \pm \tau_0 \text{ jika } |\tau_{yx}| > \tau_0 \quad \dots (3)$$

$$\frac{dv_x}{dy} = 0 \text{ jika } |\tau_{yx}| < \tau_0 \quad \dots (4)$$

Bahan yang mengikuti dua parameter di atas disebut fluida Bingham plastic, bahan ini akan menjadi kaku ketika *shear stress* berkurang besarnya daripada yield stress  $\tau_0$  tapi mengalir seperti fluida Newtonian ketika *shear stress* melampaui  $\tau_0$ . Model ini cukup akurat untuk beberapa bahan campuran dan pasta.

2. model Otswald de Waele,

$$\tau_{yx} = -m \left| \frac{dv_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{dv_x}{dy} \quad \dots (5)$$

Dua parameter di atas juga dikenal sebagai *power law*. Untuk  $n = 1$ , persamaan diatas akan mengikuti hukum Newton tentang viskositas dengan  $m = \mu$ .

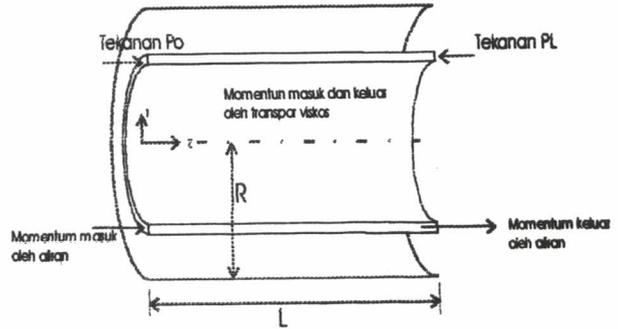
Jika  $n < 1$  maka sifat fluida tersebut adalah pseudoplastic.

Jika  $n > 1$  maka sifat fluida tersebut adalah dilatant.

Nilai *shear stress* dan *shear rate* dalam pipa pada percobaan ini dianalisis menggunakan neraca momentum yang mengambil asumsi-asumsi sebagai berikut:

1. fluida homogen,
2. fluida bersifat incompressible ( $\rho$  tetap),
3. aliran laminar ( $Re < 2100$ )
4. steady state
5. tidak ada slip di dinding pipa

Persamaan matematis disusun berdasarkan neraca momentum pada elemen volum  $2 \pi r L \Delta r$ , seperti pada gambar berikut



Gambar 1. Potongan silinder dimana neraca momentum dibuat untuk memperoleh profile kecepatan dan debit fluida

Neraca momentum pada elemen volum akan diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\tau_{rz} = \left( \frac{P_0 - P_L}{2L} \right) r \quad \dots (6)$$

kondisi batas pada  $r = R$  maka :

$$\tau_{rz} |_{r=R} = \tau_R = \left( \frac{P_0 - P_L}{2L} \right) R \quad \dots (7)$$

Didefinisikan debit fluida yang melewati elemen luas,  $r dr d\theta = dA$ , maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$dQ = V_z dA \quad \dots (8)$$

$$Q = -\pi \int_0^R r^2 \frac{dV_z}{dr} dr \quad \dots (9)$$

Dari persamaan (6) dan (7) akan diperoleh :

$$r = R \frac{\tau_{rz}}{\tau_R} \quad \dots (10)$$

persamaan (10) dimasukkan dalam persamaan (9) maka persamaannya menjadi :

$$Q \tau_R^3 = -\frac{\pi R^3}{3} \int_0^R \frac{dV_z}{dr} d(\tau_{rz}^3) \quad \dots (11)$$

Persamaan (11) dideferensialkan terhadap  $\tau_R$ , sehingga diperoleh :

$$\frac{d(Q \tau_R^3)}{d\tau_R} = -\frac{\pi R^3}{3} \frac{d}{d\tau_R} \int_0^R \frac{dV_z}{dr} d(\tau_{rz}^3) \quad \dots (12)$$

persamaan (12) diselesaikan secara analitis dengan metode Leibnitz, sehingga diperoleh :

$$\frac{dV_z}{dr} = \frac{1}{\pi R^3 \tau_R^2} \frac{d}{d\tau_R} (Q \tau_{RZ}^3) \quad \dots (13)$$

persamaan (13) dikenal sebagai persamaan Rabinowtisch (Bird, 1960)

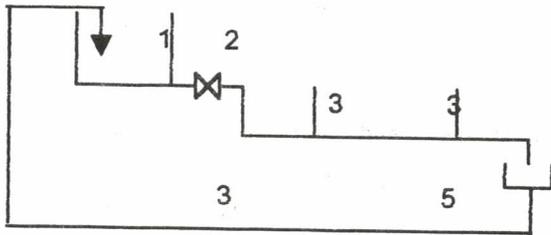
**Metode Penelitian**

**Bahan**

Bahan yang digunakan adalah larutan sirup.

**Alat**

Rangkaian alat percobaan dapat dilihat pada gambar 2.



Keterangan gambar :

- 1. Bak penampung
- 2. Valve
- 3. Manometer
- 4. Pipa kaca
- 5. Gelas ukur

Gambar 2. Gambar rangkaian alat percobaan

**Cara Kerja Penelitian**

Sirup ditempatkan pada bak penampung. Valve dibuka sehingga cairan keluar, mengalir melalui pipa. Setelah mencapai beda tinggi manometer yang ajeg, maka debit aliran diukur dengan cara mencatat waktu yang diperlukan untuk menampung sejumlah volume cairan dalam gelas ukur. Percobaan ini diulang-ulang untuk berbagai debit.

Data *pressure drop* yang diperoleh, dapat digunakan untuk menghitung *shear stress* pada dinding pipa ( $\tau_{rz}$ ) dengan persamaan (8). Kemudian dicari model persamaan yang tepat untuk menghubungkan  $Q \tau_{rz}^3$  sebagai fungsi  $\tau_{rz}$  untuk menentukan

nilai  $d \frac{(Q \tau_{rz}^3)}{d(\tau_{rz})}$ .

*Shear rate*  $\frac{dV_z}{dr}$  pada dinding pipa

dihitung menggunakan persamaan Rabinowitsch (13). Dari data-data *shear stress* dan *shear rate* pada cairan sirup dalam percobaan ini, dicoba menerapkan model hubungan *shear stress* dan *shear rate*

**Hasil Penelitian dan Pembahasan**

Percobaan dilakukan dengan cara mengukur debit sirup yang mengalir dalam pipa dan beda ketinggian pada kaki

manometer pada keadaan ajeg. Data percobaan ditampilkan pada tabel I.

Tabel I. Hubungan debit aliran sirup dengan beda ketinggian cairan pada kaki manometer

No	delta h ( $\Delta h$ )	Debit ( Q )
1	12,6	0,30
2	14,7	0,34
3	18,0	0,40
4	19,8	0,45
5	23,1	0,55
6	25,2	0,60
7	28,3	0,65
8	32,7	0,78
9	36,0	0,82
10	39,0	0,90
11	41,7	0,94

Densitas larutan sirup yang digunakan sebesar  $1,3546 \text{ gr/cm}^3$  dan diameter pipa kaca sebesar 0,3 cm. Data beda tinggi yang diperoleh dan densitas larutan sirup digunakan untuk menghitung *shear stress* pada dinding pipa ( $\tau_{rz}$ ) dengan persamaan ( 8 ), sehingga ( $(Q \tau_{rz}^3)$  data ) dapat dihitung. Kemudian dicari model persamaan yang tepat untuk menghubungkan  $Q \tau_{rz}^3$  sebagai fungsi  $\tau_{rz}$ . Model persamaan yang diperoleh yaitu :  $Q \tau_{rz}^3 = 0,0206 \tau_{rz}^{3,9894}$  ..... ( 14 ) dengan ralat rata-rata 2,0014 %

*Shear rate*  $(-\frac{dV_z}{dr})$  pada dinding pipa dihitung menggunakan persamaan Rabinowitsch (13). Nilai  $d \frac{(Q \tau_{rz}^3)}{d(\tau_{rz})}$  diperoleh dengan cara menurunkan persamaan ( 14 ) terhadap  $\tau_{rz}$  sehingga diperoleh  $d \frac{(Q \tau_{rz}^3)}{d(\tau_{rz})} = 0,08218 \tau_{rz}^{2,9894}$ . Hasil perhitungan  $-\frac{dV_z}{dr}$  dapat dilihat pada tabel II.

Tabel II. Hasil perhitungan  $d \frac{(Q\tau_{rz}^3)}{d(\tau_{rz})}$  dan  $-\frac{dV_z}{dr}$

$\tau_{rz}$ (data)	$d \frac{(Q\tau_{rz}^3)}{d(\tau_{rz})}$	$-\frac{dV_z}{dr}$
14.6457	250.9838	110.4135
17.0867	397.9058	128.6058
20.9224	728.9669	157.1381
23.0147	969.2828	172.6778
26.8505	1536.6751	201.1286
29.2914	1993.1719	219.2104
32.8947	2819.4739	245.8741
38.0091	4342.9794	283.6672
41.8449	5789.0861	311.9762
45.3320	7354.0837	337.6878
48.4703	8983.2378	360.8096

Dari data-data *shear stress* dan *shear rate* pada cairan sirup dalam percobaan ini, dicoba menerapkan model hubungan *shear stress* dengan *shear rate*.

**Model Newtonian**

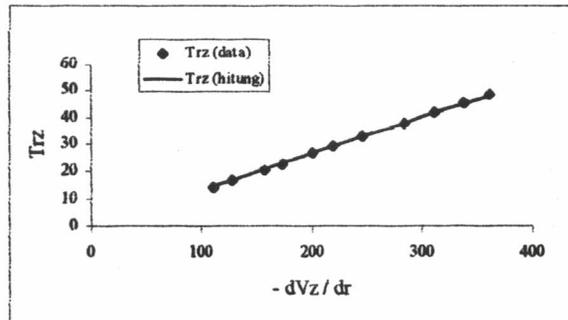
Perhitungan model ini dilakukan dengan cara mencari konstanta yang tepat yang menghubungkan  $\tau_{rz}$  sebagai fungsi

$\frac{dV_z}{dr}$  seperti pada persamaan (1). Konstanta

diperoleh dengan menggunakan cara *least squares* dengan menyamakan persamaan (1) dengan bentuk persamaan  $y=ax$ , dimana

$$y = \tau_{rz} \text{ dan } x = \frac{dV_z}{dr}$$

Dari cara *least squares* ini diperoleh harga  $a = 0,1339$ . Hasil perhitungan dengan persamaan yang diperoleh dapat dilihat gambar 3. Ralat yang diperoleh dengan model ini sebesar 0,3792 %.



Gambar 3. Grafik hubungan antara  $\tau_{rz}$  dan

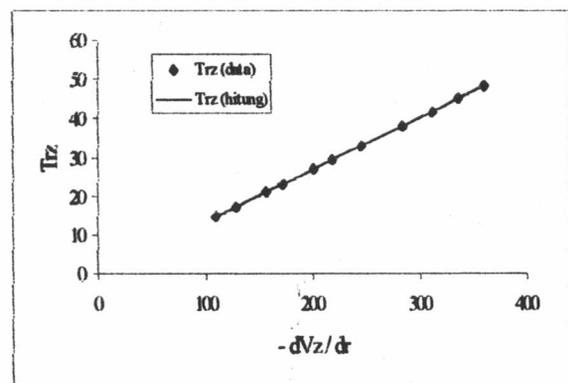
$$-\frac{dV_z}{dr} \text{ untuk metode Newtonian}$$

**Model Bingham**

Persamaan (3) digunakan untuk menguji data dengan model Bingham. Konstanta persamaan diperoleh dengan cara *least square*. Persamaan yang diperoleh yaitu

$$\tau_{rz} = 0,1351 * \frac{dV_z}{dr} - 0,3045 \dots\dots\dots(15)$$

Dari persamaan diketahui nilai konstanta – konstanta yaitu  $\mu_0 = 0,1351$  dan  $\tau_0 = - 0,3045$ . Hasil perhitungan gambar 4. Ralat rata-rata yang diperoleh dengan model ini sebesar 0,0625 %



Gambar 4. Grafik hubungan antara  $\tau_{rz}$  dan

$$-\frac{dV_z}{dr} \text{ untuk metode Bingham}$$

Dari persamaan (3) dan gambar grafik dapat dilihat bahwa  $-\frac{dV_z}{dr}$  bernilai positif sehingga nilai slope ( $\mu_0$ ) positif dan intercepnya ( $\tau_0$ ) juga bernilai positif, sedangkan dari perhitungan diperoleh nilai  $\mu_0$

= 0,1351 dan  $\tau_o = - 0,3045$  . Dari nilai konstanta – konstanta tersebut dapat diketahui bahwa larutan sirup tidak mengikuti fluida Bingham karena nilai  $\tau_o$  seharusnya bernilai positif.

**Model Ostwald – de Waele**

Persamaan (4) dibuat persamaan linier sehingga lebih mudah dalam perhitungan untuk mencari harga konstanta n dan m.

$$\ln \tau_{rz} = \ln -m + n \ln \left| \frac{dV_z}{dr} \right| \dots\dots(16)$$

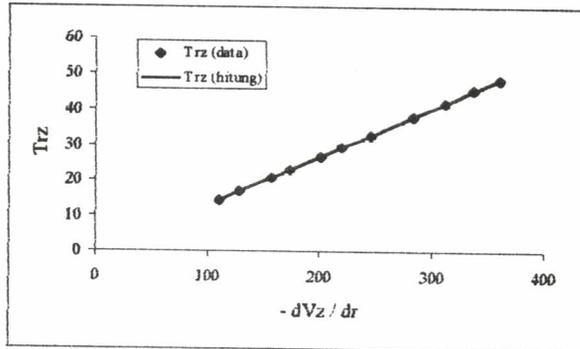
Persamaan diatas dapat dibuat grafik linier

hubungan antara  $\ln \tau_{rz}$  dan  $\ln \frac{dV_z}{dr}$  . Dengan

cara *least square* diperoleh persamaan untuk model Ostwald – de Waele yaitu

$$\ln \tau_{rz} = 1,0107 * \ln \frac{dV_z}{dr} - 2,0709 \dots\dots(17)$$

Nilai konstanta persamaan adalah n = 1,0107 dan m = 0,1261. Hasil perhitungan dengan metode ini dapat gambar 5. Ralat rata-rata dari model ini adalah 0,0268 %.



Gambar 5. Grafik hubungan antara  $\tau_{rz}$  dan  $-\frac{dV_z}{dr}$  untuk metode Ostwald-de Waele

Dari perhitungan di atas dapat diketahui bahwa larutan sirup adalah fluida yang mengikuti model Ostwald – de Waele karena konstanta n dan m yang diperoleh sesuai dengan persamaan (4) dan ralat rata – ratanya paling kecil dibanding dengan dua model yang lain. Namun demikian karena model Newtonian juga memberikan ralat yang relatif kecil, maka penyederhanaan dapat dilakukan dengan menganggap bahwa larutan mengikuti persamaan Newtonian.

Larutan sirup adalah fluida dilatant karena nilai konstanta n lebih dari satu. Fluida

dilatant menunjukkan meningkatnya viskositas seiring dengan meningkatnya *shear rate*.

**Kesimpulan**

Dari percobaan yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa larutan sirup merupakan fluida yang mengikuti model Ostwald – de Waele, dengan nilai n = 1,0107 dan nilai m = 0.1261

**Daftar Lambang**

- A area dimana shear stress bekerja (cm<sup>2</sup>)
- L panjang pipa (cm)
- P tekanan (atm)
- Q debit aliran (cm<sup>3</sup>/s)
- r jari – jari (cm)
- x koordinat kartesian
- y koordinat kartesian
- z koordinat kartesian
- Δ perbedaan (state 2 – state 1)
- μ viskositas ( g/m.s)
- π ratio keliling lingkaran dengan diameternya (3,14159...)
- ρ densitas (dyne/cm<sup>3</sup>)
- τ shear stress (dyne/cm<sup>2</sup>)
- V kecepatan alir fluida ( cm/s)

**Daftar Pustaka**

[1] Bird, R.B. ,Steward, W.E., and Ligtfoot ,E.N., , " *Transport Phenomena*", John Wiley and Sons, New York, 1960, pp. 5-15

[2] Brodkey, R.S., Hershey ,H.C., " *Transport Phenomena: A Unified Approach*", , Mc Graw-Hill Book Company, Singapore, 1988, pp .755-783.