

## **M6-010 Dinamika Instabilitas Antarmuka pada Proses “Fingering” dalam Aliran Fluida Viskos Melalui Celah Sempit**

**Harinaldi**

Laboratorium Mekanika Fluida  
Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia  
Kampus UI-Depok, Jawa Barat 16424  
E-mail : harinald@eng.ui.ac.id

### **ABSTRAK**

*Makalah ini melaporkan hasil penelitian eksperimental yang mengkaji pergerakan dan instabilitas dari antarmuka (interface) antara dua fluida yang tidak dapat saling bercampur dengan viskositas dan kerapatan yang berbeda yang mengalir melalui suatu celah sempit dalam sebuah geometri sel Hele-Shaw. Instabilitas bersumber dari gaya gravitasi (gravitational instability). Dua fluida tak bercampur yang digunakan sebagai model eksperimental ini adalah minyak pelumas SAE 30 ( $\mu = 0.105 \text{ N.s/m}^2$ ,  $\rho = 890 \text{ kg/m}^3$ ,  $T = 0.035 \text{ N/m}$ ) dan udara ( $\mu = 1.81 \times 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$ ,  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ ) dengan besar tegangan permukaan antarmuka kedua fluida  $T = 0.035 \text{ N/m}$ . Parameter yang pengujian adalah lebar celah sempit sebesar  $b = 0.8, 1.2$  dan  $1.5 \text{ mm}$  sedang kecepatan aliran diatur dengan mengatur kemiringan sel dengan sudut sebesar  $\alpha = 15^\circ, 45^\circ$  dan  $75^\circ$ . Aliran dalam sel Hele-Shaw yang terbentuk direkam dengan menggunakan sebuah video kamera CCD dan kemudian diolah dengan perangkat lunak pengolah citra untuk mengkuantifikasi parameter-parameter instabilitas. Hasil-hasil yang diperoleh menunjukkan antara lain interdependensi yang cukup signifikan dari besarnya sudut kemiringan dan lebar celah sempit pada proses instabilitas. Pada lebar celah yang konstan perubahan sudut kemiringan tidak secara signifikan mempercepat terbentuknya gelombang-gelombang instabilitas antarmuka aliran fluida. Sementara pada sudut kemiringan yang konstan, lebar celah yang semakin besar akan memperlambat pembentuk gelombang-gelombang instabilitas antarmuka.*

*Kata kunci: Fluida Viskos, Instabilitas antarmuka, Fingering, Sel Hele-Shaw*

### **1. Pendahuluan**

Aliran kompleks dari fluida Newtonian maupun non-Newtonian sangat penting artinya di bidang industri. Khususnya aliran fluida viskos yang melewati celah sempit sangat erat kaitannya dalam proses-proses industri seperti pada injection molding [1], rancangan peralatan display [2], dll. Sementara itu pada aplikasi aliran dua fase, perilaku aliran melalui celah sempit berkaitan erat dengan proses pemanasan kuasi-statis (quasi-static solidification) bahan polimer, deposisi elektrokimia, dan berbagai proses fisik lainnya. Salah satu karakteristik dasar yang terdapat pada aliran fluida viskos melalui celah sempit yang sangat berpengaruh pada performa proses-proses terapannya adalah timbulnya instabilitas antarmuka (interface instability) [3]. Teori linier instabilitas ini pada amplitudo gelombang antarmuka yang kecil telah dipahami dengan baik secara teoritis, namun demikian banyak efek-efek yang lebih detil masih belum tereksplorasi dengan baik. Hasil-hasil kajian terkini menunjukkan bahwa suatu antarmuka fluida yang mengalir melalui celah sempit, misalnya dalam sebuah geometri sel Hele-Shaw, mula-mula akan mengalami instabilitas sehingga beberapa panjang gelombang akan timbul di dalam celah sempit yang kemudian

berkembang menjadi sebuah struktur jari (*fingering*) yang besar dengan lebar kira-kira separuh dari lebar sel [4]. Kemudian, struktur-struktur jari ini dapat mengalami instabilitas derajat yang lebih tinggi (*higher order instability*) sehingga membentuk antarmuka yang sangat berubah dari kondisi awalnya [5]. Namun demikian, efek yang lebih rinci seperti itu belum dapat diprediksi secara teoritis, sehingga penjelasannya masih tergantung pada kajian numerik maupun eksperimental [6].

Dalam penelitian ini pergerakan dan instabilitas dari antarmuka (*interface*) antara dua fluida yang tidak dapat saling bercampur dengan viskositas dan kerapatan yang berbeda yang mengalir melalui suatu celah sempit dikaji secara eksperimental dalam sebuah apparatus sel Hele-Shaw. Instabilitas bersumber dari gaya gravitasi (gravitational instability). Dinamika instabilitas antar muka pada proses "fingering" kemudian dikuantifikasi dengan ukuran-ukuran: (1) waktu pemunculan struktur jari tunggal (*time of emergence of a single finger*), dan (2) lebar antarmuka (*interface width*) yang dinormalisasi dengan skala waktu (time scale),  $t^*$  dan skala panjang (length scale),  $l^*$ , yang merupakan fungsi dari besarnya tegangan permukaan antarmuka ( $T$ ), perbedaan kerapatan ( $\Delta\rho$ ), viskositas masing-masing fluida ( $\mu_1$  dan  $\mu_2$ ), sudut kemiringan ( $\alpha$ ) dan lebar celah sempit ( $b$ ). Granger [7] menunjukkan secara teoritis pada ketidakstabilan gaya tarik pada antarmuka minyak dan udara skala panjang dan skala waktu yang tepat untuk normalisasi tersebut menurut persamaan-persamaan berikut:

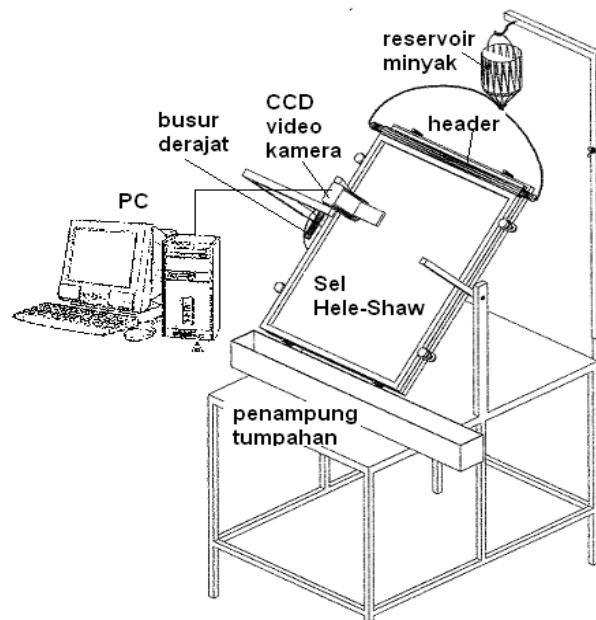
$$\ell^* = 2\pi\sqrt{3} \left[ \frac{T}{g \sin \alpha \Delta \rho} \right]^{1/2} \quad (1)$$

dan

$$t^* = 2\pi\sqrt{3} \frac{12(\mu_1 + \mu_2)T^{1/2}}{(g \sin \alpha \Delta \rho)^{3/2} b^2} \quad (2)$$

## 2. Metode Eksperimen

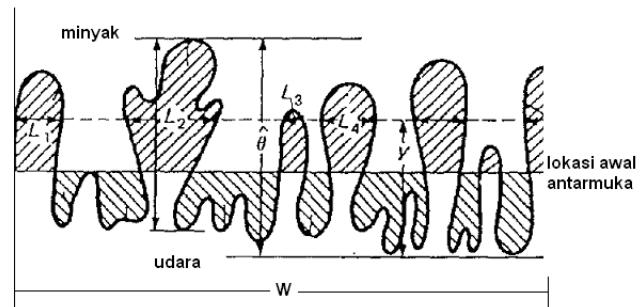
Eksperimen dilakukan dalam sebuah sel Hele-Shaw di Laboratorium Mekanika Fluida Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1. Sel Hele-Shaw yang digunakan berukuran 80 x 60 cm, terbuat dari dua buah kaca datar setebal 8 mm yang tersusun paralel pada jarak tertentu sehingga membentuk laluan celah sempit.



Gambar 1. Aparatus Sel Hele-Shaw

Dua fluida tak bercampur yang digunakan sebagai model eksperimental ini adalah minyak pelumas SAE 30 ( $\mu = 0.105 \text{ N.s/m}^2$ ,  $\rho = 890 \text{ kg/m}^3$ ,  $T = 0.035 \text{ N/m}$ ) dan udara ( $\square = 1.81 \times 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$ ,  $\square = 1.2 \text{ kg/m}^3$ ) dengan besar tegangan permukaan antarmuka kedua fluida  $T = 0.035 \text{ N/m}$ . Dalam eksperimen, sel Hele-Shaw dipasang pada posisi tegak dengan kemiringan tertentu sehingga aliran fluida di dalamnya bergerak hanya akibat gaya gravitasi. Parameter yang pengujian adalah lebar celah sempit sebesar  $b = 0.8, 1.2$  dan  $1.5 \text{ mm}$  sedang kecepatan aliran diatur dengan mengatur kemiringan sel dengan sudut sebesar  $\square = 15^\circ, 45^\circ$  dan  $75^\circ$ . Aliran dalam sel Hele-Shaw yang terbentuk kemudian direkam dengan menggunakan sebuah video kamera CCD yang berfungsi ganda sebagai alat visualisasi dan juga pencatat waktu. Gambar yang diperoleh kemudian diolah dengan perangkat lunak pengolah citra (image processing software) yang dapat digunakan untuk mengukur dimensi geometris dari instabilitas antarmuka yang terjadi.

Untuk mengukur waktu pemunculan sebuah struktur jari tunggal, dapat dilakukan dengan membuat plot perkembangan masing-masing gangguan antar muka  $\theta$  sebagai fungsi waktu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Dari plot ini dapat ditentukan saat masing-masing gelombang berhenti berkembang. Pada saat awal seluruh gelombang ( $N$ ) berkembang, kemudian selang beberapa saat ( $t_1$ ), satu gelombang berhenti berkembang dan hanya  $N - 1$  gelombang-gelombang terus tumbuh. Proses ini berulang-ulang sehingga akhirnya gelombang yang ke- $(N-n)$  berhenti tumbuh pada saat  $t_n$ .



Gambar 2. Perkembangan antarmuka pada sel Hele-Shaw

Sementara itu terdapat beberapa alternatif definisi dalam penetapan lebar antarmuka yang merupakan lebar sel dalam arah  $y$  yang telah terkontaminasi oleh keberadaan antarmuka. Salah satunya adalah lebar total antarmuka ( $\hat{\theta}$ ) yang merupakan kuantitas yang penting yang dapat diplot sebagai  $\hat{\theta} / l^*$  terhadap  $t/t^*$ . Lebih lanjut lagi, distribusi relatif dari minyak dan udara di dalam antarmuka dapat ditentukan dengan menggambarkan garis lurus pada berbagai posisi  $y$  dan menjumlahkan seluruh panjang yang berada di dalam daerah yang terisi udara ( $\square L_i$ ) dalam Gambar 2. Jumlah panjang ini kemudian dinormalisasi terhadap lebar sel ( $W$ ) dan diplot sebagai fungsi dari  $y/\hat{\theta}$ .

### 3. Hasil dan Diskusi

#### 3.1 Visualisasi Pembentukan "Fingering"

Salah satu contoh hasil visualisasi proses pembentukan "fingering" akibat instabilitas antarmuka ditunjukkan pada Gambar 3. Rekaman video diambil pada kondisi eksperimen dengan lebar celah sel 0,8 mm dan sudut kemiringan sel  $15^\circ$ . Rangkaian gambar yang ditunjukkan berselang waktu 15 detik.



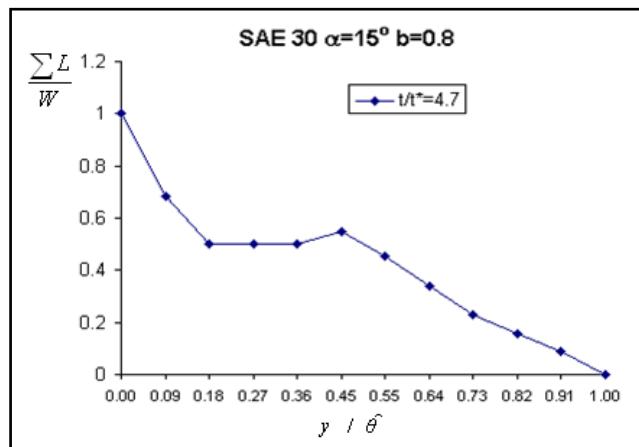
Gambar 3. Pembentukan "fingering" pada instabilitas antarmuka ( $b = 0,8$  mm;  $\alpha = 15^\circ$ ; arah aliran dari kanan ke kiri)

Dari Gambar 3, terlihat bahwa sampai  $t = 20$  s, aliran minyak mula-mula akan mengalami instabilitas antarmuka sehingga beberapa panjang gelombang mulai timbul di dalam sel.

Selanjutnya instabilitas ini berkembang menjadi sebuah struktur jari (*fingering*) yang besar dengan lebar kira-kira separuh dari lebar sel. Pada  $t = 95$  s terlihat bahwa struktur-struktur jari ini mengalami instabilitas derajat yang lebih tinggi (*higher order instability*) sehingga membentuk antarmuka yang sangat berubah dari kondisi awalnya seperti yang juga diindikasikan oleh Ruith dan Meiburg [5].

### 3.2 Penyebaran Relatif Minyak - Udara pada Antarmuka

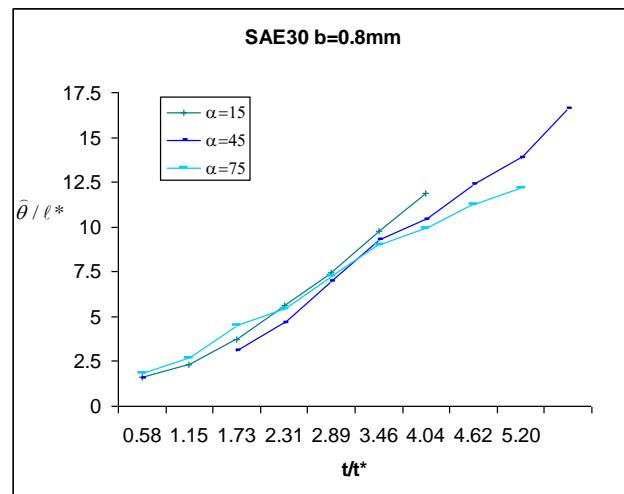
Karakteristik penyebaran relatif minyak-udara pada antarmuka diwakili oleh hasil pengukuran pada  $\alpha = 15^\circ$  dan  $b = 0,8$  mm. Dengan menggunakan Persamaan (1) dan (2) diperoleh  $t^* = 37,4$  s dan  $l^* = 0,043$  cm. Pada Gambar 4 ditunjukkan pola penyebaran relatif minyak-udara pada  $t/t^* = 4.7$ . Dari gambar terlihat bahwa penyebaran minyak-udara relatif cepat. Instabilitas antarmuka pada kondisi ini mengindikasikan bahwa udara pada sisi bawah mengalami tekanan oleh minyak yang ada diatasnya sehingga udara cenderung untuk bergerak lebih lambat keatas sedangkan minyak cenderung bergerak lebih cepat kebawah oleh tarikan gravitasi. Hal ini terlihat dari panjang total antarmuka yang terisi udara ( $\square L/W$ ) segera turun cukup signifikan pada posisi  $y/\hat{\theta} > 0,45$ . Walaupun tidak ditunjukkan di sini, pengolahan gambar untuk kondisi-kondisi eksperimen yang lain menunjukkan kecenderungan yang serupa.



Gambar 4. Penyebaran minyak dan udara pada SAE30 dengan sudut kemiringan  $\alpha = 15^\circ$  dan lebar celah  $b=0.8$  mm

### 3.3 Pengaruh Kemiringan Sel

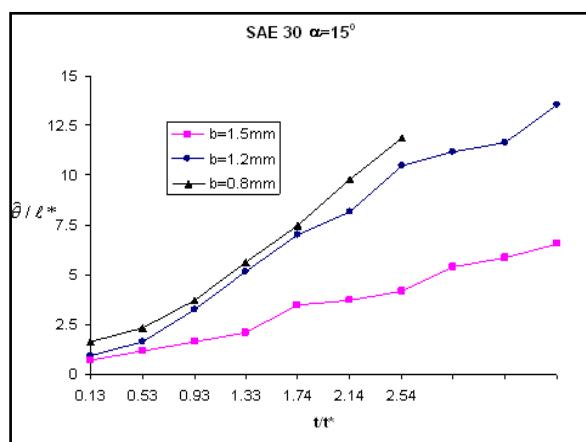
Pengaruh kemiringan sel terhadap kecepatan pertumbuhan distorsi instabilitas antarmuka pada proses “*fingering*” ditunjukkan diwakili oleh Gambar 5 yang menunjukkan hubungan antara lebar antar muka ternormalisasi dengan waktu pertumbuhan ternormalisasi untuk  $b = 0.8$  mm dan sudut kemiringan  $\alpha = 15^\circ$ ,  $45^\circ$  dan  $75^\circ$ . Dari gambar terlihat bahwa untuk ketiga sudut kemiringan slope masing-masing plot menunjukkan kecenderungan yang sama. Dalam kisaran deviasi yang masih dalam batas error eksperimen, ketiga plot cenderung dapat dikatakan menjadi satu plot. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh kemiringan sel terhadap kecepatan instabilitas/distorsi antar muka yang tidak begitu signifikan.



Gambar 5. Plot  $\hat{\theta} / l^*$  terhadap  $t/t^*$  untuk  $b = 0,8$  mm pada tiga sudut kemiringan sel yang berbeda.

### 3.4 Pengaruh Lebar Celah Sel

Pengaruh lebar celah sel terhadap kecepatan pertumbuhan distorsi instabilitas antarmuka pada proses “fingering” ditunjukkan diwakili oleh Gambar 6 yang menunjukkan hubungan antara lebar antar muka ternormalisasi dengan waktu pertumbuhan ternormalisasi untuk  $\alpha = 15^\circ$  dan lebar celah  $b = 0,8$ , 1,2 dan 1,5 mm. Dari gambar terlihat bahwa untuk ketiga lebar celah kemiringan slope masing-masing plot menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa lebar celah sel pengaruh cukup kuat terhadap kecepatan instabilitas/distorsi antar muka yang terjadi. Dari nilai slope ketiga plot didapati bahwa pada sudut kemiringan yang konstan, lebar celah yang semakin besar akan memperlambat pembentukan gelombang-gelombang instabilitas antarmuka.



Gambar 6. Plot  $\hat{\theta} / l^*$  terhadap  $t/t^*$  untuk  $\alpha = 15^\circ$  pada tiga lebar celah sel yang berbeda.

## 4. Kesimpulan

Dinamika instabilitas antarmuka pada proses “fingering” dalam aliran fluida viskos melalui celah sempit telah diteliti secara eksperimental. Hasil-hasilnya menunjukkan interdependensi yang cukup signifikan dari besarnya sudut kemiringan dan lebar celah sempit pada proses instabilitas.

# Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

---

***Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009***

Pada lebar celah yang konstan perubahan sudut kemiringan tidak secara signifikan mempercepat terbentuknya gelombang-gelombang instabilitas antarmuka aliran fluida. Sementara pada sudut kemiringan yang konstan, lebar celah yang semakin besar akan memperlambat pembentukan gelombang-gelombang instabilitas antarmuka.

## **Daftar Pustaka**

- [1] Hieber, C. A. in A. I. Isayev, ed., *Injection and Compression Molding Fundamentals*. (1987) Marcel Dekker, New York.
- [2] Van Doorn, C. Z., J. Appl. Phys. 46, (1975) 3738-3744
- [3] Kondic, L., Peter Palffy-Muhoray, P.P, Shelley, M.J., *Models of non-Newtonian Hele-Shaw flow*. J. Phys. Rev. 54, (1996), 4536-4539
- [4] Maxworthy, T., *The Non-Linear Growth of a Gravitationally Unstable Interface in a Hele-Shaw Cell*. J. Fluid Mech., 177 (1987), 207-232
- [5] Ruith, M, Meiburg, E., *Miscible rectilinear displacement with gravity override. Part 1: Homogeneous porous medium*. J. Fluid Mech., 420 (2000), 225-232
- [6] Chen, C.Y., Liu, Y.C, *Numerical simulations of miscible rotating Hele-Shaw flows*. The 14<sup>th</sup> Int. Symp. On Transport Phen. Bali, Indonesia (2003) 47-52
- [7] Granger, R.A ., *Experiments in Fluid Mechanics*. (1988) Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York