

## Pengaruh *Contact Angle* Terhadap Pembentukan *Droplet* dengan Menggunakan Simulasi CFD

Mohammad Azis Mahardika, M. Pramuda Nugraha Sirodz, dan Fery Hidayat

Teknik Mesin Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

Jl. PHH. Mustafa No.23 Bandung 40124

e-mail : [m.aziz.mahardika@itenas.ac.id](mailto:m.aziz.mahardika@itenas.ac.id)

*Received 18 November 2023 | Revised 23 Desember 2023 | Accepted 21 Januari 2024*

### ABSTRAK

Penelitian mengenai pembentukan droplet merupakan salah satu topik penting dan dalam 10 tahun terakhir mengalami perkembangan yang cukup pesat pada penelitian ini, dilakukan simulasi dengan menggunakan model volume of fluid (VOF) untuk menganalisis pengaruh sudut kontak terhadap pembentukan droplet. Geometri yang digunakan adalah tipe T-Junction dengan menggunakan fluida air dan oli. Melalui variasi kontak sudut maka diperoleh hasil dengan kondisi kecepatan air 0.001 m/s dan oli sebesar 0.0002 m/s, droplet terbentuk pada kondisi sudut kontak sebesar 135°, hal ini dikarenakan air memasuki saluran oli sehingga menyebabkan lapisan oli menjadi tipis pada bagian percabangan dan seiring berjalanya waktu lapisan tersebut putus dan menghasilkan droplet. Mekanisme pembentukan droplet adalah pemisahan fase, pembentukan droplet, dan pelepasan droplet.

**Kata kunci:** droplet, CFD, Microfluidic, T-Junction

### ABSTRACT

*Research on droplet formation is one of the important topics and in the last 10 years has developed quite rapidly in this study, simulations were carried out using the volume of fluid (VOF) model to analyze the effect of contact angle on droplet formation. The geometry used is the T-Junction type using water and oil fluids. Through variations in contact angle, the results obtained under the condition of water velocity of 0.001 m/s and oil of 0.0002 m/s, droplets are formed at a contact angle of 135°, this is because water enters the oil channel causing the oil layer to become thin in the branching section and over time the layer breaks up and produces droplets. The mechanism of droplet formation is phase separation, droplet formation, and droplet release.*

**Key words:** droplet, CFD, Microfluidic, T-Junction.

## 1. Pendahuluan

Penelitian mengenai pembentukan *droplet* merupakan salah satu topik penting dan dalam 10 tahun terakhir mengalami perkembangan yang cukup pesat. Salah satu aplikasinya adalah pada bidang biologi dimana *droplet* menjadi media untuk memproses molekul/sel. Proses pembentukan *droplet* menjadi sangat penting dimana perlu dilakukan kontrol terhadap bentuk dan ukuran dari *droplet* karena berpengaruh pada sifat kimia dan biologi dari partikel yang terbentuk. Proses ini dilakukan dengan menggunakan alat *microfluidic* [1].

Salah satu aplikasi alat *microfluidic* digunakan untuk menghasilkan *droplet* yang digunakan untuk proses *additive manufacturing* [2], pembuatan material khusus yang memiliki komposisi yang seragam [3]. Alat *microfluidic* memiliki karakteristik dimana ukurannya yang sangat kecil dan juga kecepatannya yang rendah, menyebabkan tidak adanya turbulensi akibat bilangan Reynold yang sangat kecil [4]. Sehingga, diperlukan mekanisme untuk membentuk *droplet* pada kondisi ini.

Alat *microfluidic* memiliki berbagai macam bentuk dan mekanisme untuk menghasilkan *droplet*. Bentuk yang sering digunakan adalah *T-junction*, *Y-junction*, dan *cross-junction* [5], [6]. Bentuk *T-junction* merupakan bentuk yang paling banyak digunakan untuk menghasilkan *droplet* dikarenakan bentuknya yang sederhana [7]. Selain bentuk, pembentukan *droplet* juga dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti, sudut kontak fluida, sifat-sifat fluida, dan kondisi operasi fluida [8], [9].

Sudut kontak memiliki peran penting dalam proses pembentukan *droplet*. Sudut kontak yang kecil menyebabkan fluida menempel pada dinding sehingga menyebabkan *droplet* tidak terbentuk [10]. Selain itu, kecepatan juga menjadi salah satu parameter untuk memisahkan *droplet* dari sumbernya [11], [12].

Pada saat ini, simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) telah menjadi alat yang penting dalam memahami dan memprediksi perilaku fluida, termasuk pembentukan *droplet* [13], [14], [15]. Dengan menggunakan pendekatan simulasi CFD, kita dapat menginvestigasi bagaimana sudut kontak mempengaruhi dinamika aliran dan pembentukan *droplet* pada skala mikroskopis.

Dalam penelitian ini, kami bertujuan untuk menyelidiki pengaruh sudut kontak terhadap pembentukan *droplet* menggunakan simulasi CFD. Dengan memanfaatkan teknik simulasi ini, analisis dan pemahaman yang lebih dalam tentang interaksi antara cairan dan substrat serta bagaimana hal tersebut memengaruhi karakteristik *droplet* yang terbentuk dapat diketahui. Penelitian ini tidak hanya memiliki implikasi penting dalam bidang industri, tetapi juga memberikan wawasan baru dalam pengembangan teknologi yang berbasis pada pengendalian pembentukan *droplet*.

## 2. Metodologi

Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Ansys. Model yang digunakan adalah Eulerian multiphase volume of fluid (VOF) dikarenakan terdapat dua fluida yang digunakan yaitu air dan oil yang memiliki sifat tidak dapat tercampur (*immiscible*). Model ini digunakan untuk mensimulasikan interface antar fluida dimana pada pembentukan *droplet interface* menjadi parameter penting didalamnya.

Persamaan yang digunakan pada model ini adalah :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_w \rho_w) + \nabla \cdot (\alpha_w \rho_w \vec{v}_w) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_o \rho_o) + \nabla \cdot (\alpha_o \rho_o \vec{v}_o) = 0$$

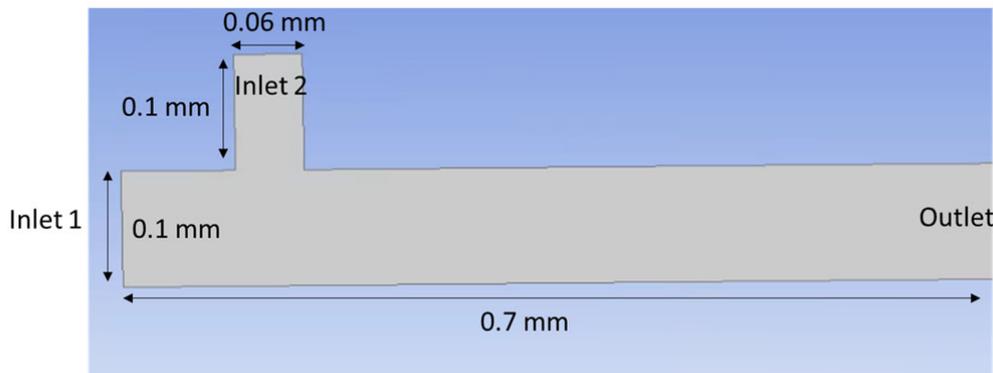
dimana  $\rho$ ,  $\rho_w$ ,  $\rho_o$ ,  $\vec{V}$ ,  $\vec{v}_w$ ,  $\vec{v}_o$ ,  $p$ ,  $\vec{g}$ ,  $\mu$ ,  $\alpha_w$ ,  $\alpha_o$ , dan  $\vec{F}$  adalah massa jenis campuran, massa jenis air, massa jenis oli, kecepatan campuran, kecepatan air, kecepatan oli, tekanan, gravitasi, viskositas, fraksi volume air, fraksi volume oli, dan gaya interfasial, secara berurutan.

Pada penelitian ini, sifat fluida dibuat konstan seperti viskositas, tegangan permukaan, dan massa jenis, sehingga pengaruh sudut kontak terhadap pembentukan *droplet* dapat diketahui. Sudut kontak fluida divariasikan dari 0°, 45°, 90°, 135°, dan 180°, sedangkan sifat-sifat fluida ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Sifat fluida

Sifat fluida	Air	Oli
Massa jenis (kg/m <sup>3</sup> )	998.2	1000
Viskositas (kg/ms)	0.001	0.0067
Tegangan permukaan (N/m)	0.005	0.005

Model yang digunakan adalah *T-junction* dengan dimensi ditunjukkan seperti pada Gambar 1. Selain itu, kondisi batas yang digunakan pada simulasi ditunjukkan oleh Tabel 2. Inlet 1 adalah masuknya air dengan kecepatan 0.01 m/s dan Inlet 2 adalah tempat masuknya oli dengan kecepatan yang lebih rendah yaitu 0.002 m/s. Simulasi dilakukan dengan asumsi tidak ada slip yang terjadi di dinding. Metoda simulasi yang digunakan adalah *Coupled* untuk memecahkan persamaan tekanan, kontinuitas, dan momentum. Selanjutnya, dipilih PRESTO untuk metoda interpolasi tekanan dan persamaan upwind orde dua digunakan untuk memecahkan persamaan transport.



**Gambar 1.** Dimensi *T-junction* dan kondisi batas

**Tabel 2.** Kondisi batas

Kondisi batas	Nilai
Inlet 1	Air
Inlet 1	Velocity inlet
Inlet 1	0.01 m/s
Inlet 2	Oli
Inlet 2	0.002 m/s
Inlet 2	Velocity inlet
Outlet	Pressure Outlet

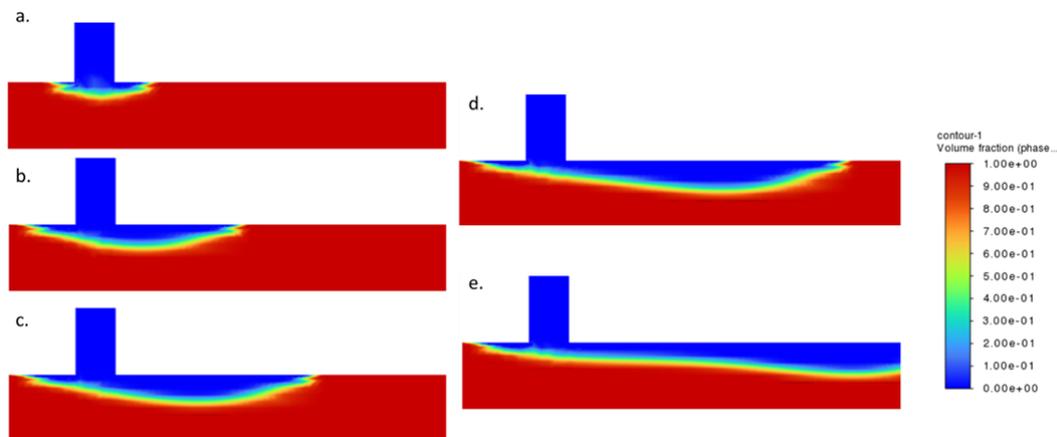
Simulasi dilakukan dengan kondisi transient untuk melihat proses dinamika yang terjadi dalam

pembentukan *droplet*. *Time step* yang digunakan adalah  $5 \times 10^{-5}$  s dan iterasi untuk tiap *time step* adalah 40 iterasi. Simulasi dilakukan sampai oli keluar di outlet.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Kontak sudut $0^\circ$

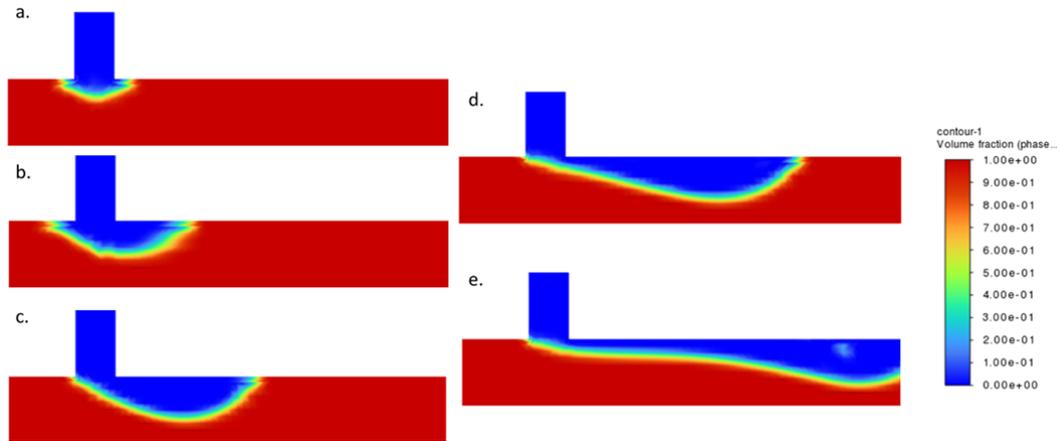
Hasil simulasi ketika sudut kontak sebesar  $0^\circ$  ditunjukkan pada Gambar 2. Warna merah menunjukkan fasa dari air sedangkan warna biru menunjukkan fasa dari oli. Sudut kontak  $0^\circ$  mengindikasikan bahwa dinding memiliki sifat *fully oil wet*, yang artinya oli lebih mudah menempel pada dinding jika dibandingkan dengan air. Hal ini menyebabkan tidak ada *droplet* yang terjadi dikarenakan oli menyebar melalui dinding. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2a dimana ketika oli masuk melalui T-junction, oli bergerak dengan cara menempel pada dinding (Gambar 2b & 2c). Hal ini berlanjut sampai akhir simulasi dimana tidak ada *droplet* yang terbentuk.



**Gambar 2** Hasil simulasi pada T-junction antara air dan oli dengan sudut kontak  $0^\circ$  pada *timestep* yang berbeda. a) 45, b) 75, c) 100, d) 125, e) 160

#### 3.2. Kontak sudut $45^\circ$

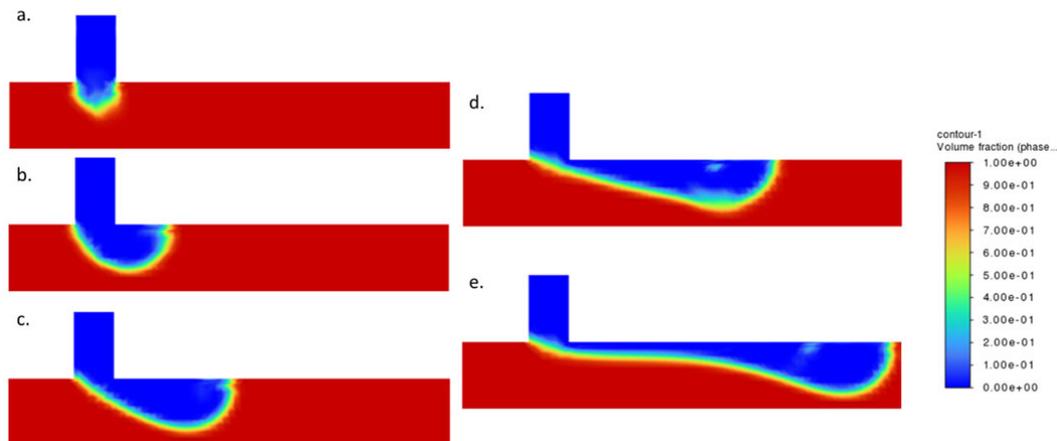
Hasil simulasi ketika sudut kontak sebesar  $45^\circ$  ditunjukkan pada Gambar 3. Sudut kontak  $45^\circ$  mengindikasikan bahwa dinding memiliki sifat *oil wet*, yang artinya oli lebih mudah menempel pada dinding jika dibandingkan dengan air namun tidak semudah ketika sudut kontak sebesar  $0^\circ$ . Hal ini menyebabkan penyebaran oli pada dinding berkurang jika dibandingkan dengan proses simulasi sebelumnya (sudut kontak sebesar  $0^\circ$ ). Masih belum ada *droplet* yang terjadi diakibatkan ketika oli masuk melalui T-junction, oli bergerak dengan cara menempel pada dinding (Gambar 3b & 3c). Hal ini berlanjut sampai akhir simulasi dimana tidak ada *droplet* yang terbentuk, namun terlihat pada bagian outlet bentuk dari oli berbentuk cembung dikarenakan penyebaran oli di dinding semakin berkurang (Gambar 3d).



**Gambar 3** Hasil simulasi pada T-junction antara air dan oli dengan sudut kontak  $45^\circ$  pada *timestep* yang berbeda. a) 45, b) 75, c) 100, d) 125, e) 160

### 3.3. Kontak sudut $90^\circ$

Hasil simulasi ketika sudut kontak sebesar  $90^\circ$  ditunjukkan pada Gambar 4. Sudut kontak  $90^\circ$  mengindikasikan bahwa dinding memiliki sifat *neutral wet*, yang artinya oli dan air memiliki preferensi yang sama untuk menempel pada dinding. Hal ini menyebabkan penyebaran oli pada dinding semakin berkurang jika dibandingkan dengan proses simulasi sebelumnya (sudut kontak sebesar  $45^\circ$ ), namun masih belum terbentuk *droplet* pada kondisi ini. Oli masuk melalui T-junction, dan jika dibandingkan dengan kondisi sebelumnya, tidak ada oli yang bergerak ke kiri dengan menempel di dinding, hal ini dikarenakan preferensi oli untuk menempel di dinding sama dengan air. Oli bergerak menuju outlet dengan bentuk cembung (Gambar 4b & 4c) dikarenakan semakin kecil oli yang menempel di dinding. Hal ini berlanjut sampai akhir simulasi dimana tidak ada *droplet* yang terbentuk, namun terlihat pada bagian outlet bentuk dari oli berbentuk semakin cembung dikarenakan penyebaran oli di dinding semakin berkurang (Gambar 4d).

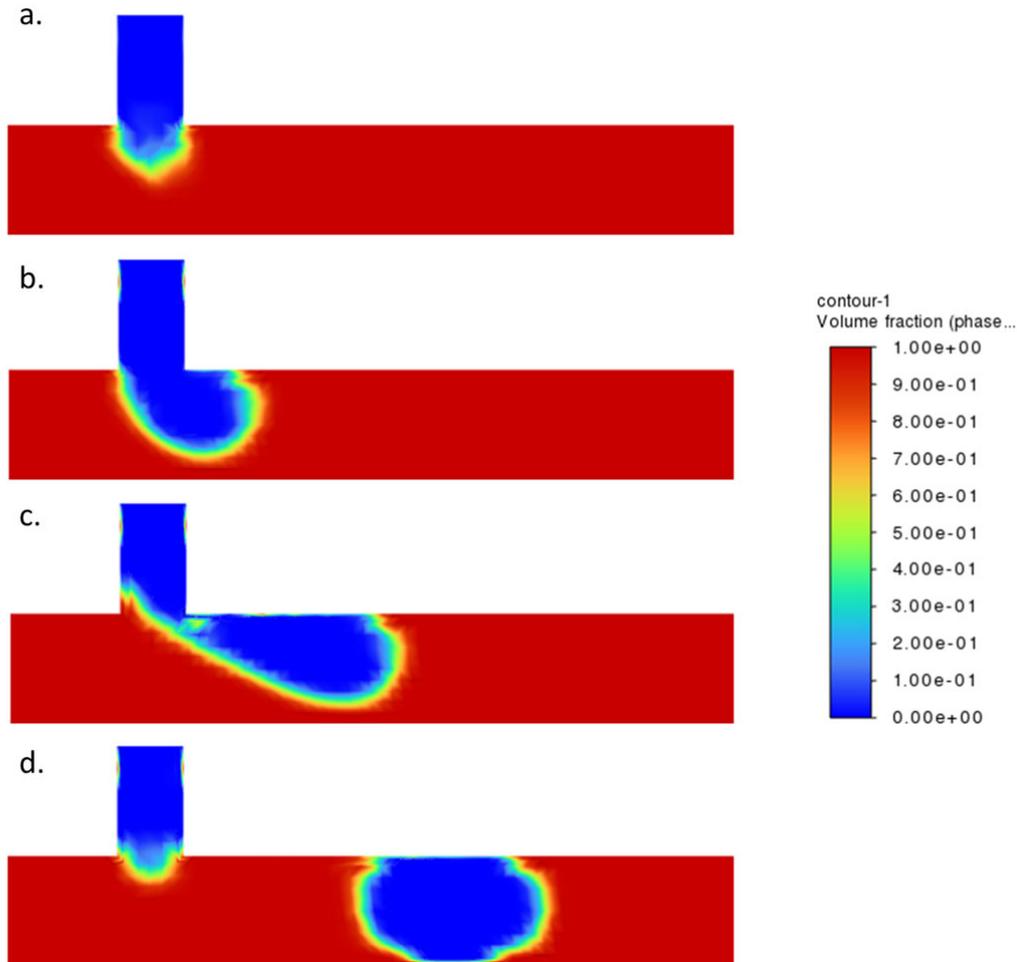


**Gambar 4** Hasil simulasi pada T-junction antara air dan oli dengan sudut kontak  $90^\circ$  pada *timestep* yang berbeda. a) 45, b) 75, c) 100, d) 125, e) 160

### 3.4. Kontak sudut $135^\circ$

Hasil simulasi ketika sudut kontak sebesar  $135^\circ$  ditunjukkan pada Gambar 5. Sudut kontak  $135^\circ$  mengindikasikan bahwa dinding memiliki sifat *water wet*, yang artinya air memiliki preferensi yang lebih besar untuk menempel pada dinding. Hal ini menyebabkan penyebaran oli pada dinding semakin berkurang jika dibandingkan dengan proses simulasi sebelumnya sehingga menyebabkan *droplet* terbentuk pada kondisi ini. Oli masuk melalui T-junction, dan

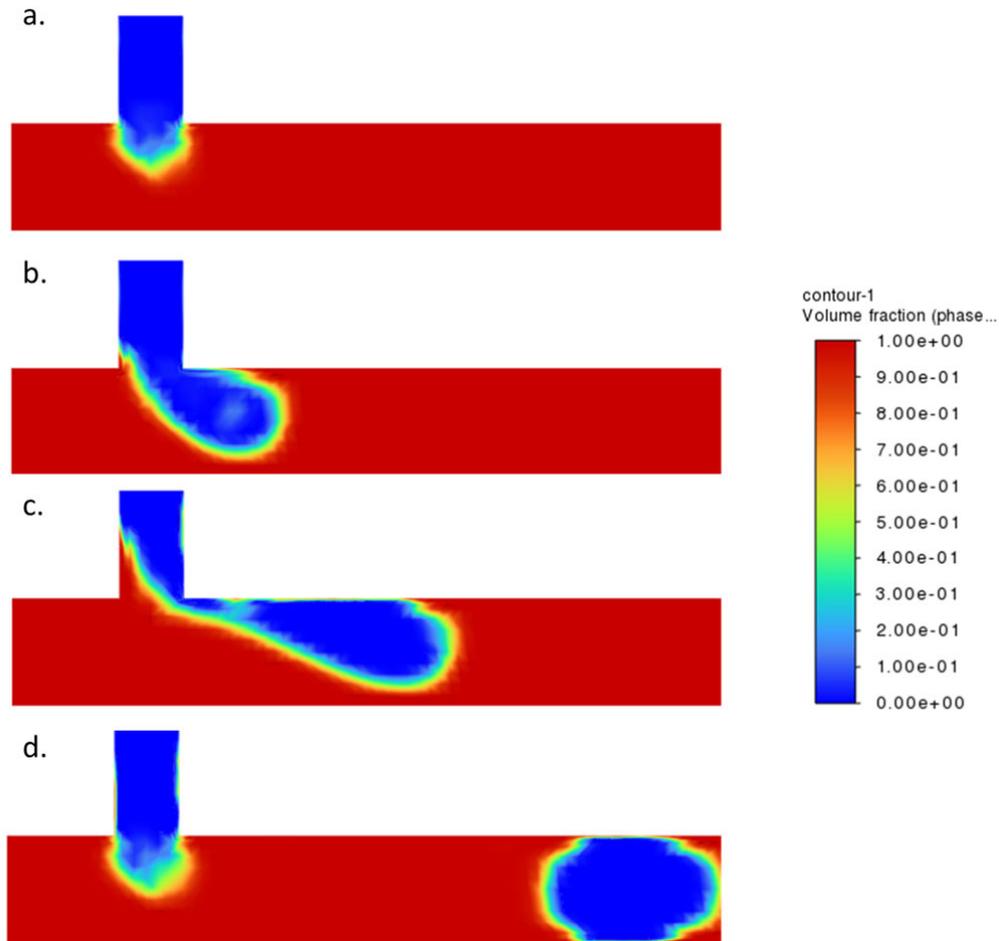
dikarenakan air mudah menempel ke dinding, maka sebagian air masuk ke dalam saluran oli di percabangan T-junction (Gamabr 5c), sehingga menyebabkan lapisan oli menjadi tipis. Lapisan ini menjadi semakin tipis seiring dengan berjalanya waktu dan terputus ketika oil mencapai jarak tertentu (Gambar 5d).



**Gambar 5** Hasil simulasi pada T-junction antara air dan oli dengan sudut kontak  $135^\circ$  pada *timestep* yang berbeda. a) 45, b) 75, c) 100, d) 125

### 3.5. Kontak sudut $180^\circ$

Hasil simulasi ketika sudut kontak sebesar  $180^\circ$  ditunjukkan pada Gambar 6. Sudut kontak  $180^\circ$  mengindikasikan bahwa dinding memiliki sifat *fully water wet*, yang artinya air memiliki preferensi yang sangat besar untuk menempel pada dinding. Hal ini menyebabkan penyebaran oli pada dinding semakin berkurang jika dibandingkan dengan proses simulasi sebelumnya sehingga menyebabkan *droplet* terbentuk pada kondisi ini. Oli masuk melalui T-junction, dan dikarenakan air semakin mudah menempel ke dinding, maka semakin banyak air yang masuk ke dalam saluran oli di percabangan T-junction jika dibandingkan dengan kondisi sebelumnya (Gambar 6c), sehingga menyebabkan lapisan oli menjadi lebih tipis. Lapisan ini menjadi semakin tipis seiring dengan berjalanya waktu dan terputus ketika oil mencapai jarak tertentu (Gambar 6d). Pada kondisi ini, *droplet* lebih mudah dan cepat terbentuk, hal ini dapat dilihat bahwa pada *time step* yang sama *droplet* telah mencapai jarak yang lebih jauh jika dibandingkan dengan simulasi pada kondisi sebelumnya (Gambar 6d dan Gambar 5d)

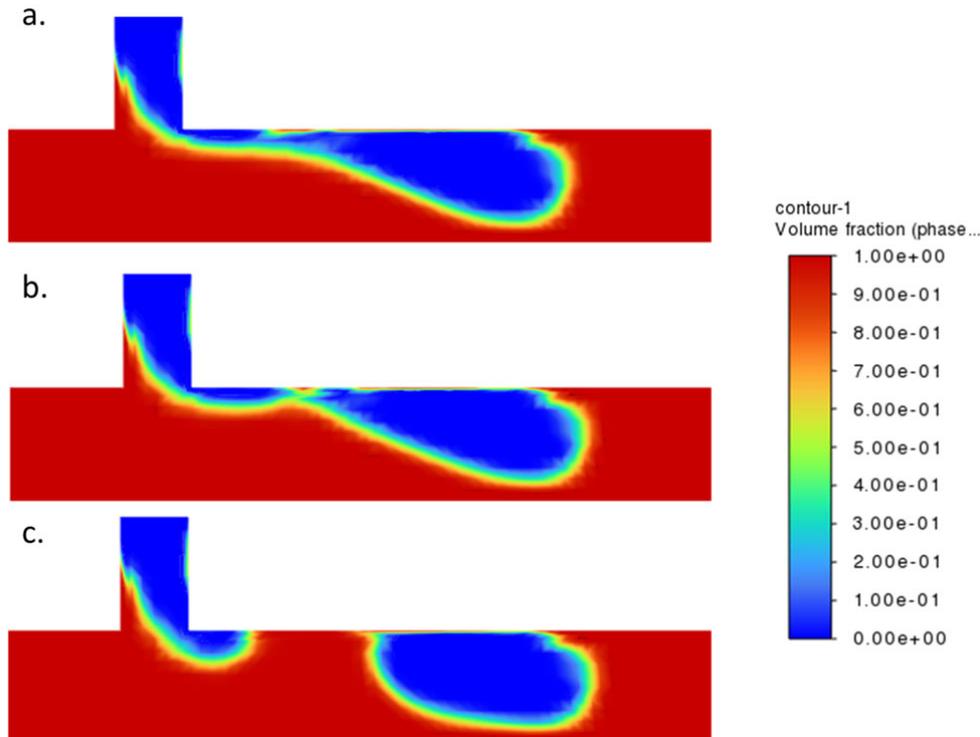


**Gambar 6** Hasil simulasi pada T-junction antara air dan oli dengan sudut kontak  $180^\circ$  pada *timestep* yang berbeda. a) 45, b) 75, c) 100, d) 125

### 3.6. Mekanisme Pembentukan *Droplet*

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pembentukan *droplet* sangat dipengaruhi oleh sudut kontak, dimana pada kondisi ini *droplet* mulai terbentuk pada saat sudut kontak sebesar  $135^\circ$ . Hasil simulasi menunjukkan mekanisme pembentukan *droplet* terjadi melalui serangkaian proses sebagai berikut yang ditunjukkan pada Gambar 7 :

1. **Pemisahan Fase:** Pembentukan *droplet* dimulai dengan pemisahan fase dari cairan yang berkontak dengan dinding. Ini dapat terjadi karena perbedaan kekuatan antara gaya permukaan cairan dan dinding.
2. **Pembentukan *Droplet*:** Ketika bongkahan cairan mencapai ukuran kritis dan tidak dapat lagi mempertahankan bentuknya karena gaya-gaya permukaan yang dominan, mereka melepaskan diri dari dinding dan membentuk *droplet* yang terpisah.
3. **Pelepasan *Droplet*:** *Droplet* yang terbentuk kemudian melepaskan diri dari dinding, terutama dipengaruhi oleh gaya gravitasi atau tekanan aliran, tergantung pada kondisi aliran.



**Gambar 7** Mekanisme pembentukan droplet. a) & b) Pembentukan droplet, c) Pelepasan droplet

#### 4. Kesimpulan dan Saran

Penelitian pengaruh pembentukan droplet terhadap sudut kontak telah dilakukan dengan menggunakan simulasi CFD. Hasil simulasi menunjukkan bahwa droplet terjadi pada saat sudut kontak lebih besar dari  $135^\circ$  dengan mekanisme pembentukan dimulai dari pemisahan fasa, pembentukan *droplet*, dan pelepasan *droplet*. Semakin besar sudut kontak, maka semakin mudah pembentukan *droplet* dikarenakan air dapat masuk ke dalam cabang dan membuat lapisan oli menjadi semakin tipis. Sudut kontak kurang dari  $135^\circ$ , tidak terbentuk *droplet* dikarenakan sifat *oil wet* yang membuat oli menempel pada dinding dan membuat *droplet* tidak dapat terpisah.

#### 5. Daftar Pustaka

- [1] Y.-F. Yap, S.-H. Tan, N.-T. Nguyen, S. M. S. Murshed, T.-N. Wong, and L. Yobas, 'Thermally mediated control of liquid microdroplets at a bifurcation', *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 42, no. 6, p. 065503, Mar. 2009, doi: 10.1088/0022-3727/42/6/065503.
- [2] C. Y. Park and T. I. Zohdi, 'Numerical Modeling of Thermo-Mechanically Induced Stress in Substrates for Droplet-Based Additive Manufacturing Processes', *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 141, no. 061001, Apr. 2019, doi: 10.1115/1.4043254.
- [3] J. Wu, S. Yadavali, D. Lee, and D. A. Issadore, 'Scaling up the throughput of microfluidic droplet-based materials synthesis: A review of recent progress and outlook', *Appl. Phys. Rev.*, vol. 8, no. 3, p. 031304, Jul. 2021, doi: 10.1063/5.0049897.
- [4] W. Han, X. Chen, Z. Wu, and Y. Zheng, 'Three-dimensional numerical simulation of droplet formation in a microfluidic flow-focusing device', *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 6, p. 265, May 2019, doi: 10.1007/s40430-019-1767-y.
- [5] J. M. Zhang, Q. Ji, and H. Duan, 'Three-Dimensional Printed Devices in Droplet Microfluidics', *Micromachines*, vol. 10, no. 11, 2019, doi: 10.3390/mi10110754.

- [6] I. Chakraborty, J. Ricouvier, P. Yazhgur, P. Tabeling, and A. M. Leshansky, ‘Droplet generation at Hele-Shaw microfluidic T-junction’, *Phys. Fluids*, vol. 31, no. 2, p. 022010, Feb. 2019, doi: 10.1063/1.5086808.
- [7] C.-H. Yeh, Q. Zhao, S.-J. Lee, and Y.-C. Lin, ‘Using a T-junction microfluidic chip for monodisperse calcium alginate microparticles and encapsulation of nanoparticles’, *Sens. Actuators Phys.*, vol. 151, no. 2, pp. 231–236, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.sna.2009.02.036.
- [8] C.-X. Zhao and A. P. J. Middelberg, ‘Two-phase microfluidic flows’, *Microfluid. Eng.*, vol. 66, no. 7, pp. 1394–1411, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.ces.2010.08.038.
- [9] S. Bashir, J. M. Rees, and W. B. Zimmerman, ‘Simulations of microfluidic droplet formation using the two-phase level set method’, *Chem. Eng. Sci.*, vol. 66, no. 20, pp. 4733–4741, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.ces.2011.06.034.
- [10] G. (杨光) Yang *et al.*, ‘Droplet mobilization at the walls of a microfluidic channel’, *Phys. Fluids*, vol. 32, no. 1, p. 012004, Jan. 2020, doi: 10.1063/1.5139308.
- [11] B. Barwari, S. Burgmann, and U. Janoske, ‘Hydrodynamic Instabilities of Adhering Droplets Due to a Shear Flow in a Rectangular Channel’, *Chem. Ing. Tech.*, vol. 91, no. 7, pp. 991–1000, Jul. 2019, doi: 10.1002/cite.201800094.
- [12] B. Barwari, S. Burgmann, A. Bechtold, M. Rohde, and U. Janoske, ‘Experimental study of the onset of downstream motion of adhering droplets in turbulent shear flows’, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 109, p. 109843, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2019.109843.
- [13] H. Yang, Y. Xu, and T. Knowles, ‘Droplet dynamics in asymmetric microfluidic junctions’, *Eur. J. Mech. - BFluids*, vol. 102, pp. 118–134, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.euromechflu.2023.07.011.
- [14] I. L. Chaves, L. C. Duarte, W. K. T. Coltro, and D. A. Santos, ‘Droplet length and generation rate investigation inside microfluidic devices by means of CFD simulations and experiments’, *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 161, pp. 260–270, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.cherd.2020.07.015.
- [15] L. Wu, J. Qian, X. Liu, S. Wu, C. Yu, and X. Liu, ‘Numerical Modelling for the Droplets Formation in Microfluidics - A Review’, *Microgravity Sci. Technol.*, vol. 35, no. 3, p. 26, May 2023, doi: 10.1007/s12217-023-10053-0.