



ANALISIS PENGARUH TEGANGAN PERMUKAAN PADA SISTEM MIKROFLUIDA

Berkat Zega¹⁾, Gregorius Andi Prasition Gea²⁾

¹⁾ Teknologi Informasi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia

Email: berkatz156@gmail.com

²⁾ Teknologi Informasi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia

Email: geagrego378@gmail.com

Abstract

Surface tension plays a pivotal role in phenomena occurring at the microscale, particularly within microfluidic systems. This research conducts a comprehensive literature review to analyze the influence of surface tension on various aspects of microfluidics, such as droplet formation, flow in microchannels, and fluid-solid interactions. Diverse methods for measuring surface tension at the microscale are also discussed, along with the associated challenges. Furthermore, this review highlights recent advancements in mathematical modeling to predict fluid behavior in microfluidic systems under the influence of surface tension. The findings of this literature review demonstrate that a profound understanding of surface tension is essential for designing and optimizing microfluidic devices for a wide range of applications, spanning from biomedical to chemical industries.

Keywords: Microfluids, Surface Tension, Droplet Impact, Fluid Statics, Microscale

Abstrak

Tegangan permukaan memainkan peran krusial dalam fenomena yang terjadi pada skala mikro, khususnya dalam sistem mikrofluida. Penelitian ini melakukan tinjauan literatur komprehensif untuk menganalisis pengaruh tegangan permukaan terhadap berbagai aspek dalam sistem mikrofluida, seperti pembentukan droplet, aliran dalam mikrokanal, dan interaksi cairan dengan permukaan padat. Metode pengukuran tegangan permukaan dalam skala mikro yang beragam juga dibahas, serta tantangan yang dihadapi dalam pengukuran ini. Selain itu, tinjauan ini juga menyoroti perkembangan terbaru dalam pemodelan matematis untuk memprediksi perilaku fluida dalam sistem mikrofluida yang dipengaruhi oleh tegangan permukaan. Hasil tinjauan literatur ini menunjukkan bahwa pemahaman yang mendalam tentang tegangan permukaan sangat penting untuk merancang dan mengoptimalkan perangkat mikrofluida untuk berbagai aplikasi, mulai dari biomedis hingga industri kimia.

Kata Kunci: Mikrofluida, Tegangan Permukaan, Tumbukan Droplet, Statika Fluida, Skala Mikro



PENDAHULUAN

Definisi tegangan permukaan dan prinsip kerjanya. Sistem mikrofluida adalah suatu disiplin ilmu yang berfokus pada manipulasi, pengendalian, dan analisis aliran fluida dalam skala yang sangat kecil, yakni pada orde mikrometer. Bayangkan sebuah sistem yang begitu mini sehingga saluran-saluran di dalamnya hanya selebar beberapa rambut manusia. Teknologi ini telah mengalami kemajuan pesat berkat perkembangan pesat dalam bidang mikrofabrikasi, yang memungkinkan pembuatan perangkat-perangkat mini yang kompleks dan presisi. Minat yang besar terhadap sistem mikrofluida didorong oleh potensi aplikasinya yang sangat luas, mulai dari bidang biomedis (seperti analisis DNA, pengembangan obat, dan pembuatan organ-on-a-chip), kimia analitik (misalnya, kromatografi cair miniaturized), hingga lingkungan (sensor untuk deteksi polutan).

Salah satu karakteristik unik dari sistem mikrofluida adalah dominasi gaya permukaan dibandingkan dengan gaya volume. Dalam skala mikro, efek gaya permukaan seperti adhesi, kohesi, dan tegangan permukaan menjadi jauh lebih signifikan dibandingkan dengan gaya-gaya yang bekerja dalam skala makro. Hal ini mengakibatkan munculnya berbagai fenomena menarik yang khas dalam sistem mikrofluida, seperti kapilaritas (kenaikan atau penurunan cairan dalam pipa kapiler), wetting (pembasahan permukaan oleh cairan), dan pembentukan droplet (tetesan cairan). Fenomena-fenomena ini sangat penting untuk dipahami karena mereka mempengaruhi berbagai aspek dalam sistem mikrofluida, mulai dari aliran fluida dalam mikrokanal hingga interaksi antara cairan dengan permukaan padat. Pemahaman yang mendalam tentang fenomena permukaan ini memungkinkan kita untuk merancang dan mengoptimalkan perangkat mikrofluida untuk berbagai aplikasi. Dimana Intinya yaitu, sistem mikrofluida menawarkan cara yang inovatif untuk memanipulasi cairan dalam skala yang sangat kecil dengan memanfaatkan fenomena-fenomena permukaan yang unik. Potensi aplikasinya yang luas membuat teknologi ini

menjadi salah satu bidang penelitian yang paling aktif saat ini.

Tegangan permukaan merupakan fenomena fisika yang muncul akibat adanya gaya kohesi antar molekul cairan. Molekul-molekul di dalam cairan saling tarik-menarik dengan kuat, sedangkan molekul-molekul di permukaan cairan hanya ditarik oleh molekul di bawahnya. Hal ini menciptakan semacam "kulit" yang elastis pada permukaan cairan, yang dikenal sebagai tegangan permukaan. Dalam skala mikro, di mana rasio luas permukaan terhadap volume menjadi sangat besar, efek tegangan permukaan ini menjadi jauh lebih dominan dibandingkan dengan gaya-gaya lain seperti gravitasi.

Dalam sistem mikrofluida, tegangan permukaan mempengaruhi berbagai aspek, mulai dari pembentukan droplet hingga perilaku aliran dalam mikrokanal. Saat suatu cairan mengalir melalui sebuah saluran mikro, tegangan permukaan menyebabkan cairan membasahi dinding saluran dengan sudut kontak tertentu. Sudut kontak ini sangat penting karena mempengaruhi kecepatan aliran, pembentukan gelembung udara, dan efisiensi pencampuran. Selain itu, tegangan permukaan juga berperan dalam pembentukan droplet yang sangat kecil, yang merupakan komponen penting dalam berbagai aplikasi seperti pencetakan 3D, bioteknologi, dan farmasi. Dengan mengontrol tegangan permukaan, kita dapat mengatur ukuran, bentuk, dan stabilitas droplet yang terbentuk.

Pemahaman yang mendalam tentang tegangan permukaan sangat krusial dalam merancang dan mengoptimalkan perangkat mikrofluida. Misalnya, dalam pengembangan chip lab-on-a-chip, para ilmuwan perlu mempertimbangkan bagaimana tegangan permukaan mempengaruhi aliran cairan, pemisahan sampel, dan reaksi kimia yang terjadi di dalam chip. Dengan mengontrol tegangan permukaan, kita dapat meningkatkan efisiensi dan akurasi dari berbagai proses yang terjadi dalam sistem mikrofluida.

Pembentukan droplet dalam sistem mikrofluida merupakan fenomena yang sangat dipengaruhi oleh tegangan permukaan. Ketika dua fase fluida yang tidak



saling larut (misalnya, minyak dan air) bertemu dalam suatu saluran mikro, perbedaan tegangan permukaan antar fase akan menyebabkan terbentuknya tetesan-tetesan kecil atau droplet. Tegangan permukaan yang lebih rendah pada salah satu fase akan cenderung menarik molekul-molekulnya ke dalam, membentuk tetesan yang stabil. Ukuran, bentuk, dan frekuensi pembentukan droplet ini sangat bergantung pada besarnya tegangan antarmuka antara kedua fase, laju aliran fluida, serta geometri saluran mikro. Dengan memanipulasi tegangan permukaan melalui penambahan surfaktan atau perubahan suhu, kita dapat mengontrol ukuran droplet secara presisi. Droplet mikro yang dihasilkan dengan cara ini memiliki berbagai aplikasi yang menarik, seperti dalam sintesis material nano, pembuatan emulsi, dan pengembangan platform diagnostik berbasis mikrofluida. Selain itu, dalam proses pencampuran dan pemisahan dalam sistem mikrofluida, tegangan permukaan juga memainkan peran penting. Tegangan permukaan yang berbeda antara dua fase akan mempengaruhi efisiensi pencampuran dan pemisahan komponen-komponen dalam suatu sampel. Dengan memahami dan mengontrol tegangan permukaan, para peneliti dapat merancang perangkat mikrofluida yang lebih efisien dan efektif untuk berbagai aplikasi.

Secara ringkas, tegangan permukaan adalah kunci dalam pembentukan dan manipulasi droplet dalam sistem mikrofluida. Dengan mengontrol tegangan permukaan, kita dapat menghasilkan droplet dengan karakteristik yang diinginkan dan membuka jalan bagi pengembangan teknologi mikrofluida yang lebih canggih.

Metode pengukuran tegangan permukaan dalam skala mikro. Pengukuran tegangan permukaan dalam skala mikro merupakan tantangan tersendiri karena dimensi yang sangat kecil dan volume cairan yang terbatas. Metode-metode konvensional yang umum digunakan dalam skala makro, seperti metode cincin Du Noüy atau metode tetes jatuh, seringkali tidak cocok diterapkan pada skala mikro. Oleh karena itu, berbagai teknik pengukuran khusus telah dikembangkan untuk mengatasi kendala ini. Salah satu metode yang populer adalah interferometri. Dengan menggunakan interferometri, perubahan indeks bias pada

permukaan cairan akibat adanya tegangan permukaan dapat diukur, sehingga memungkinkan penentuan nilai tegangan permukaan secara tidak langsung. Metode ini memiliki keunggulan dalam hal presisi dan akurasi, namun membutuhkan peralatan yang relatif kompleks.

Selain interferometri, metode lain yang sering digunakan adalah teknik berbasis gaya. Prinsip dasar dari metode ini adalah dengan mengukur gaya yang diperlukan untuk menarik suatu objek (misalnya, pelat atau bola) keluar dari permukaan cairan. Salah satu alat yang memanfaatkan prinsip ini adalah tensiometer. Tensiometer bekerja dengan cara mencelupkan sebuah pelat atau cincin ke dalam cairan, kemudian menariknya ke atas dengan kecepatan konstan. Gaya yang diperlukan untuk menarik objek tersebut sebanding dengan tegangan permukaan cairan. Metode berbasis gaya ini relatif sederhana dan mudah diterapkan, namun keakuratannya dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti kebersihan permukaan dan geometri objek yang digunakan.

Metode pengukuran tegangan permukaan dalam skala mikro terus berkembang seiring dengan kemajuan teknologi. Beberapa metode baru yang menarik perhatian adalah teknik berbasis mikropipet, teknik berbasis optik, dan teknik berbasis resonansi. Teknik mikropipet memanfaatkan prinsip kapilaritas untuk mengukur tegangan permukaan dengan cara mengukur tinggi cairan yang naik dalam sebuah kapiler. Teknik berbasis optik, seperti teknik sudut kontak dan teknik profil permukaan, memungkinkan pengukuran tegangan permukaan secara non-invasif. Sementara itu, teknik berbasis resonansi, seperti teknik resonansi akustik, memanfaatkan getaran mekanik untuk mengukur sifat fisik cairan, termasuk tegangan permukaan. Pilihan metode yang tepat akan bergantung pada jenis cairan, geometri permukaan, dan tingkat akurasi yang diinginkan.

Rumusan Masalah

Pada pembahasan penelitian jurnal ini, terdapat beberapa rumusan masalah yang terbentuk, yaitu:

-Bagaimana tegangan Permukaan terhadap Aliran Fluida



- Bagaimana Dinamika Tumbukan Droplet
- Bagaimana Aplikasi Praktis dalam Teknologi
- Metode Pengukuran
- Metode Eksperimen

METODOLOGI PENELITIAN

Metode pengukuran tegangan permukaan terus berkembang seiring dengan semakin kompleksnya sistem mikrofluida yang dikembangkan. Metode pipa kapiler dan metode visual, yang telah lama digunakan, telah mengalami modifikasi dan penyempurnaan untuk dapat diterapkan pada skala mikro dengan akurasi yang lebih tinggi. Metode pipa kapiler, misalnya, telah diadaptasi dengan menggunakan pipa kapiler yang memiliki diameter sangat kecil dan teknik pengukuran ketinggian cairan yang lebih presisi. Sementara itu, metode visual telah memanfaatkan kemajuan dalam teknologi imaging, seperti mikroskopi high-speed, untuk menangkap fenomena yang terjadi dalam skala waktu yang sangat singkat dan dengan resolusi spasial yang tinggi. Selain itu, teknik-teknik pengolahan citra digital juga telah dikembangkan untuk menganalisis data gambar secara kuantitatif dan memperoleh informasi yang lebih detail mengenai bentuk tetesan, sudut kontak, dan profil antarmuka cairan-padatan. Penelitian terbaru dalam bidang pengukuran tegangan permukaan semakin berfokus pada peningkatan presisi dan akurasi pengukuran. Hal ini didorong oleh kebutuhan untuk memahami dengan lebih baik dinamika aliran dalam sistem mikrofluida yang kompleks, seperti pembentukan droplet, pemisahan fase, dan interaksi antara cairan dengan permukaan padat. Para peneliti juga berusaha mengembangkan metode pengukuran yang lebih cepat, lebih sederhana, dan lebih portabel, sehingga dapat diterapkan pada berbagai jenis sistem mikrofluida. Selain itu, penelitian juga diarahkan pada pengembangan model matematis yang lebih akurat untuk menggambarkan fenomena yang terjadi pada skala mikro, sehingga dapat digunakan untuk memprediksi dan mengoptimalkan kinerja perangkat mikrofluidika. Dengan demikian, pemahaman yang lebih baik mengenai tegangan permukaan akan membuka jalan bagi pengembangan

aplikasi baru dalam bidang biomedis, kimia analitik, dan rekayasa material.

Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk melakukan analisis komprehensif terhadap literatur yang membahas pengaruh tegangan permukaan terhadap fenomena aliran dalam sistem mikrofluida. Melalui analisis ini, diharapkan dapat mengidentifikasi tren penelitian terbaru, mengungkap celah pengetahuan yang ada, serta memberikan landasan teoritis yang kuat untuk pengembangan aplikasi mikrofluida yang lebih efisien dan presisi, seperti dalam bidang biomedis, kimia analitik, dan produksi mikrochip.

PEMBAHASAN

Pengaruh Tegangan Permukaan Terhadap Aliran Fluida. Tegangan permukaan memiliki dampak yang sangat signifikan terhadap fraksi liquid (liquid hold-up) dan kecepatan gelombang dalam aliran cair-gas, terutama dalam konteks pipa horizontal. Interaksi antara fase cair dan gas sangat dipengaruhi oleh besarnya tegangan permukaan. Penurunan tegangan permukaan, misalnya melalui penambahan surfaktan seperti butanol, akan mengubah bentuk antarmuka antara fase cair dan gas, sehingga mempengaruhi pola aliran yang terbentuk. Pada aliran annular misalnya, penurunan tegangan permukaan dapat menyebabkan terbentuknya film cair yang lebih tipis dan lebih stabil, sehingga mengurangi liquid hold-up. Selain itu, perubahan tegangan permukaan juga akan mempengaruhi kecepatan gelombang yang terbentuk pada antarmuka, yang berdampak pada stabilitas aliran dan distribusi cairan di dalam pipa. Dalam sistem mikrofluida, pengaruh tegangan permukaan menjadi semakin dominan karena rasio luas permukaan terhadap volume menjadi sangat besar. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam tentang hubungan antara tegangan permukaan dengan karakteristik aliran sangat penting untuk merancang dan mengoptimalkan sistem mikrofluida yang melibatkan aliran multifase.



Penambahan surfaktan, seperti butanol, terbukti efektif dalam menurunkan tegangan permukaan, yang pada gilirannya mempengaruhi karakteristik aliran dan distribusi cairan dalam sistem mikrofluida. Surfaktan bekerja dengan cara menyerap pada antarmuka antara fase cair dan gas, sehingga mengurangi gaya kohesif antara molekul-molekul cairan dan menurunkan tegangan permukaan. Dengan demikian, surfaktan dapat digunakan sebagai alat untuk mengontrol pola aliran, memodifikasi ukuran droplet, dan meningkatkan efisiensi proses pemisahan dalam sistem mikrofluida. Namun, perlu diperhatikan bahwa penambahan surfaktan juga dapat memiliki efek samping, seperti perubahan viskositas cairan atau interaksi dengan bahan dari saluran mikrofluida. Oleh karena itu, pemilihan jenis dan konsentrasi surfaktan yang tepat sangat penting untuk mencapai hasil yang diinginkan.

Dinamika Tumbukan Droplet. Studi mengenai tumbukan multiple droplets pada permukaan panas merupakan area penelitian yang menarik dan relevan dengan berbagai aplikasi industri, seperti pendinginan komponen elektronik dan proses pelapisan. Penelitian ini secara khusus mengeksplorasi bagaimana variasi tegangan permukaan, salah satu sifat fisik cairan yang sangat penting, mempengaruhi perilaku droplet saat menabrak permukaan padat yang dipanaskan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tegangan permukaan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap dinamika tumbukan droplet. Semakin rendah tegangan permukaan suatu cairan, semakin mudah cairan tersebut menyebar (spreading) pada permukaan padat. Hal ini mengakibatkan peningkatan rasio penyebaran droplet, yang didefinisikan sebagai perbandingan luas penyebaran maksimum droplet dengan luas proyeksi awal droplet. Selain itu, tegangan permukaan juga mempengaruhi pembentukan droplet sekunder atau splashing. Cairan dengan tegangan permukaan yang lebih rendah cenderung menghasilkan droplet sekunder yang lebih sedikit dan lebih lambat. Temuan ini memiliki implikasi penting dalam desain dan optimasi proses yang melibatkan tumbukan droplet, seperti spray cooling dan inkjet printing. Dengan memahami hubungan antara

tegangan permukaan dan perilaku droplet, para peneliti dapat merancang sistem yang lebih efisien dan efektif. Faktor-faktor lain yang juga dapat mempengaruhi dinamika tumbukan droplet antara lain: viskositas cairan, suhu permukaan, kecepatan tumbukan, dan sifat permukaan padat. Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk mengungkap interaksi kompleks antara berbagai parameter ini dan untuk mengembangkan model matematis yang dapat memprediksi perilaku droplet secara akurat.

Integrasi Elektrostatis dalam Analisis Tegangan Permukaan. Ada tren baru yang menarik dalam dunia mikrofluida, yaitu integrasi konsep elektrostatis dalam analisis statika fluida, khususnya yang berkaitan dengan tegangan permukaan. Penelitian-penelitian terkini menunjukkan bahwa interaksi antara muatan listrik yang ada pada permukaan fluida dan gaya tegangan permukaan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perilaku fluida dalam skala mikro. Dengan kata lain, muatan listrik tidak hanya berperan dalam fenomena elektromagnetik, tetapi juga dapat mempengaruhi sifat fisik fluida seperti bentuk tetesan, sudut kontak, dan stabilitas aliran. Penelitian ini berupaya mengembangkan model teoritis yang lebih komprehensif dengan mempertimbangkan kedua faktor tersebut secara simultan. Model ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang bagaimana muatan listrik dan tegangan permukaan saling berinteraksi dalam berbagai kondisi, serta membuka peluang untuk merancang perangkat mikrofluidika yang lebih canggih dan efisien. Pendekatan ini memiliki potensi aplikasi yang luas, mulai dari pengembangan sensor biologis yang lebih sensitif hingga pembuatan sistem microfluidic digital. Dengan memahami interaksi antara elektrostatis dan tegangan permukaan, para peneliti berharap dapat mengontrol dan memanipulasi perilaku fluida pada skala mikro dengan lebih presisi, membuka jalan bagi inovasi baru di berbagai bidang ilmu dan teknologi.

Aplikasi Praktis dalam Teknologi. Aplikasi dalam bidang bioteknologi dan farmasi sangat luas dan beragam. Dalam pembuatan obat, pemahaman tentang tegangan



permukaan memungkinkan para peneliti untuk merancang sistem penghantaran obat yang lebih efektif. Misalnya, dengan mengontrol tegangan permukaan pada permukaan implan medis, kita dapat meningkatkan adhesi sel dan mempercepat proses penyembuhan luka. Selain itu, dalam pembuatan emulsi untuk obat atau kosmetik, tegangan permukaan berperan penting dalam menjaga stabilitas emulsi dan mencegah pemisahan fase. Dengan mengoptimalkan tegangan permukaan, kita dapat menghasilkan emulsi yang lebih homogen dan tahan lama. Dalam bidang bioteknologi, tegangan permukaan juga dimanfaatkan untuk memisahkan sel, protein, dan DNA. Teknik seperti dielektrophoresis dan droplet-based microfluidics mengandalkan kontrol tegangan permukaan untuk memanipulasi partikel biologis dengan presisi tinggi. Dalam teknik material, tegangan permukaan memiliki peran krusial dalam proses pembuatan dan karakterisasi material. Misalnya, dalam proses pelapisan permukaan, tegangan permukaan menentukan seberapa baik suatu cairan pelapis dapat membasahi permukaan substrat. Dengan mengontrol tegangan permukaan, kita dapat menghasilkan lapisan yang lebih seragam dan adhesif. Selain itu, tegangan permukaan juga mempengaruhi sifat mekanik material, seperti kekuatan tarik dan modulus elastisitas. Dalam pembuatan nanomaterial, tegangan permukaan berperan dalam pembentukan partikel nanomaterial dengan ukuran dan bentuk yang terkendali. Dengan memahami pengaruh tegangan permukaan, para peneliti dapat merancang proses pembuatan material yang lebih efisien dan menghasilkan material dengan sifat yang diinginkan.

Secara keseluruhan, tren penelitian terkini menunjukkan perhatian yang meningkat terhadap interaksi kompleks antara tegangan permukaan dan dinamika fluida dalam sistem mikro. Para peneliti semakin menyadari bahwa tegangan permukaan tidak hanya berperan sebagai faktor pasif dalam sistem mikrofluida, tetapi juga secara aktif mempengaruhi berbagai fenomena, seperti pembentukan droplet, pembasahan permukaan, dan aliran dalam saluran mikro. Penelitian-penelitian terbaru telah berhasil mengungkap mekanisme dasar yang mendasari

interaksi ini, serta mengembangkan model matematis yang lebih akurat untuk memprediksi perilaku fluida dalam skala mikro. Selain itu, kemajuan dalam teknik fabrikasi dan karakterisasi telah memungkinkan para peneliti untuk merancang dan membangun perangkat mikrofluida yang semakin canggih dan terintegrasi. Penerapan hasil penelitian ini telah membuka peluang baru dalam berbagai bidang teknologi dan industri, termasuk biomedis, kimia analitik, dan energi. Contohnya, dalam bidang biomedis, sistem mikrofluida digunakan untuk mengembangkan alat diagnostik yang cepat dan akurat, serta sistem pengiriman obat yang lebih efektif. Sementara itu, dalam industri kimia, sistem mikrofluida digunakan untuk sintesis bahan kimia dengan efisiensi yang tinggi dan selektivitas yang baik. Seiring dengan perkembangan teknologi nanoteknologi, diharapkan interaksi antara tegangan permukaan dan dinamika fluida dalam skala nano juga akan menjadi fokus penelitian di masa depan.

KESIMPULAN

Analisis literatur yang telah dilakukan menunjukkan bahwa tegangan permukaan memiliki peran yang sangat krusial dalam sistem mikrofluida. Fenomena-fenomena seperti pembentukan droplet, pembasahan permukaan, dan aliran dalam mikrokanal sangat dipengaruhi oleh besarnya tegangan permukaan. Pengukuran tegangan permukaan dalam skala mikro memang menghadirkan tantangan tersendiri, namun perkembangan teknologi telah memungkinkan pengembangan berbagai metode pengukuran yang akurat. Penelitian-penelitian terkini telah berhasil mengungkap mekanisme dasar interaksi antara tegangan permukaan dan dinamika fluida dalam skala mikro. Pemahaman yang mendalam tentang hubungan ini membuka peluang untuk merancang dan mengoptimalkan perangkat mikrofluida untuk berbagai aplikasi, seperti dalam bidang biomedis, kimia analitik, dan lingkungan.

Prospek ke Depan. Meskipun telah banyak kemajuan yang dicapai, masih terdapat banyak peluang untuk penelitian lebih lanjut. Salah satu arah yang menarik adalah



pengembangan model matematis yang lebih komprehensif untuk memprediksi perilaku fluida multifasa dalam sistem mikrofluida yang kompleks. Selain itu, integrasi antara sistem mikrofluida dengan teknologi lain, seperti nanoteknologi dan bioteknologi, juga merupakan area yang menjanjikan. Dengan demikian, diharapkan penelitian di bidang ini akan terus berkembang dan memberikan kontribusi yang signifikan bagi berbagai sektor industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Adamson, A. W., & Gast, A. P. (1997). *Physical Chemistry of Surfaces* (6th ed.). Wiley.
- Arizona, R. (2019). Pengaruh Tegangan Permukaan Terhadap Tumbukan Multiple Droplets Pada Permukaan Stainles Steel Yang Dipanaskan. *Quantum Teknika : Jurnal Teknik Mesin Terapan*, 1(1), 10–13. <https://doi.org/10.18196/jqt.010102>
- Attinger, D., Zhao, Z., & Poulikakos, D. (2000). An experimental study of meniscus formation in capillaries. *Journal of Colloid and Interface Science*, 227(2), 407–412. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.6883>
- Basu, A. S., & Wheeler, A. R. (2012). A microfluidic flow cytometer. *Analyst*, 137(6), 1442–1458. <https://doi.org/10.1039/C2AN15746D>
- Berthier, J., & Silberzan, P. (2009). *Microfluidics for Biotechnology*. Artech House.
- Bhattacharjee, S., & Datta, A. (2013). Effects of surface tension in microfluidic devices. *Microfluidics and Nanofluidics*, 15(3), 441–456. <https://doi.org/10.1007/s10404-013-1168-6>
- Chang, H. C., & Yeo, L. Y. (2010). *Electrokinetically Driven Microfluidics and Nanofluidics*. Cambridge University Press.
- De Gennes, P.-G., Brochard-Wyart, F., & Quéré, D. (2004). *Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves*. Springer.
- Dreyfus, R., Tabeling, P., & Willaime, H. (2003). Ordered and disordered patterns in two-phase flows in microchannels. *Physical Review Letters*, 90(14), 144505. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.144505>
- Fair, R. B. (2007). Digital microfluidics: Is a true lab-on-a-chip possible? *Microfluidics and Nanofluidics*, 3(3), 245–281. <https://doi.org/10.1007/s10404-007-0161-8>
- Feng, J. Q., & Bertelo, C. A. (2004). Prediction of meniscus shape and capillary force between a microparticle and a flat surface. *Langmuir*, 20(14), 6100–6106. <https://doi.org/10.1021/la036093b>
- Hosokawa, K., Fujii, T., & Endo, I. (1999). Handling of picoliter liquid samples in a poly(dimethylsiloxane)-based microfluidic device. *Analytical Chemistry*, 71(20), 4781–4785. <https://doi.org/10.1021/ac9905318>
- Jiang, X., Ng, J. M., Stroock, A. D., Dertinger, S. K., & Whitesides, G. M. (2003). A hybrid microfluidic system for high-throughput synthesis. *Langmuir*, 19(5), 7381–7387. <https://doi.org/10.1021/la034445b>
- Joanicot, M., & Ajdari, A. (2005). Droplet control for microfluidics. *Science*, 309(5736), 887–888. <https://doi.org/10.1126/science.1112975>
- Jumini, S. (2015). Pengaruh Tegangan Permukaan Diselat Gibraltar Berdasarkan Surat Arrahman Ayat 19-20. *Jurnal PPKM*, 2(2), 106–113. <https://ojs.unsiq.ac.id/index.php/ppkm/article/view/354>
- Kim, P., Kwon, K. W., Park, M. C., Lee, S. H., Kim, S. M., & Suh, K. Y. (2008). Soft lithography for microfluidics: A review. *Biochip Journal*, 2(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s13206-008-2010-9>
- Lauga, E., Brenner, M. P., & Stone, H. A. (2007). *Microfluidics: The no-slip boundary condition. Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. Springer.
- Li, D. (2004). *Electrokinetics in Microfluidics*. Elsevier.
- Link, D. R., Anna, S. L., Weitz, D. A., & Stone, H. A. (2004). Geometrically mediated breakup of drops in microfluidic devices. *Physical Review Letters*,



- 92(5), 054503. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.054503>
- Man, P. F., Mastrangelo, C. H., Burns, M. A., & Burke, D. T. (1998). Microfabricated capillary-driven stop valve and sample injector. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 8(4), 268. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/8/4/007>
- Marmur, A. (2009). Solid-surface characterization by wetting. *Annual Review of Materials Research*, 39, 473–489. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-082908-145415>
- Muliyani, Y., & Hamdan, A. M. (2019). Model Baru Statika Fluida yang Melibatkan Interaksi Elektrostatis di Dalam Tabung Silinder. *Jurnal Profesi Keguruan*, 5(2), 15–22.
- Ng, J. M. K., Gitlin, I., Stroock, A. D., & Whitesides, G. M. (2002). Components for integrated poly(dimethylsiloxane) microfluidic systems. *Electrophoresis*, 23(20), 3461–3473. [https://doi.org/10.1002/1522-2683\(200211\)23:20<3461::AID-ELPS3461>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/1522-2683(200211)23:20<3461::AID-ELPS3461>3.0.CO;2-A)
- Nguyen, N. T., & Wereley, S. T. (2006). *Fundamentals and Applications of Microfluidics*. Artech House.
- Perbedaan antara von Neumann dan arsitektur Harvard | Diffexpert. (n.d.). Retrieved October 19, 2024, from <https://id.diffexpert.com/article/difference-between-von-neumann-and-harvard-architecture>
- Pradiani, W., Zuhaini, R., & Heru Prianto, A. (2022). Pengaruh Tegangan Permukaan Dan Lapisan Ganda Elektrik Terhadap Kestabilan Emulsi Krim Anti Nyamuk Aedes Aegypti. *Jurnal Farmamedika (Pharmamedica Journal)*, 7(1), 41–47. <https://doi.org/10.47219/ath.v7i1.143>
- Prasetyo, B. A., Deendarlianto, Khasani, & Indarto. (2014). Pengaruh Tegangan Permukaan Terhadap Fraksi Liquid (Liquid Hold-Up) dan Kecepatan Gelombang Aliran Cincin (Annular flow) Cair-Gas Pada Pipa Horisontal sebagai Aplikasi Aliran Fluida pada Pipa. 218–223.
- Squires, T. M., & Quake, S. R. (2005). Microfluidics: Fluid physics at the nanoliter scale. *Reviews of Modern Physics*, 77(3), 977. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.77.977>
- Stone, H. A., Stroock, A. D., & Ajdari, A. (2004). Engineering flows in small devices: Microfluidics toward a lab-on-a-chip. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 36, 381–411. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122124>
- Vickers, J. A., & Whitesides, G. M. (2007). Understanding surface tension effects in microfluidics. *Langmuir*, 23(11), 6638–6644. <https://doi.org/10.1021/la700101u>
- Whitesides, G. M. (2006). The origins and the future of microfluidics. *Nature*, 442(7101), 368–373. <https://doi.org/10.1038/nature05058>
- Xia, Y., & Whitesides, G. M. (1998). Soft lithography. *Annual Review of Materials Science*, 28(1), 153–184. <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.28.1.153>
- Xu, S., Nie, Z., Seo, M., Lewis, P., Kumacheva, E., Stone, H. A., ... & Whitesides, G. M. (2005). Generation of monodisperse particles by using microfluidics: Control over size, shape, and composition. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(5), 724–728. <https://doi.org/10.1002/anie.200501888>
- Yeo, L. Y., & Friend, J. R. (2006). Surface acoustic wave microfluidics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 38, 201–228. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092306>
- Young, T. (1805). An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95, 65–87. <https://doi.org/10.1098/rstl.1805.0005>
- Zhao, C. X., & Middelberg, A. P. J. (2011). Two-phase microfluidic flows. *Chemical Engineering Science*, 66(7), 1394–1411. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.08.046>