



PAPER – OPEN ACCESS

Fenomena Aliran dan Gelembung Flow Boiling pada Fins dengan Fluida Kerja Dielektrik

Author : Moh. Nurcahyo Buwono dan Indro Pranoto
DOI : 10.32734/ee.v7i1.2198
Electronic ISSN : 2654-704X
Print ISSN : 2654-7031

Volume 7 Issue 1 – 2024 TALENTA Conference Series: Energy and Engineering (EE)



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/).

Published under licence by TALENTA Publisher, Universitas Sumatera Utara



Fenomena Aliran dan Gelembung *Flow Boiling* pada *Fins* dengan Fluida Kerja Dielektrik

Moh. Nurcahyo Buwono, Indro Pranoto*

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada: Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta, 55281, Indonesia
mohnurcahyobuwono@mail.ugm.ac.id¹

*corresponding author: indro.pranoto@ugm.ac.id²

Abstrak

Dalam beberapa tahun terakhir, pemanfaatan fin dalam manajemen termal peralatan industri telah meningkat secara signifikan. Salah satu strategi yang sering digunakan untuk meningkatkan koefisien perpindahan kalor dari fin adalah melalui penerapan metode *flow boiling*. Dalam situasi ini, pembentukan gelembung dianggap sebagai faktor penting yang berpengaruh. Metode eksperimental melibatkan beberapa komponen, seperti *flow boiling channel*, kondensor, reservoir, pompa, sistem perpipaan, dan penggunaan cairan dielektrik HFE-7100 sebagai fluida kerja. Pada evaporator, dipasang heater yang dapat disesuaikan beban panasnya dengan menggunakan *voltage regulator*. Selanjutnya, pompa yang dipasang juga memungkinkan untuk merubah fluks massa dengan menggunakan *flow meter*. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa pengaturan fluks massa dalam kondisi *flow boiling* memiliki dampak signifikan terhadap pembentukan gelembung. Pengaturan fluks massa tertentu dapat mengurangi jumlah gelembung yang terbentuk, sementara peningkatan fluks massa cenderung meningkatkan jumlah gelembung yang terjadi. Namun, pada fluks massa yang lebih tinggi, gelembung yang terlepas dari permukaan fin bergerak dengan cepat, yang mengakibatkan terhambatnya pembentukan lapisan film di permukaan fin. Hal ini berpotensi mempercepat efisiensi transfer panas dari permukaan fin ke fluida sekitarnya. Oleh karena itu, pengendalian fluks massa menjadi faktor penting dalam meningkatkan efisiensi termal pada permukaan fin. Fenomena ini mengindikasikan peningkatan kinerja sistem pendingin karena jumlah gelembung yang dihasilkan lebih banyak. Selain itu, selama eksperimen, teramati bahwa terjadi perubahan dalam perilaku gelembung. Ketika koefisien perpindahan panas meningkat, jumlah gelembung yang dihasilkan juga meningkat namun dengan periode pelepasan yang lebih singkat.

Kata Kunci: Pendidihan Aliran; Koefisien Perpindahan Panas; Struktur Sirip; Fenomena Pendidihan

Abstract

In recent years, the utilization of fins in the thermal management of industrial equipment has significantly increased. One of the strategies often used to enhance the heat transfer coefficient of fins is the application of flow boiling methods. In this situation, bubble formation is considered an important influencing factor. The experimental method involves several components, such as the flow boiling channel, condenser, reservoir, pump, piping system, and the use of dielectric fluid HFE-7100 as the working fluid. In the evaporator, a heater is installed whose heat load can be adjusted using a voltage regulator. Additionally, the installed pump allows for changes in mass flux using a flow meter. Experimental results show that mass flux regulation under flow boiling conditions has a significant impact on bubble formation. Certain mass flux settings can reduce the number of bubbles formed, while an increase in mass flux tends to increase the number of bubbles that occur. However, at higher mass flux, bubbles released from the fin surface move quickly, which hinders the formation of a film layer on the fin surface. This potentially accelerates the heat transfer efficiency from the fin surface to the surrounding fluid. Therefore, mass flux control becomes an important factor in improving the thermal efficiency of the fin surface. This phenomenon indicates an improvement in the cooling system's performance due to the greater number of bubbles produced. Additionally, during the experiment, changes in bubble behavior were observed. When the heat transfer coefficient increases, the number of bubbles produced also increases but with a shorter release period.

Keywords: Flow Boiling; Heat Transfer Coefficient; Fins Structure; Boiling Phenomenon

1. Pendahuluan

Penggunaan *fin* dalam saluran mikro sebagai modifikasi *flow boiling* telah terbukti menjadi peningkatan pasif yang efektif pada sistem pendingin. Ditambah lagi tren miniaturisasi dalam beberapa dekade terakhir telah memacu perkembangan perangkat

elektronik menjadi lebih kompak. Dampaknya adalah peningkatan eksponensial dalam hilangnya fluks kalor dari sistem karena pengurangan dimensi. Oleh karena itu, diperlukan sistem manajemen termal yang tepat untuk menjaga suhu sambungan *chip* komputer agar tetap stabil dalam batas yang dapat diterima dan menjaga kinerjanya [1]. Upaya untuk mencapai mekanisme perpindahan kalor yang efisien merupakan hal mendasar dalam berbagai industri, mulai dari pendinginan elektronik sistem pembangkit listrik juga pada industri transportasi dan *aerospace*. Keterbatasan ruang dan berat menjadi tantangan utama maka dari itu diperlukan perkembangan dalam miniaturisasi *heat exchanger* yang andal. Dalam hal ini, memahami interaksi yang rumit antara dinamika fluida, perpindahan panas, dan karakteristik permukaan adalah hal yang sangat penting. Salah satu cara yang menjanjikan untuk meningkatkan kinerja perpindahan panas adalah melalui pemanfaatan *fin*, yang memodifikasi dinamika aliran dan luas permukaan yang tersedia untuk *heat exchanger*. Selain itu, pemilihan fluida kerja memainkan peran penting, khususnya dalam aplikasi yang menggunakan fluida dielektrik karena sifat termalnya yang unik dan pertimbangan keselamatannya [2]. Kinerja perangkat dalam berbagai aplikasi semakin bergantung pada kemampuan untuk mengeluarkan kalor dalam jumlah besar sambil menjaga suhu material di bawah batas yang telah ditetapkan. Hal ini mencakup perangkat-perangkat seperti superkomputer, pusat data komputer, elektronika daya kendaraan hibrida, penukar panas untuk penyimpanan hidrogen, radar canggih, peralatan medis sinar-X, avionik pesawat terbang, satelit, pesawat ruang angkasa, serta senjata energi berpengaruh laser dan gelombang mikro, yang secara bersama-sama dikelompokkan sebagai senjata bersuhu relatif rendah [3]. *Flow boiling* menjadi pilihan yang diminati karena menggunakan sistem pendinginan dua fase yang dipompa di berbagai aplikasi industri. Dengan adanya fluks massa yang di hasilkan oleh pompa maka gelembung yang dihasilkan dari *fin* akan lebih banyak tersapu sehingga fluks massa dan kalor berpengaruh terhadap koefisien perpindahan kalor [4]. Pada saat yang sama, pemilihan fluida kerja mempunyai arti penting, khususnya dalam aplikasi yang menggunakan fluida dielektrik, karena sifat termalnya yang unik dan pertimbangan keselamatannya. Penyelidikan Eksperimental mengenai pengaruh geometri *fin* pada koefisien perpindahan panas serta menganalisis fenomena *flow boiling* dalam hubungannya dengan fluida kerja dielektrik. Dengan mengeksplorasi jalur penelitian ini, akan diperoleh informasi terkait mekanisme mendasar yang mengatur peningkatan perpindahan panas dan menawarkan wawasan yang sangat berharga untuk mengoptimalkan sistem manajemen termal. Metode pendinginan ini melibatkan perubahan fase dalam proses transportasi panas dan mengurangi hambatan antarmuka yang umumnya terjadi pada pendinginan tidak langsung. *Pool boiling* dan *flow boiling* telah diterapkan dalam pendinginan perangkat elektronik dan listrik dengan fluks panas tinggi seperti komputer elektronik berkinerja tinggi, baterai kendaraan listrik, dan komponen avionik. Karena cairan pendingin bersentuhan langsung dengan sumber panas elektronik, cairan dielektrik seperti cairan *fluorokarbon* (FC-72, FC-87, dan PF-5060) serta *hidrofluoroeter* (HFE-7000, HFE-7100, HFE-7300) sering digunakan. Pilihan ini dipengaruhi oleh kompatibilitas kimia, kelembaman listrik, dan kekuatan dielektrik yang tinggi. Selain itu, karena titik didihnya yang rendah, cairan dielektrik juga diinginkan untuk aplikasi perpindahan panas mendidih guna menjaga suhu cetakan dalam rentang yang disarankan, yaitu 80°C hingga 130°C [5].

Berbagai studi telah dilakukan untuk memahami dampak geometri saluran tersegmentasi dalam mengurangi ketidakstabilan *flow boiling* yang disebabkan oleh fluida dielektrik [6]. Karena *flow boiling* dalam saluran dengan *pin fin* merupakan topik menarik dalam *heat transfer* dan manajemen termal. Fenomena ini melibatkan cairan mendidih dalam saluran kecil dengan *pin fin* yang meningkatkan perpindahan panas dengan meningkatkan luas permukaan yang tersedia. Tujuan penelitian perpindahan panas pada aliran mendidih adalah untuk mengetahui fenomena termal dan pertumbuhan gelembung yang terjadi selama proses perubahan fasa, khususnya dengan fokus pada perpindahan energi kalor antara permukaan yang dipanaskan dan fluida yang mendidih. Ada berbagai alternatif modifikasi permukaan yang telah dikembangkan untuk perpindahan kalor *flow boiling*. Namun karena sifatnya yang merupakan sistem pendingin aktif, maka diperlukan daya eksternal agar sistem pemompaan dapat mengatasi penurunan tekanan. Ketika kompleksitas permukaan meningkat, penurunan tekanan meningkat, sehingga memerlukan daya eksternal yang tinggi. Salah satu alternatif modifikasi permukaan untuk mentransfer kalor dengan baik adalah dengan memodifikasi permukaan *fin* [7].

Penelitian ini juga mengenai perpindahan panas dan penurunan tekanan pada aliran dua fase telah menjadi fokus selama beberapa dekade karena keduanya merupakan parameter kunci dalam desain penukar kalor, evaporator, kondensor, dan pipa panas. Prediksi yang akurat mengenai perpindahan panas dan penurunan tekanan dalam aliran dua fase sangat penting bagi banyak sistem hemat energi.[8].

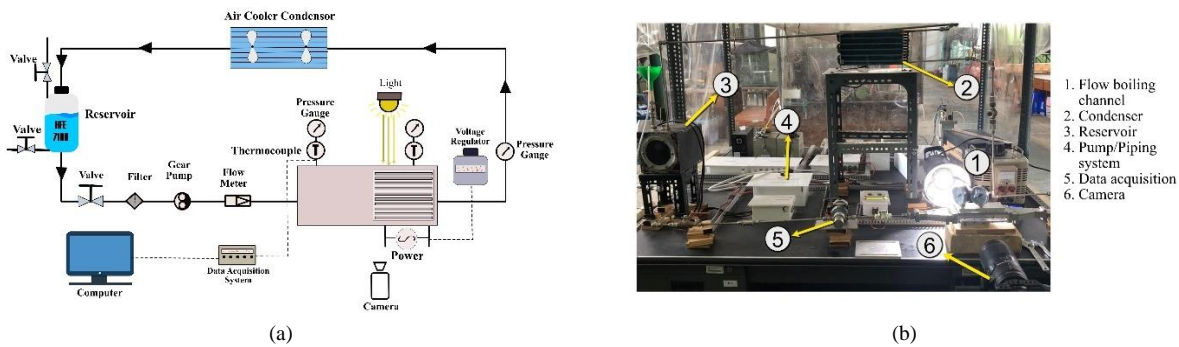
Gelembung mulai muncul pada saat fluks kalor dinaikkan karena terjadi transfer kalor antara permukaan *fin* pada fluida pendingin. Fluida yang kontak terhadap permukaan *fin* akan mengalami kenaikan suhu sehingga membentuk lapisan film. Namun setelah itu, diberikan fluks massa dari pompa sehingga lapisan film menjadi terangkat naik menjadi butiran gelembung sehingga panas yang dibuang semakin optimal.

2. Desain Eksperimen

2.1. Fasilitas Eksperimental

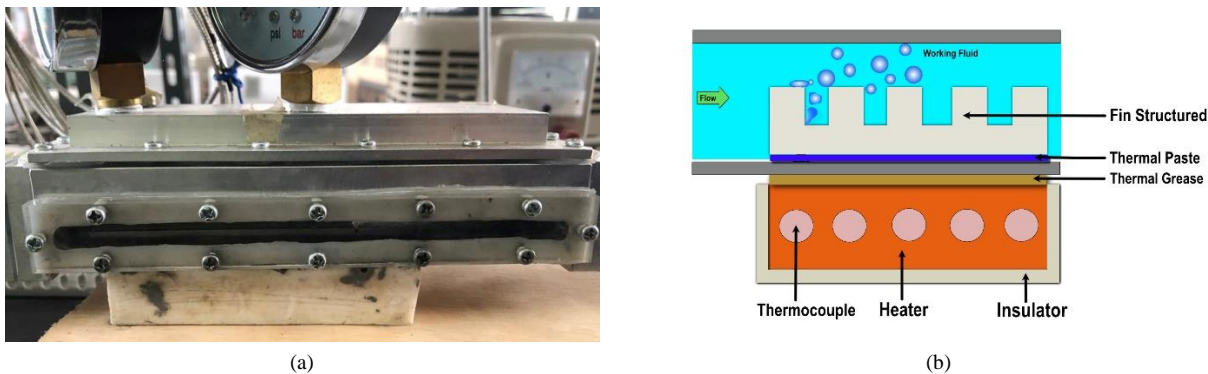
Penelitian ini dilakukan dengan melakukan serangkaian eksperimen pada suatu fasilitas yang disajikan pada Gambar 1. Fasilitas ini terdiri dari beberapa komponen eksperimen, dengan menggunakan *flow boiling channel*, kondensor, reservoir, pompa, sistem perpipaan, dan sistem akuisisi data. Percobaan dilakukan dengan memompa fluida kerja melalui evaporator dengan roda

gigi yang dikontrol. Sampel uji (*Fin*) ditempatkan di dalam evaporator untuk mewakili fluks kalor nyata dalam aplikasi industri. Fenomena *boiling* pada permukaan fin tersebut kemudian direkam oleh seperangkat sensor dan kamera untuk divisualisasikan.



Gambar 1. Fasilitas eksperimen: (a) diagram skematik (b) foto alat uji

Evaporator tempat menempelnya sampel uji terdiri dari beberapa bagian utama seperti terlihat pada Gambar 2. Itu memiliki dimensi total 474 mm (l_e) \times 4 mm (w_e) \times 48 mm (h_e) dan dimensi saluran 60 mm (w_c) \times 18 mm (h_c). Untuk meniru fluks panas dari aplikasi industri, daya total 2100 W dipasang di bawah blok pemanas. Panas yang disuplai dikontrol oleh pengatur tegangan dan dipantau oleh watt meter. Enam termokopel tipe *k* dipasang dekat dengan permukaan blok pemanas untuk memperkirakan suhu permukaan. Sementara itu, dua termokopel tipe *k* lainnya yang digunakan untuk mengukur suhu fluida dipasang di bagian atas saluran. Selanjutnya dua buah *pressure gauge* ditempatkan dekat dengan saluran masuk dan keluar saluran untuk mengukur penurunan tekanan yang disebabkan oleh sistem. Selain itu, jendela transparan dipasang untuk mengamati dan memvisualisasikan fenomena gelembung selama percobaan.



Gambar 2. (a) Flow boiling chamber (b) skema penempatan sensor.

Terdapat beberapa jenis fluida yang digunakan untuk sistem pendingin dalam industri besar maupun industri berskala kecil. Dalam eksperimen ini, untuk mempercepat perubahan fasa agar pendinginannya lebih optimal, jenis fluida yang memiliki *boiling point* rendah, yaitu 61°C, merupakan sebuah pilihan yang tepat. Selain memiliki *boiling point* yang rendah kami juga memerlukan jenis fluida yang memiliki sifat dielektrik. Hal tersebut dikarenakan eksperimen ini bertujuan untuk mendinginkan perangkat elektronik yang mengharuskan fluida kontak langsung dengan komponen elektronik, maka dipilihlah cairan dielektrik HFE-7100. Pada Tabel 1 berikut, dipaparkan informasi terkait mekanikal properti fluida dielektrik HFE-7100.

Tabel 1. Properti HFE-7100 Pada tekanan 1 atm dan suhu 25°C [9]

Properti	Nilai
Titik didih pada 1 atm (°C)	61
Tekanan uap (kPa)	28
Massa jenis liquid (kg/m ³)	1418
Massa jenis uap (kg/m ³)	9,7
Kalor jenis uap (kg.m ³)	1170
Kalor laten (kJ/kg)	112
Konduktivitas termal (W/m.K)	0,68

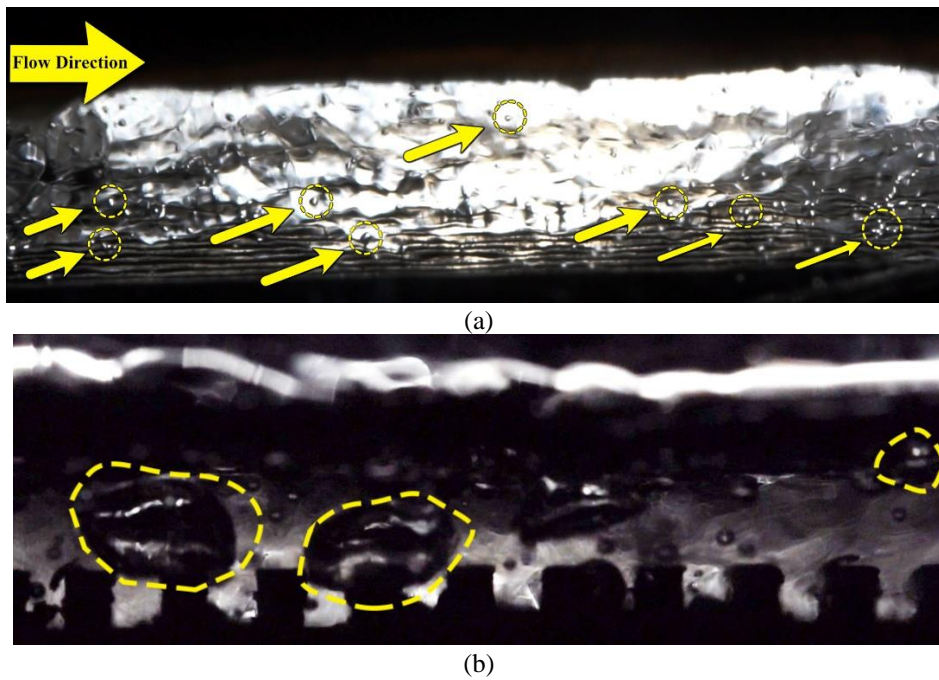
Properti	Nilai
Tegangan permukaan (mN/m)	13,6
Dielectric strength (kV)	28
Konduktivitas Termal (W/mK)	0,062
Viskositas fase liquid (kg/m.s)	$4,268 \times 10^{-4}$
Viskositas fase uap (kg/m.s)	$1,218 \times 10^{-4}$
Spesifik volume fase liquid (m^3/kg)	$7,05 \times 10^{-4}$
Spesifik volume fase uap (m^3/kg)	0,103

2.2. Mekanisme Pengambilan Data

Dilakukan analisis sistematis terhadap pola *flow boiling* dalam pipa horizontal, prinsip-prinsip dasar transfer kalor, serta eksperimen untuk menentukan karakteristik *boiling point* dalam sistem refrigerasi dua fase. Selanjutnya dilakukan inspeksi kebocoran dengan cara sistem ini diisi dengan udara pada tekanan absolut sebesar 1,0 bar. Apabila terjadi kebocoran yang dapat diperbaiki dengan *sealer*, tindakan penutupan akan dilakukan menggunakan bahan adhesif termal. Fin direkatkan menggunakan thermal paste jenis kafeuter untuk memaksimalkan transfer kalor dan mengurangi rongga yang menghalangi kontak fin dengan sumber panas. Pada bagian heater juga diberi termal grease untuk memaksimalkan transfer panas pada fin. Fasilitas ini terdiri dari berbagai komponen utama, yaitu reservoir, *flow boiling channel*, blok pemanas, kondensor, micro gear pump, sistem akuisisi data, dan sistem perpipaan dengan berbagai komponen pendukungnya. Blok pemanas mampu menghasilkan fluks kalor hingga $42,69 \text{ W/cm}^2$ dan dilengkapi dengan teflon untuk mengurangi rugi kalor. *Flow boiling channel* yang terletak tepat di atas blok pemanas terbuat dari aluminium dan dilengkapi dengan vane guide untuk mengkondisikan aliran fluida agar berkembang sepenuhnya. Bagian atas dan samping evaporator terbuat dari akrilik polikarbonat transparan untuk mengamati fenomena aliran mendidih. Fluida yang digunakan adalah udara dan HFE-7100 yang dialirkan dalam sistem loop tertutup menggunakan micro gear pump. Sistem kondensor menggunakan aliran cross flow udara sebagai pendingin untuk mengembalikan cairan ke fase cair. Seluruh sistem perpipaan terbuat dari baja tahan karat dengan fitting, katup, dan kaca penglihatan untuk mengarahkan dan menyatukan aliran fluida. Dengan menggunakan komponen dan sistem yang terintegrasi ini, fasilitas eksperimen *flow boiling* ini mampu mengukur dan memvisualisasikan fenomena perpindahan kalor serta perubahan fasa pada sistem pendingin dua fasa, memberikan pemahaman yang lebih baik tentang kinerja dan efisiensi sistem pendingin tersebut. Untuk kebocoran dengan dimensi sangat kecil namun jumlahnya besar dan tidak dapat diperbaiki, maka komponen yang bermasalah akan dimanufaktur ulang. Setelah kebocoran dieliminasi, langkah berikutnya melibatkan pengaturan perangkat secara berkala saat pengambilan data untuk pemantauan fenomena *boiling*. Analisis dilakukan pada daya pemanasan 20, 40, 60 dan 80 W dengan fluks massa mencapai 1-2 Lpm. Langkah selanjutnya adalah proses dokumentasi menggunakan perangkat kamera dengan framerate 120fps yang bertujuan untuk memvalidasi data yang tercatat.

3. Hasil dan Diskusi

Fenomena *boiling* merupakan parameter yang penting untuk diketahui dalam penelitian ini. Hal ini dikarenakan melalui visualisasi citra fenomena *boiling* yang terjadi akan diketahui pola aliran dan pembentukan gelembung-gelembung yang terjadi. Hasil visualisasi arah aliran dan bentuk gelembung pada fenomena *flow boiling* dapat dilihat pada Gambar 3, dapat dilihat perbandingan antara *flow boiling* dengan adanya fluks massa dan tanpa adanya fluks massa pada *flow boiling* dengan fluks massa, gelembung yang terbentuk cenderung lebih kecil dan seragam. Hal ini disebabkan oleh fluks massa fluida yang konstan sehingga dapat membawa gelembung menjauhi permukaan fin sebelum sempat membesar dengan adanya fluks massa ini dapat meningkatkan efisiensi transfer panas dengan menghambat terbentuknya *film boiling*.

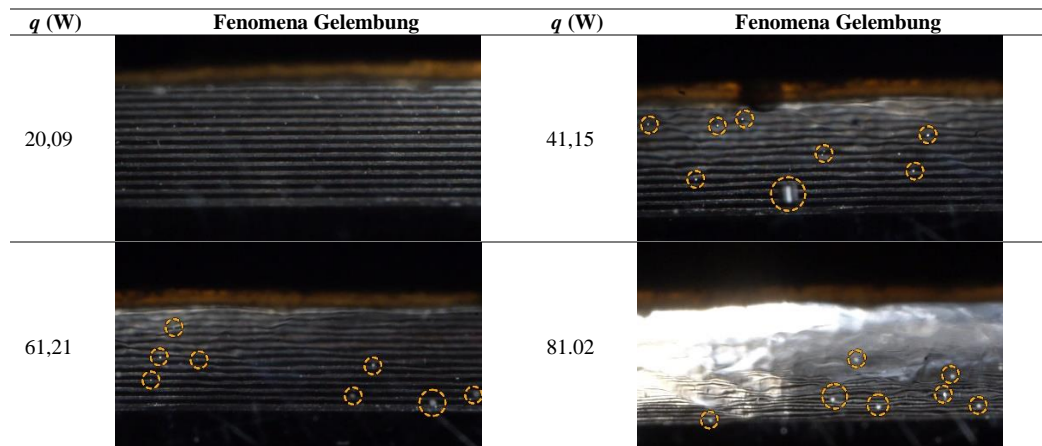


Gambar 3. Flow boiling dengan (a) fluks massa (b) tanpa fluks massa

Dalam Gambar 4 dan 5, walaupun ukuran gelembung yang terbentuk serupa di kedua kondisi, perbedaan yang signifikan terletak pada jumlah gelembung yang lebih banyak dalam keadaan dengan aliran yang lebih kencang. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan aliran mempengaruhi secara langsung proses pembentukan gelembung dalam *flow boiling*. Aliran yang lebih cepat memfasilitasi transfer panas yang lebih efektif dari permukaan pemanas ke fluida. Seiring dengan fluida yang bergerak cepat melalui permukaan fin, tidak hanya lebih banyak panas yang ditransfer, tetapi juga gelembung yang terbentuk lebih cepat diangkat dari permukaan. Ini berarti gelembung tetap kecil karena tidak memiliki kesempatan untuk tumbuh sebelum dibuang dari area panas. Penghilangan gelembung yang cepat dari permukaan juga berkontribusi pada stabilitas termal di permukaan, yang mengurangi superheat lokal keadaan di mana suhu permukaan melebihi suhu didih fluida karena akumulasi gelembung. Dengan penghilangan gelembung yang efisien, permukaan cepat terkena fluida yang lebih dingin, memungkinkan formasi gelembung yang lebih banyak dan lebih kecil secara berkelanjutan. Ini menciptakan lingkaran dimana permukaan terus-menerus terpapar pada fluida yang membawa panas, memfasilitasi pembentukan gelembung secara konsisten. Oleh karena itu, fluks massa yang lebih tinggi tidak hanya meningkatkan efisiensi transfer kalor melalui peningkatan pertukaran panas antara permukaan dan fluida, tetapi juga dengan mengatur frekuensi dan distribusi gelembung yang terbentuk. Aspek ini sangat penting dalam aplikasi industri seperti dalam sistem pendinginan reaktor nuklir atau proses evaporasi di sektor makanan dan minuman, di mana kontrol yang ketat atas pemanasan dan pembentukan uap sangat krusial.

q (W)	Fenomena Gelembung	q (W)	Fenomena Gelembung
20,09		41,15	
61,21		81,02	

Gambar 4. Gambar fenomena boiling untuk *straight fin* dengan fluks massa sebesar 1,075 Lpm

Gambar 5. Gambar fenomena *boiling* untuk *straight fin* dengan fluks massa sebesar 2,046 Lpm

4. Kesimpulan

Dari pembahasan di atas, dapat disimpulkan bahwa kecepatan aliran fluida memiliki pengaruh yang signifikan terhadap pembentukan gelembung dalam kondisi *flow boiling*. Gelembung yang terbentuk cenderung kecil karena terpengaruh oleh aliran fluida yang menyapu permukaan fin. Fenomena ini menyebabkan terhambatnya pembentukan lapisan film pada permukaan fin. Akibatnya, laju transfer panas meningkat karena keterlambatan pembentukan lapisan film tersebut, sehingga mempercepat proses perpindahan panas dari permukaan fin ke fluida sekitarnya. Secara umum, visualisasi yang menunjukkan jumlah gelembung yang melimpah dan memiliki pola yang acak cenderung terjadi pada kondisi di mana fluks massa relatif tinggi. Perbedaan ini terlihat pada fase awal di mana gelembung belum muncul ketika fluks massa masih rendah, namun ketika fluks massa ditingkatkan, jumlah gelembung yang dihasilkan meningkat signifikan dan proses pertumbuhannya terjadi dengan cepat. Fenomena ini mengindikasikan peningkatan kinerja sistem pendingin karena jumlah gelembung yang dihasilkan lebih banyak. Selain itu, selama eksperimen, teramati bahwa terjadi pergeseran dalam perilaku gelembung. Ketika koefisien perpindahan panas meningkat, jumlah gelembung yang dihasilkan juga meningkat namun dengan periode pelepasan yang lebih singkat.

Acknowledment

Riset ini didanai oleh hibah penelitian Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi (PDUPT) Ministry of Education, Culture, Research, and Technology Indonesia Year 2023 Number 2135/UN1/DITLIT/Dit-Lit/PT.01.03/2023 and a research grant of Final Project 605 Recognition Grant Universitas Gadjah Mada Number 5075/UN1.P.II/Dit- Lit/PT.01.01/2023.

Referensi

- [1] I. Pranoto, M. A. Rahman, C. D. Wicaksana, A. E. Wibisono, Fauzun, and A. Widyatama, "Flow Boiling Heat Transfer Performance and Boiling Phenomena on Various Straight Fin Configurations," *Fluids*, vol. 8, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/fluids8030102.
- [2] B. Parizad Benam, A. K. Sadaghiani, V. Yağcı, M. Parlak, K. Sefiane, and A. Koşar, "Review on high heat flux flow boiling of refrigerants and water for electronics cooling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 180. Elsevier Ltd, Dec. 01, 2021. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121787.
- [3] G. Liang and I. Mudawar, "Review of pool boiling enhancement by surface modification," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 128. Elsevier Ltd, pp. 892–933, Jan. 01, 2019. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.026.
- [4] I. Pranoto and K. C. Leong, "An experimental study of flow boiling heat transfer from porous foam structures in a channel," *Appl Therm Eng*, vol. 70, no. 1, pp. 100–114, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.04.027.
- [5] K. C. Leong, J. Y. Ho, and K. K. Wong, "A critical review of pool and flow boiling heat transfer of dielectric fluids on enhanced surfaces," *Applied Thermal Engineering*, vol. 112. Elsevier Ltd, pp. 999–1019, Feb. 05, 2017. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.138.
- [6] M. Mohammadilooney *et al.*, "Multiple hot spot cooling with flow boiling of HFE-7000 in a multichannel pin fin heat sink," *Appl Therm Eng*, vol. 247, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123077.
- [7] B. Markal, A. Evcimen, and O. Aydin, "Effect of inlet temperature on flow boiling behavior of expanding micro-pin-fin type heat sinks," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 149, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.107143.
- [8] B. L. Chen, T. F. Yang, U. Sajjad, H. M. Ali, and W. M. Yan, "Deep learning-based assessment of saturated flow boiling heat transfer and two-phase pressure drop for evaporating flow," *Eng Anal Bound Elem*, vol. 151, pp. 519–537, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.enganabound.2023.03.016.
- [9] "3M™ Novec™ 7100 Engineered Fluid."

