



PAPER – OPEN ACCESS

## Pengaruh Variasi Bentuk Gelombang Aktuasi Akustik terhadap Koefisien Perpindahan Panas Boiling Kolam

Author : Jihan Zeinyuta Rosafira, dkk  
DOI : 10.32734/ee.v6i1.1890  
Electronic ISSN : 2654-7031  
Print ISSN : 2654-7031

*Volume 6 Issue 1 – 2023 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



# Pengaruh Variasi Bentuk Gelombang Aktuasi Akustik terhadap Koefisien Perpindahan Panas Boiling Kolam

Jihan Zeinyuta Rosafira<sup>a1</sup>, Azhar Syafiq Putra<sup>a</sup>, Adhika Widyaparaga<sup>b</sup> I Made Miasa<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Prodi Magister Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

<sup>b</sup>Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia

[jihanzeinyuta@mail.ugm.ac.id](mailto:jihanzeinyuta@mail.ugm.ac.id)

## Abstrak

Penelitian dilakukan pada efek gelombang audio-sonik pada perpindahan panas didih nukleat dan perilaku gelembung bentuk gelombang sinus, persegi, dan segitiga. Pembentukan dan evolusi gelembung dalam *pool boiling* adalah faktor penting yang menentukan perpindahan panas. Kami mengeksplorasi gelombang audio-sonik untuk meningkatkan perpindahan panas didih dengan mengubah pembentukan dan evolusi gelembung. Kurva *pool boiling* dan dinamika gelembung yang sesuai dari bentuk gelombang sonik bentuk sinus, segitiga, persegi pada 10 kHz dan tanpa getaran diselidiki berdasarkan eksperimen visualisasi. Hasilnya menunjukkan bahwa perpindahan panas mendidihnya berubah ke tingkat yang berbeda. *Heat Transfer Coefficient* (HTC) dari kurva gelombang persegi memiliki nilai tertinggi. Hal ini dipengaruhi karena jenis gelombang persegi memiliki spektrum frekuensi yang lebih kompleks dibanding bentuk gelombang sinus maupun segitiga, banyak harmonik yang ditimbulkan menyebabkan proses kavitasi yang terjadi semakin cepat. Maka bentuk gelombang mempengaruhi proses perpindahan panas meski pada frekuensi yang sama.

Kata Kunci: Aktuasi Akustik; Bentuk Gelombang; *Heat Transfer Coefficient*; *Pool Boiling*

## Abstract

Research was conducted on the effects of audio-sonic waves on nucleic boiling heat transfer and bubble behavior of sine, square, and triangular waveforms. The formation and evolution of bubbles in *pool boiling* is an important factor determining heat transfer. We exploit audio-sonic waves to enhance boiling heat transfer by altering the formation and evolution of bubbles. The *pool boiling* curve and the corresponding bubble dynamics of the sine, triangular, square sonic waveforms at 10 kHz and without vibration were investigated based on visualization experiments. The results show that the boiling heat transfer changes to a different degree. The *Heat Transfer Coefficient* (HTC) of the square wave curve has the highest value. This is affected because the type of square wave has a more complex frequency spectrum than sine or triangular waveforms, the many harmonics generated cause the cavitation process to occur faster. Then the shape of the wave affects the process of heat transfer even at the same frequency.

Keywords: Acoustic Actuation; Heat Transfer Coefficient; Pool Boiling; Waveform

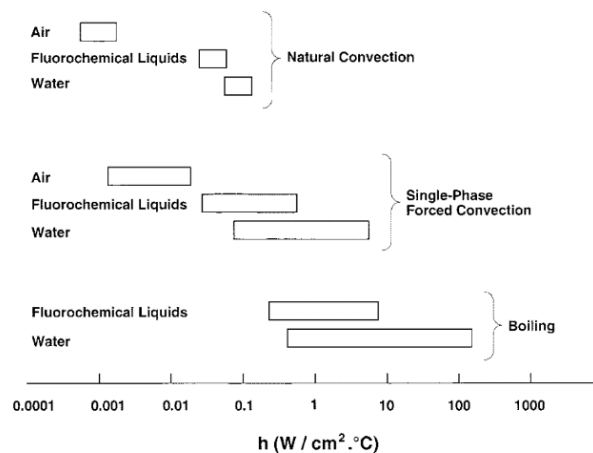
### 1. Pendahuluan

Dalam konteks netralisasi karbon, strategi paling signifikan yang dapat dilakukan adalah dengan pemanfaatan energi terbarukan, sistem penyimpanan energi, dan peningkatan efisiensi energi. Efisiensi perpindahan panas juga penting dalam memanfaatkan energi, termasuk energi terbarukan, tersimpan, dan bahan bakar fosil. Oleh karena itu, perlu untuk mempelajari transportasi termal dalam upaya meningkatkan efisiensi energi pada sistem elektronik berdaya tinggi seperti laser, diode pemancar cahaya, mikroprosesor, radar, dan lain sebagainya [1].

Manajemen termal dan pendingin elektronik telah menjadi topik yang semakin menarik perhatian. Hal ini disebabkan kemajuan terbaru dalam teknologi mikroelektronika dalam miniaturisasi perangkat elektronik yang berkelanjutan dan peningkatan *heat flux* yang cepat. Panas luar biasa yang dihasilkan oleh *chip* berperforma tinggi harus segera dihilangkan karena panas yang terakumulasi dapat mengakibatkan suhu operasi tinggi dan mampu menurunkan kinerja serta keandalan perangkat, bahkan menyebabkan kerusakan serius [2].

Masalah ini dapat diatasi dengan pengembangan teknologi pendinginan yang tepat, tinjauan dan analisis penelitian terhadap kemajuan teknologi pendinginan mengungkapkan bahwa pendinginan berbasis saluran mikro dan perubahan fase (cair) adalah salah satu teknik yang paling menjanjikan yang mampu mencapai tingkat penghilangan panas yang sangat tinggi [3].

Peneliti telah mengembangkan berbagai teknologi pendingin untuk mengatasi masalah panas pada perangkat elektronik. *Two-phase cooling system* memiliki kemampuan pendinginan yang lebih tinggi daripada *natural cooling system* dan *single-phase cooling system*. Metode *boiling cooling system* digunakan pada *two-phase cooling system* untuk memindahkan panas lebih efektif. Ada dua jenis *boiling cooling system* yaitu jenis *pool boiling* dan jenis *flow boiling*. *Pool boiling* ini merupakan jenis cairan pendingin yang sengaja dibiarkan untuk merendam *heating surface* namun tanpa disertai pengaliran cairan pendingin [4].



Gambar 1. Heat Transfer Coefficient pada Kondisi Natural, Single-Phase Forced Convection dan Kondisi Boiling untuk Jenis Fluida Kerja Berbeda

Di antara berbagai metode manajemen termal, perpindahan panas *pool boiling* menyediakan sebagian besar kapasitas tinggi untuk pembuangan panas dan lebih dapat dimanipulasi untuk pengembangan perangkat yang diterapkan pada skenario pendinginan praktis. Dalam prosesnya, energi panas dihamburkan dari *hotspot* terutama oleh perpindahan panas perubahan fasa fluida kerja melintasi antarmuka cair-uap yang disebabkan oleh nukleasi, pertumbuhan, dan keluarnya gelembung uap (Incropera dkk., 2007) [5]. Performa mendidih dapat diwakili secara bersamaan oleh *Heat Transfer Coefficient* (HTC) dan *Critical Heat Flux* (CHF). Di sini, CHF memberikan batas atas

perangkat termal yang dapat diterapkan dan merupakan faktor penting untuk diperiksa jika terjadi peningkatan suhu permukaan secara tiba-tiba, yang menyebabkan bahaya suhu pada peralatan atau sistem.

Telah banyak penelitian dilakukan meningkatkan nilai HTC dan CHF pada *pool boiling* salah satunya seperti yang telah dilakukan [6] dengan bervariasi kekasaran permukaan sumber termal, didapatkan hasil HTC dan CHF serta frekuensi gelembung meningkat mengikuti peningkatan *heat flux* terjadi pada permukaan yang memiliki kekasaran tinggi. Penelitian lain dilakukan [7] terjadi peningkatan HTC pada permukaan halus dan berpori sebesar 23,7% dan 30% dengan menambahkan gelombang ultrasonik.

Salah satu usulan untuk meningkatkan perpindahan kalor *boiling* adalah dengan menerapkan aktuasi akustik dengan aplikasi ultrasonik. Teknik ini melibatkan pemanfaatan medan akustik dan efek streaming akustik [8]. Selain itu, gelombang ultrasonik juga mengurangi pengendapan partikel sehingga tetap dalam keadaan stabil dan mampu meningkatkan koefisien perpindahan panas [9]. Efek medan ultrasonik pada perpindahan kalor dalam *boiling system* menghasilkan pembentukan kavitasasi di dalam fluida yang mengakibatkan peningkatan signifikan dalam turbulensi gelembung laju perpindahan panas [10].

Gelombang ultrasonik dapat menyebar melalui benda padat, cair, dan gas. Tingkat pantulan gelombang ultrasonik pada permukaan benda padat hampir serupa dengan tingkat pantulan pada permukaan benda cair [11]. Pada aplikasi teknologi yang semakin maju juga dilakukan upaya untuk mengganti bentuk gelombang tidak hanya pada bentuk sinus, tetapi pada bentuk lain [12].

Studi eksperimental sistem pendingin *pool boiling* dengan penambahan aktuasi akustik dibutuhkan karena di Indonesia masih tergolong sedikit, khususnya di perguruan tinggi. Oleh karena itu, studi eksperimental ini bertujuan untuk mendapatkan nilai HTC dengan variasi *waveform* dan frekuensi. Diharapkan studi eksperimental ini dapat digunakan sebagai referensi untuk pengembangan teknologi.

## 2. Metode Penelitian

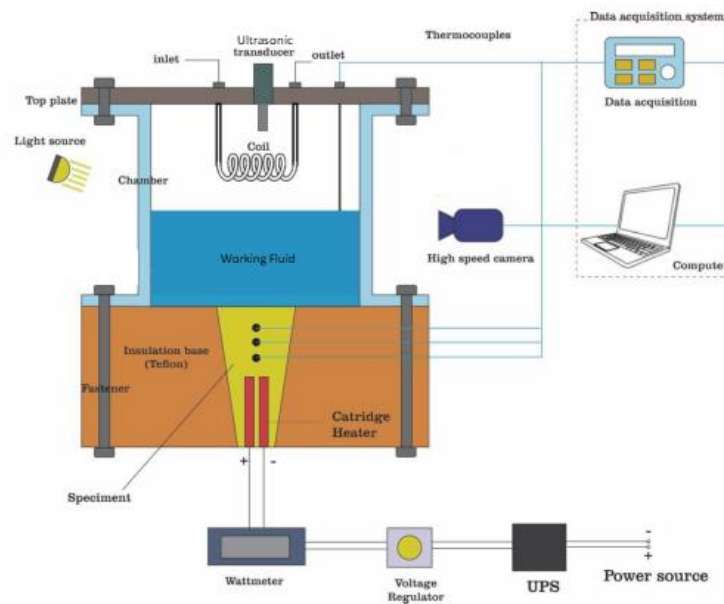
Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Akustik dan Getaran Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada.

### 2.1. Skema Alat Uji Penelitian

Alat eksperimen *pool boiling* terdiri dari *heater* dan *boiling chamber*. *Heater* terbagi menjadi *main heater* dan *immersion heater*. *Boiling chamber* memposisikan fungsi sebagai wadah dalam fluida kerja dan pengamatan fenomena. Kalor yang diterima *main heater* di transferkan ke fluida kerja, yang berubah menjadi uap dan menuju *condenser*. Fluida kerja di dalam *condenser* diatur oleh *bath circulator* atau pompa. Fluida kerja dijaga pada *temperature* saturasi dan tekanan atmosfer dengan *immersion heater* dan *pressure transducer*. Terdapat 4 *thermocouple* yang mengukur *temperature* permukaan benda uji dan *bulk temperature* fluida kerja. Data tersebut direkam oleh data akusisi. Sebuah kamera digunakan untuk merekam mekanisme pembentukan uap dan sistem penerangan digunakan untuk mempermudah pengamatan.

### 2.2. Prosedur Penelitian

Dalam penelitian ini digunakan cairan yang bekerja dalam rangka air sulingan. Selama proses pengujian, cairan yang bekerja di dalam *boiling chamber* dipertahankan pada suhu saturasi dan berat pada berat udara. Untuk menjaga suhu pada suhu perendaman digunakan *immersion heater* yang dapat menaikkan suhu cairan kerja sebagai akibatnya ketika suhu cairan kerja turun di bawah suhu jenuhnya. Sementara itu, transduser berat digunakan untuk mengukur berat di dalam *boiling chamber* dan menjaga berat pada berat barometrik.



Gambar 2. Skematik Alat Pool Boiling

Daya yang dihasilkan dari *immersion heater* dinaikkan bertahap hingga sebesar 30 – 600 Watt pada saat percobaan dilakukan. Pembacaannya dilakukan menggunakan *wattmeter* sedangkan pengaturan daya dengan menggunakan sebuah *voltage regulator*. Pengambilan data temperatur dilakukan *continues* setelah *heater* dijalankan sesuai daya yang diinginkan. Hal ini dilakukan agar terlihat persebaran panas yang terjadi secara merata. Pembacaan suhu oleh masing-masing termokopel akan digunakan untuk mengetahui perkiraan suhu benda uji sebagai hasil akhir. Temperatur yang dievaluasi pada permukaan soal tes, dihitung dengan menggunakan kondisi:

$$T_w = T_{ther} - \frac{q'' \cdot \Delta T}{q''} \quad (1)$$

Sedangkan pada *heat transfer coefficient*, persamaan yang digunakan untuk perhitungan adalah:

$$h = \frac{q''}{T_w - T_{sat}} \quad (2)$$

### 2.3. Sistem Akuisisi Data

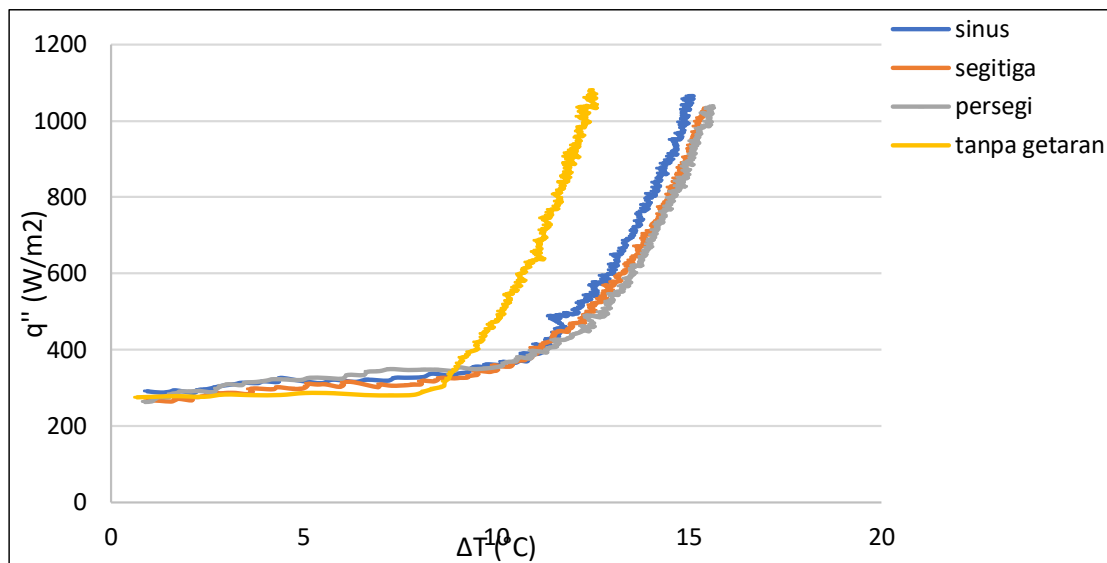
Semua informasi suhu melalui termokopel diperoleh dengan memanfaatkan pengamanan informasi dalam kerangka NI cDAQ-9181. Semua informasi suhu diperoleh dengan menggunakan program LabVIEW. Sebelum percobaan, setiap termokopel dikalibrasi untuk memulai. Berdasarkan hasil spesifikasi, *thermocouple* ini memiliki tingkat ketepatan dengan besar  $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 3. Hasil dan Diskusi

### 3.1. Kurva Pool Boiling

Kurva *pool boiling* yang ada untuk masing-masing waveform ditampilkan pada gambar 3. Terlihat bahwa semua bentuk pengujian mengalami kenaikan, hal ini dipengaruhi oleh penambahan kalor heat input yang dilakukan pada pengujian. Pada  $\Delta T$  kurang dari 10 dan sampai  $q''$  300 kurva merambat dengan memadai. Setelah titik ini terjadi lonjakan yang signifikan karena pada titik ini terjadi perubahan fasa dari air menjadi uap. Setelah titik ini kurva

tanpa getaran memiliki perbedaan diantara kurva lainnya. Kurva ini hanya berkisar pada  $\Delta T$  11, hal ini terjadi karena secara alami perpindahan panas secara alami.



Gambar 3. Kurva *Pool Boiling* untuk Masing-Masing *Waveform*

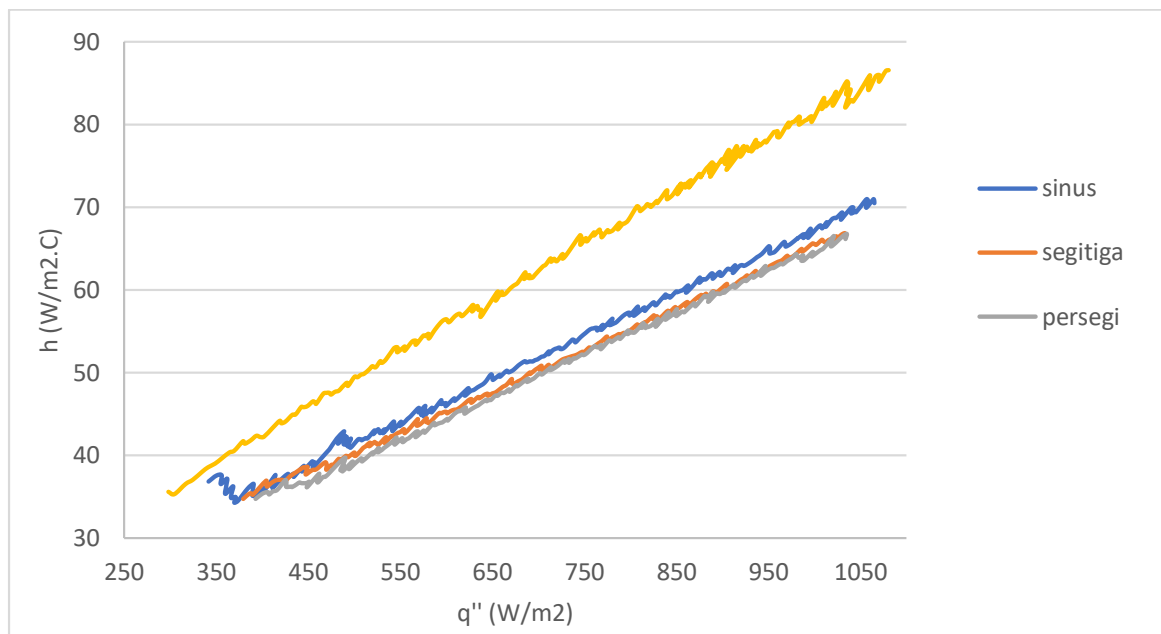
Pada kurva yang diberi getaran mengalami pergeseran kurva yang cukup signifikan. Pada gelombang sinus hanya memiliki  $\Delta T$  kurang dari 15, tetapi memiliki nilai  $q''$  paling besar diantara ke-3nya. Sedangkan bentuk persegi memiliki  $\Delta T$  paling besar yaitu 15. Pada gelombang segitiga juga memiliki nilai  $\Delta T$  15 tetapi persebaran  $q''$  tidak cukup cepat disbanding persegi.

Hal ini terjadi karena setiap gelombang memiliki karakteristik masing-masing yang mempengaruhi perambatan panas pada *pool boiling*. Gelombang sinus memiliki spektrum frekuensi tunggal yang terpusat pada frekuensi dasar. Sementara itu, gelombang persegi memiliki spektrum frekuensi yang lebih kompleks dengan banyak harmonik yang ditimbulkan, sedangkan gelombang segitiga memiliki spektrum frekuensi yang mirip dengan gelombang persegi, namun dengan harmonik yang lebih rendah. Semakin kompleks spektrum frekuensi gelombang, maka semakin mempercepat proses perpindahan panas.

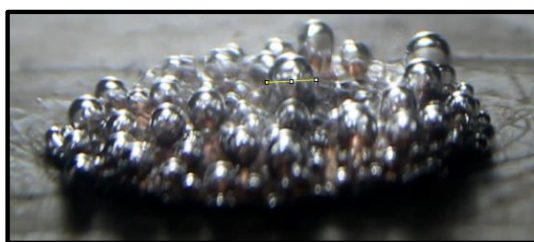
### 3.2. Karakteristik *Heat Transfer Coefficient Pool Boiling*

Gambar 4 menampilkan nilai *heat transfer coefficient* (HTC) saat eksperimen pada *pool boiling* berlangsung. Pada kurva tanpa getaran memiliki nilai  $q''$  lebih dari 1050 dan  $h$  88, hal ini menjadikan kurva tanpa getaran memiliki nilai paling tinggi, ini terjadi karena proses konveksi alami yang terjadi pada *pool boiling*. Sedangkan pada gelombang sinus memiliki kasus serupa tetapi dengan nilai  $h$  70 dan  $q''$  1050. Gelombang persegi dan segitiga memiliki nilai  $h$  sama yaitu sekitar 68, yang menjadi berbeda adalah proses gelombang persegi memiliki kecenderungan lebih landau disbanding gelombang segitiga.

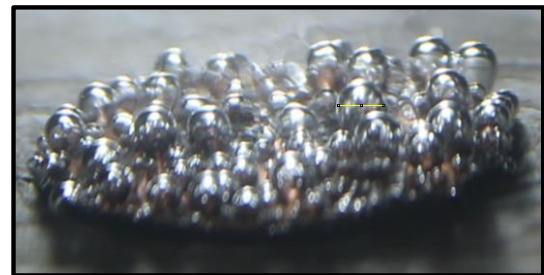
Gelombang persegi memiliki garis kurva terbaik diantara lainnya, sebab dengan melandainya kurva HTC akan menggeser kurva *boiling* sehingga memperkecil terjadinya *critical heat flux* dalam waktu singkat yang menjadikan proses transfer panas dapat terus berlangsung pada suhu tinggi dan memperkecil terjadinya *burnout*.



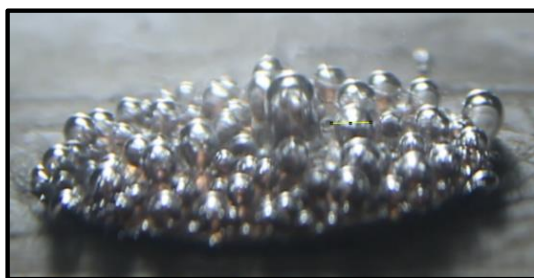
Gambar 4. Kurva Heat Transfer Coefficient untuk Masing-Masing Waveform



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 5. Gelembung yang Dihasilkan pada Permukaan Sumber Panas (A) Gelombang Sinus (B) Segitiga (C) Persegi (D) Tanpa Getaran pada HTC 38,03 Kw/M<sup>2</sup>

Nilai HTC yang tinggi disebabkan proses perpindahan panas dari sumber panas ke fluida kerja. Pada gambar 5 warna kuning merupakan bagian gelembung yang diamati (d) *buble* yang terbentuk memiliki ukuran paling besar 147 mm. Pada (a) berukuran 117 mm, (b) 95 mm dan (c) 87 mm. Semakin kecil gelembung yang terbentuk dan lepas pada eksperimen ini, maka proses perpindahan panas yang terjadi semakin cepat, karena gelembung yang berukuran

lebih kecil akan mudah terbentuk dan terlepas sehingga proses transfer panas terjadi dengan cepat menyebabkan proses berjalan dengan baik.

#### 4. Kesimpulan

Telah dilaksanakan sebuah penelitian mengenai efek pengaruh aktuasi akustik dengan variasi bentuk gelombang terhadap fenomena *pool boiling* yang dirangkum pada tulisan ini. Terdapat tiga jenis *waveform* yaitu gelombang sinus, segitiga, dan persegi serta ditambahkan perlakuan tanpa diberi getaran. Dapat disimpulkan bahwa:

- Gelombang yang memiliki spektrum frekuensi yang lebih kompleks (persegi dan segitiga) mampu menimbulkan kavitasi lebih cepat dibanding dengan gelombang spektrum frekuensi tunggal (sinus).
- Gelombang persegi memiliki ukuran gelembung lebih kecil yaitu sebesar 87 mm pada HTC 38,03 kW/m<sup>2</sup> dan *heat flux* 493,32 W/m<sup>2</sup>.
- Semakin kecil ukuran gelembung, proses tranfer panas akan lebih cepat, karena gelembung yang kecil mudah terbentuk dan mudah lepas.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis yang terlibat ingin mengucapkan rangkaian terima kasih atas dukungan, bantuan, dan dorongan yang berasal dari rekan kerja, Pembimbing, Laboran, dan semua anggota Lab. Dinamika UGM, Yogyakarta.

#### Referensi

- [1] Wen, R., Ma, X., Lee, Y. C., & Yang, R. (2018). Liquid-Vapor Phase-Change Heat Transfer on Functionalized Nanowired Surfaces and Beyond. Dalam *Joule* (Vol. 2, Nomor 11, hlm. 2307–2347). Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.08.014>
- [2] Sohel Murshed, S. M., & Nieto de Castro, C. A. (2017). A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling. Dalam *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 78, hlm. 821–833). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.112>
- [3] Agostini, B., Fabbri, M., Park, J. E., Wojtan, L., Thome, J. R., & Michel, B. (2007). State of the art of high heat flux cooling technologies. *Heat Transfer Engineering*, 28(4), 258–281. <https://doi.org/10.1080/01457630601117799>
- [4] Kreith, Frank. (2000). *The CRC handbook of thermal engineering*. CRC Press.
- [5] Mudawar, I. (2001). Assessment of high-heat-flux thermal management schemes. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 24(2), 122–141. <https://doi.org/10.1109/6144.926375>
- [6] Dimiyati Nashrullah, M., Adhika Angkasa, A., Gregory Ginting, M., Widyaparaga, A., & Pranoto, I. (2019). *Effect of Surface Roughness on Pool Boiling Heat Transfer Coefficient* (Vol. 9).
- [7] Yang, M., Zhao, Z., Zhang, Y., Pu, X., & Liu, X. (2023). Visualization experiment on the evolution of vapor bubbles in pool boiling heat transfer enhancement of the smooth and porous surfaces using ultrasonic waves. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123807>
- [8] Lee, D., Lim, J.-S., Lee, N., & Cho, H. H. (2019). Enhanced thermal uniformity and stability in pool boiling heat transfer using ultrasonic actuation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 106, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.03.019>
- [9] Khooshehchin, M., Mohammadidoust, A., & Ghotbinasab, S. (2020). An optimization study on heat transfer of pool boiling exposed ultrasonic waves and particles addition. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104558>
- [10] Schmidt, F. W., Torok, D. F., & Robinson, G. E. (1967). Experimental Study of the Effects of an Ultrasonic Field in a Nucleate Boiling System. *Journal of Heat Transfer*, 89(4), 289–294. <https://doi.org/10.1115/1.3614387>
- [11] Liu, C., Harley, J. B., Bergés, M., Greve, D. W., & Oppenheim, I. J. (2015). Robust ultrasonic damage detection under complex environmental conditions using singular value decomposition. *Ultrasonics*, 58, 75–86. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.12.005>
- [12] Puskas, W. L., Piazza, T., Main, N., & Jamestown, S. (t.t.). *Designer Waveforms: Ultrasonic Technologies to Improve Cleaning and Eliminate Damage*.