



PAPER – OPEN ACCESS

## Pengaruh Aktuasi Getaran Akustik Terhadap Boiling Heat Transfer Dengan Variasi Frekuensi dan Daya Input Pada Fenomena Pool Boiling

Author : Azhar Syafiq Putra, dkk  
DOI : 10.32734/ee.v6i1.1885  
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 Aktuasi Getaran Akustik Terhadap *Boiling Heat Transfer* Dengan Variasi Frekuensi dan Daya Input Pada Fenomena *Pool Boiling*

Azhar Syafiq Putra<sup>a</sup>, Adhika Widyaparaga<sup>a</sup>, I Made Miasa<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Jl. Grafika No.2, Yogyakarta 55281, Indonesia  
azharsyafiqputra@gmail.com, adhika@ugm.ac.id, miasa@ugm.ac.id

## Abstrak

Paper ini merupakan studi eksperimen yang menjelaskan tentang pengaruh aktuasi getaran akustik menggunakan frekuensi 5 kHz dan 15 kHz dengan menampilkan kinerja perpindahan kalor dan fenomena *boiling*. Getaran akustik dibangkitkan melalui instrument *sonicator* dengan *horn design straight* yang diterapkan pada fluida kerja dan struktur *boiling chamber*. Pengujian *pool boiling* dilakukan dibawah tekanan atmosfer menggunakan fluida kerja aquades. Kurva pendidihan dan *boiling heat transfer coefficient* ditampilkan untuk mengevaluasi kinerja perpindahan kalor yang terjadi. Beberapa sampel gambar pada setiap variasi ditampilkan untuk mengetahui fenomena gelembung yang terjadi didalam penelitian. dari hasil penelitian akan dilakukan perhitungan nilai *heat flux*, temperatur permukaan, dan *heat transfer coefficient*. Didapatkan bahwa kinerja pendinginan pada frekuensi 5 kHz lebih tinggi daripada frekuensi 15 kHz. Nilai *heat transfer coefficient* pada frekuensi 5 kHz lebih tinggi daripada frekuensi 15 kHz. Nilai *heat flux* pada frekuensi 5 kHz yang meningkat disertai perubahan temperatur yang tidak terlalu besar menyebabkan *boiling heat transfer coefficient* meningkat. Berdasarkan sampel gambar yang di analisa diperoleh luasan gelembung terbesar yang menyelimuti benda uji pada frekuensi 15 kHz lebih besar daripada frekuensi 5 kHz dimana masing-masing memiliki nilai 90.855 mm<sup>2</sup> dan 84.105. mm<sup>2</sup>. Ditemukan juga bahwa gelembung terkecil yang menempel pada benda uji pada pengujian dengan frekuensi 15 khz dan 5 khz masing-masing memiliki diameter rata-rata sebesar 1.289 mm dan 1.057 mm. Sedangkan gelembung yang terlepas dari benda uji pada masing pengujian memiliki diameter rata-rata yang lebih kecil yaitu 0.065 mm dan 0.076 mm.

**Kata Kunci:** Pool Boiling; Sonicator; Getaran Akustik; Heat transfer coefficient; Heat Flux.

## Abstract

This paper is an experimental study that explains the effect of actuation of acoustic vibrations using frequencies of 5 kHz and 15 kHz by displaying heat transfer performance and boiling phenomena. Acoustic vibrations are generated through a sonicator instrument with a straight horn design applied to the working fluid and boiling chamber structure. Pool boiling testing is carried out under atmospheric pressure using aquades working fluid. The boiling curve and boiling heat transfer coefficient are displayed to evaluate heat transfer performance. Several sample images on each variation are shown to determine the bubble phenomenon. It was found that the cooling performance at a frequency of 5 kHz was higher than a frequency of 15 kHz. The heat flux value at a frequency of 5 kHz which increases accompanied by temperature changes that are not too large causes the boiling heat transfer coefficient to increase. Based on the image sample analyzed, the area of bubbles covering the test specimen is obtained at a frequency of 5 kHz greater than the frequency of 15 kHz where each has a value of 90.855 mm<sup>2</sup> and 84.105. mm<sup>2</sup>. It was also found that the bubbles attached to the specimen in tests with frequencies of 15 khz and 5 khz had an average diameter of 1.289 mm and 1.057 mm respectively. While the bubbles released from the specimen in each test have a smaller average diameter of 0.065 mm and 0.076 mm

*Keywords: Pool Boiling; Acoustic Vibration; Sonicator; Heat transfer coefficient ; Heat Flux.*

## 1. Pendahuluan

Pendinginan elektronik dan manajemen termal telah menarik lebih banyak perhatian baru-baru ini, sebagai upaya untuk menghadapi tantangan kritis dengan miniaturisasi yang berkelanjutan dan peningkatan fluks kalor perangkat elektronik yang cepat (Z. Zhang dkk, 2021). Keberlanjutan miniaturisasi perangkat elektronik dapat meningkatkan fluks kalor dan distribusi temperatur yang tidak seragam, sehingga sangat berpotensi menyebabkan terjadinya kerusakan perangkat elektronik serta mengarah pada pengurangan masa pakai dan keandalan perangkat elektronik [2], [3]. Fluks kalor tinggi merupakan masalah yang kerap sekali terjadi pada peralatan elektronik, hal ini tentunya menjadi tantangan bagi para insinyur dan komunitas ilmiah untuk menemukan solusi ramah lingkungan, serta manajemen termal dan kontrol perangkat elektronik yang dapat menangani persoalan tersebut (Cirillo dkk., 2023). Penanganan masalah tersebut dapat diatasi dengan pengembangan teknologi terkait mekanisme dan metode pendinginan perangkat elektronik yang tepat, tentunya dengan pengembangan teknologi diharapkan dapat menghasilkan miniaturisasi lebih lanjut dan juga meningkatkan efisiensi energi [6]. Perkembangan teknologi terkait pendinginan perangkat elektronik sendiri memiliki beberapa metode yang sangat berkaitan erat dengan prinsip-prinsip perpindahan kalor seperti *Natural Convection, Force Convection, Boiling & Condensation*. Hal yang serupa juga dijelaskan dalam buku *electronic cooling* dengan klasifikasi seperti: *Natural convection, Force convection air cooling, Forced convection liquid cooling, Liquid evaporation*. Dalam buku ini juga dijelaskan faktor penting dalam pendinginan salah satunya adalah *cooling fluids*.

Beberapa metode-metode pendinginan beserta fluida kerja yang kemudian dibandingkan berdasarkan nilai keefisien perpindahan kalornya, *boiling* dan *condensation* memiliki nilai *heat transfer coefficient* tertinggi. (Murshed, 2016). *Boiling* merupakan perubahan wujud fluida dari fase cair ke fase uap yang ditopang oleh proses perpindahan kalor konveksi permukaan padat terhadap fluida kerja yang bergerak. *Boiling* memiliki nilai keefisien perpindahan kalor yang sangat besar walaupun dengan perbedaan temperatur yang kecil, pengaruh temperatur menjadi minor dikarenakan terjadinya perubahan fase fluida [7]. *Boiling cooling system* merupakan salah satu metode yang digunakan dalam proses pendinginan. *Boiling cooling system* diteliti pertama kali oleh Fritz pada tahun 1935. Fritz meneliti pengaruh karakteristik permukaan *heating surface* terhadap proses *boiling*. Proses *boiling cooling system* dibedakan menjadi *pool boiling cooling system* dan *flow boiling cooling system* [8].

*Pool Boiling* merupakan pendinginan yang melibatkan dua fase perubahan cairan menjadi uap. Dimana cairan diam dan uap bergerak didekat permukaan yang disebabkan oleh *free convection* pencampurannya disebabkan oleh pertumbuhan dan pelepasan gelembung. *Pool boiling* dapat diklasifikasikan berdasarkan kondisi fluida kerja seperti *subcooled* dan *saturated*. Kondisi *subcooled* temperatur sebagian besar cairan dibawah temperatur saturasi dan *bubble* yang terbentuk dipermukaan dapat mengembun dalam cairan. Sedangkan kondisi *saturated* adalah Ketika cairan sedikit melebihi temperatur *saturated* fluida. Gelembung yang terbentuk dipermukaan kemudian didorong kepermukaan dengan gaya apung dan akhirnya terlepas dari permukaan [9]. Pengaruh perubahan permukaan berupa variasi kekasaran permukaan dan variasi ketebalan lapisan *nanoceramic* terhadap performa *pool boiling* menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai kekasaran permukaan maka semakin baik pula nilai *heat transfer coefficient* dan nilai *critical heat flux*. Sedangkan penambahan *coating* dengan menggunakan *nanoceramic* juga meningkatkan nilai *heat transfer coefficient* dan nilai *critical heat flux* [10]. Dari hasil penelitian tersebut terdapat beberapa hal yang menarik untuk diteliti seperti ketika kekasaran permukaan yang lebih tinggi memiliki lebih banyak potensi *active nucleation site* yang besar. Ketika jumlah *active nucleation site* pada benda uji dengan kekasaran yang tinggi akan menghasilkan temperatur permukaan yang lebih rendah pada benda uji. Hal ini terjadi akibat *leiden frost* dimana gas terjebak atau menempel pada permukaan benda uji. Maka dari itu perlu penanganan untuk mengatasi persoalan

tersebut. Salah satu metode yang cocok untuk menangani hal tersebut adalah agitasi. Dimana metode agitasi tersebut bertujuan untuk menggetarkan uap yang menempel pada permukaan yang kasar pada benda uji, sehingga diharapkan uap yang menempel akan mudah terlepas dari permukaan dan meningkatkan performa *pool boiling*.

Salah satu upaya agitasi yang memungkinkan untuk dapat dikembangkan adalah aktuasi getaran akustik dengan harapan dapat meningkatkan perpindahan kalor *boiling* dan stabilitas termal serta meningkatkan keseragaman temperatur temporal serta spasial melalui medan akustik dan efek *streaming* akustik [11]. Selain itu, gelombang akustik khususnya ultrasonik juga mengurangi pengendapan partikel sehingga tetap dalam keadaan stabil. Studi optimasi menunjukkan *boiling heat transfer coefficient* (BHTC) sekitar 11,5 kW/m<sup>2</sup>°C pada sudut kemiringan 15°, ukuran partikel 20 nm, konsentrasi partikel 0,075% berat dan waktu penyinaran 14 menit [12]. Efek medan akustik seperti ultrasonik pada perpindahan kalor dalam *boiling system* dengan jumlah perpindahan kalor per satuan volume fluida ditemukan sebagai fungsi dari parameter berikut: *superheat* cair, tekanan sistem, dan pengotor dalam fluida [13]. Bunyi ultrasonik dapat merambat melalui zat padat, cair dan gas. Reflektivitas bunyi ultrasonik di permukaan zat padat hampir sama dengan reflektivitas bunyi ultrasonik pada permukaan zat cair [14].

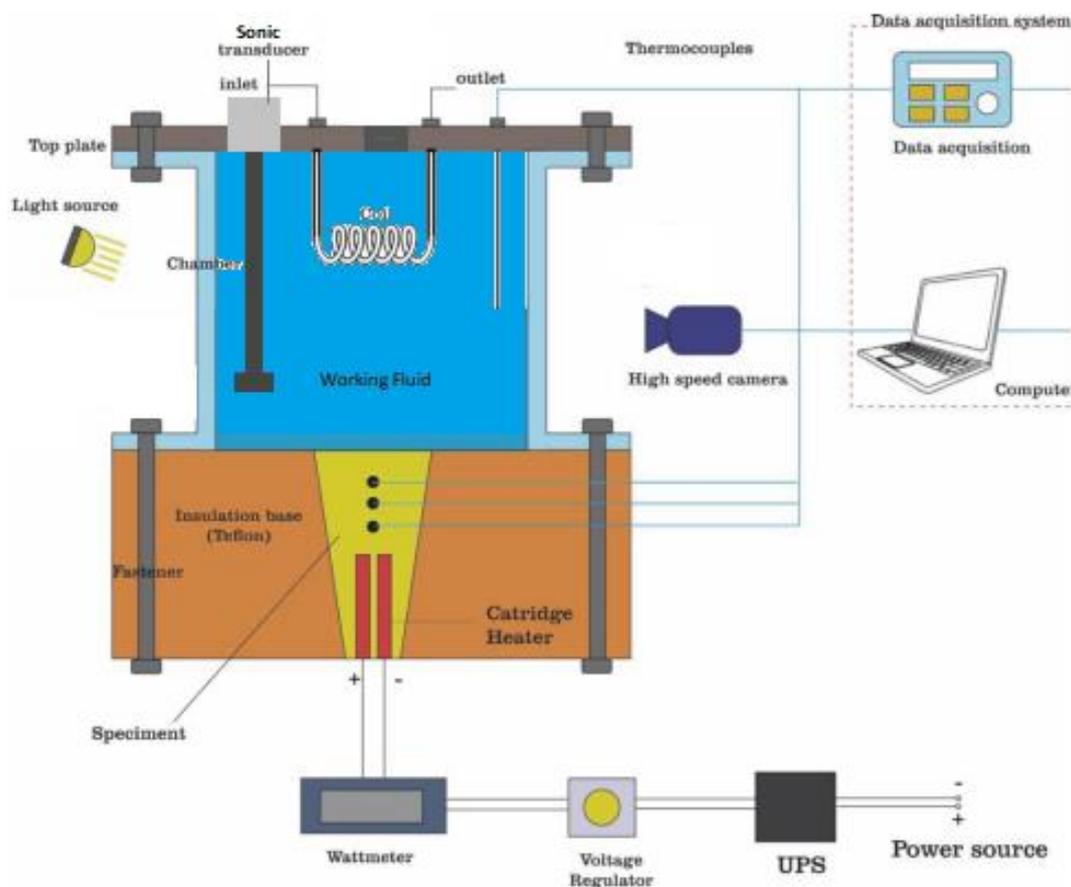
Kondisi lingkungan dan operasional sering kali sangat bervariasi dan menghasilkan perubahan besar pada medan akustik, Para peneliti mengembangkan metode kompensasi temperatur untuk menghilangkan efek variasi temperatur, tetapi mereka memiliki keterbatasan dalam implementasi. Efek partikel CuO dan kombinasinya dengan iradiasi gelombang ultrasonik (24 kHz) pada perpindahan kalor *pool boiling* memiliki empat parameter utama yaitu sudut kemiringan pemanas, ukuran partikel, konsentrasi partikel dan waktu iradiasi. Selain itu, faktor lain yang harus di evaluasi adalah elemen tembaga, diameter keberangkatan gelembung, frekuensi keberangkatan gelembung dan sumber nukleasi aktifnya. Hasilnya menunjukkan bahwa gelembung besar dan ukuran partikel yang kecil secara tepat meningkatkan koefisien perpindahan kalor *boiling* [14].

Berdasarkan latar belakang diatas pengaruh medan akustik seperti variasi frekuensi sebagai agitator terhadap fenomena *pool boiling* seperti *active nuclaetion site*, *bubble frequency*, dan *bubble departure diameter* akan diteliti. Hal ini untuk mengetahui seberapa besar pengaruh frekuensi dalam meningkatkan perpindahan kalor *boiling*. Maka dari itu penulis perlu untuk melakukan penelitian dalam upaya peningkatan HTC dan CHF pada pendinginan *pool boiling* dengan penggunaan agitasi melalui variasi frekuensi getaran sonik dan ultrasonik.

#### ***Nomenclature***

Tw	Temperatur permukaan sumber kalor
q''	<i>Heat Flux</i>
h	<i>heat transfer coefficient</i>

## 2. Metode



Gambar 1 Skematik alat uji

Peralatan eksperimen *pool boiling* terdiri dari beberapa bagian utama seperti, *heater* dan *boiling chamber*. *Heater* berfungsi sebagai penyuplai kalor ke benda uji yang berada di dalam *boiling chamber*. *Boiling chamber* berfungsi sebagai tempat fluida kerja dan benda uji yang akan diamati fenomena *pool boiling*. Kalor yang dihasilkan oleh heater dan diterima oleh benda uji selanjutnya akan ditransferkan ke fluida kerja sehingga fluida kerja akan terjadi perubahan fase menjadi uap yang bergerak ke atas menuju *condenser* yang berada di dalam *boiling chamber*. Kalor yang ada pada uap ini lalu berpindah ke fluida yang mengalir di dalam *condenser* sehingga uap akan terkondensasi lalu jatuh ke bawah. Aliran fluida kerja di dalam *condenser* ini akan disuplai oleh *bath circulator* atau menggunakan saluran dan *reservoir* sederhana dengan penggerak fluida kerja menggunakan pompa.

Terdapat tiga buah *thermocouple* tipe K yang digunakan di dalam alat eksperimen ini. Tiga buah *thermocouple* diletakkan di dalam benda uji dan satu *thermocouple* di letakkan di dalam *boiling chamber* tepatnya di atas benda uji. *Thermocouple* yang diletakkan di dalam benda uji bertujuan untuk mengukur temperatur permukaan benda uji, sedangkan *thermocouple* yang diletakkan di atas benda uji bertujuan untuk mengukur *bulk* temperatur fluida kerja akibat proses *pool boiling*. Masing - masing *thermocouple* ini kemudian dihubungkan dengan sistem data akuisisi untuk merekam data perubahan temperatur selama proses berlangsung. Selain itu, sebuah *camera* diletakkan digunakan untuk melihat dan merekam mekanisme pembentukan gelembung uap dan formasi gelembung uap pada

benda uji. Terdapat pula sebuah sistem penerangan yang akan menyulai cahaya yang diarahkan ke dalam *boiling chamber* sehingga proses *pool boiling* akan lebih mudah untuk diamati.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil dan pembahasan pada penelitian ini menyajikan beberapa hal seperti data pengujian, *boiling performance*, dan *bubbles* phenomenon. Data hasil pengujian ditampilkan berdasarkan variasi daya input mulai dari 100 watt yang akan ditingkatkan 50 watt setiap variasi sampai 600 watt. Selanjutnya akan dibandingkan antara frekuensi 5 kHz dan 15 kHz dengan variable nilai temperatur permukaan ( $T_w$ ), *heat flux* ( $q''$ ), dan nilai *heat transfer coefficient* ( $h$ ). Adapun data hasil pengujian terdapat pada table 1. *Boiling performance* pada penelitian ini menyangkut dua pembahasan yang ditampilkan dalam bentuk grafik *boiling curved* dan grafik perbandingan nilai *heat transfer coefficient* dengan nilai *heat flux*. Adapun grafik *boiling curved* dan grafik perbandingan nilai *heat transfer coefficient* dengan nilai *heat flux* dapat terlihat pada gambar 2 dan 3.

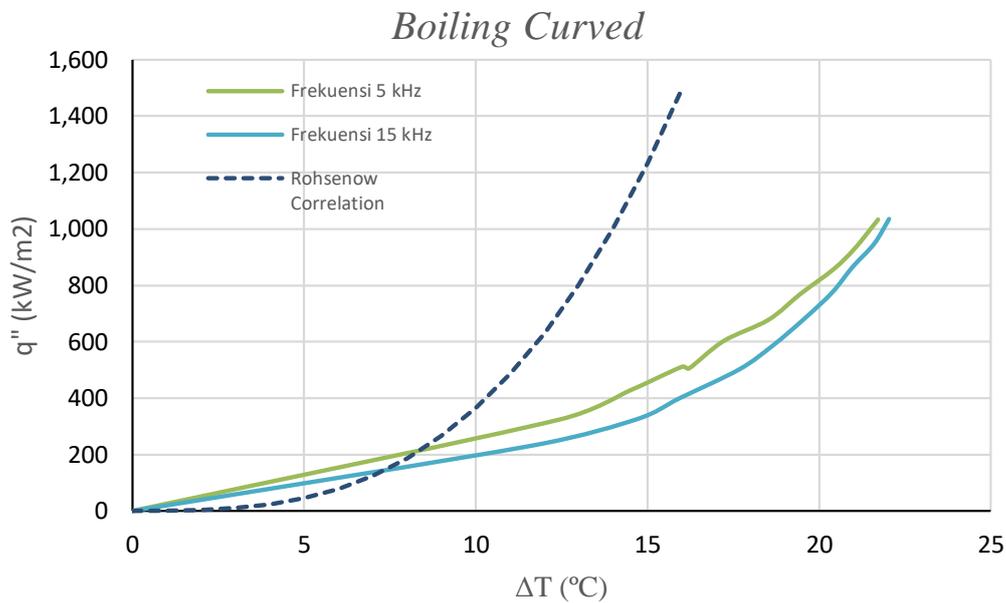
#### 3.1 Data Pengujian

Daya Input (Watt)	Frekuensi 5 kHz			Frekuensi 15 kHz		
	$T_w$ (°C)	$q''$ (kW/m <sup>2</sup> )	$h$ (kW/m <sup>2</sup> . K)	$T_w$ (°C)	$q''$ (kW/m <sup>2</sup> )	$h$ (kW/m <sup>2</sup> . K)
100	106.673	79.486	13.248	105.195	52.222	10.444
150	112.452	324.420	26.054	111.636	231.501	19.896
200	114.442	424.508	29.394	114.658	323.915	22.099
250	116.006	511.135	31.935	115.940	399.924	25.090
300	116.213	505.503	31.179	117.672	501.785	28.395
350	117.217	602.346	34.985	118.647	586.034	31.428
400	118.529	677.905	36.586	119.547	678.998	34.737
450	119.454	769.372	39.548	120.377	774.113	37.990
500	120.426	857.591	41.985	120.973	864.698	41.229
550	121.047	931.852	44.275	121.605	947.554	43.859
600	121.719	1033.396	47.581	122.038	1035.196	46.972

Data hasil pengujian yang terlihat pada table 1 pada frekuensi 5 dan 15 kHz menunjukkan peningkatan nilai temperature di setiap kenaikan daya input. Semakin tinggi daya input yang diberikan maka semakin tinggi pula temperature yang dihasilkan. Ketika temperature pada permukaan sumber kalor naik maka nilai *heat flux* akan meningkat. Pada pengujian ini nilai *heat flux* terbesar adalah pada frekuensi 15 kHz yaitu sebesar 1035,196 kW/m<sup>2</sup>, begitu pula nilai *heat flux* terendah juga terjadi pada pengujian frekuensi 15 kHz yaitu sebesar 52.222 kW/m<sup>2</sup>. Tetapi pada pengujian dengan frekuensi 5 kHz memiliki nilai *heat transfer coefficient* tertinggi yaitu sebesar 47.581 kW/m<sup>2</sup>. K. sedangkan nilai *heat transfer coefficient* terendah adalah pada pengujian dengan frekuensi 15 khz yaitu sebesar 10.44 kW/m<sup>2</sup>K. Hal ini dapat dianalisa dimana frekuensi aktuasi getaran akustik mempengaruhi tempeatur permukaan sumber kalor. Pada daya input yang sama seperti pada daya input 600 watt pada setiap frekuensi memiliki nilai berbeda yaitu 121.719 °C dan 122.038 °C dapat terlihat semakin tinggi frekuensi maka akan meningkatkan temperature permukaan sumber kalor, sehingga nilai Perbedaan temperaturnya besar yang mengakibatkan *heat transfer coefficient* menurun.

#### 3.2 Boilling Performance

*Boiling performance* pada penelitian ini akan menyajikan dua grafik yaitu *Boiling Curved* dan perbandingan nilai *heat transfer coefficient* dengan *heat flux*.

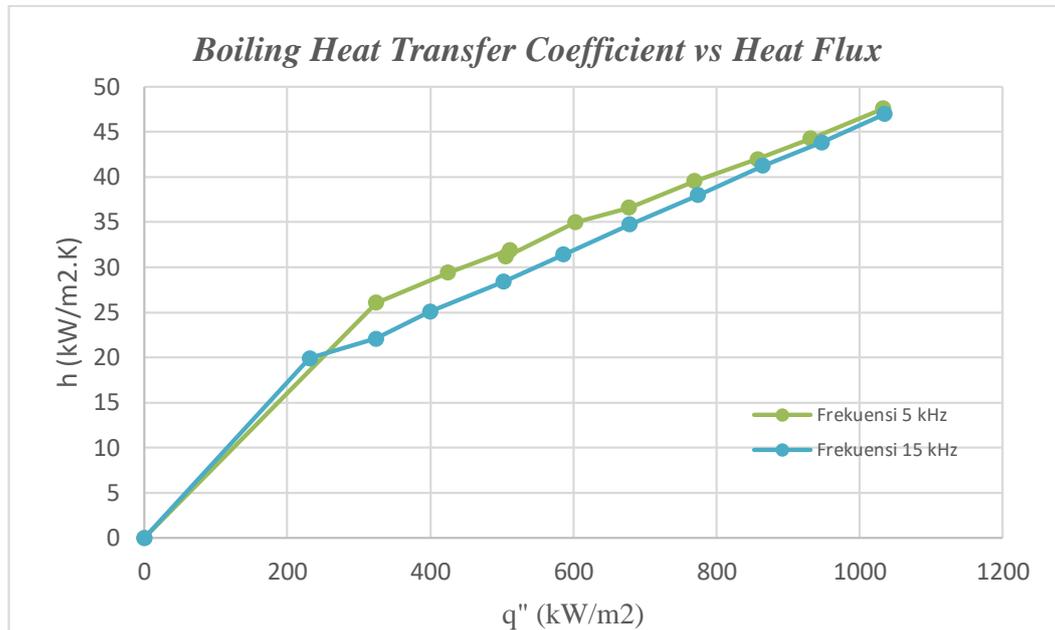
Gambar 2 *Boiling Curved*

*Boiling curved* merupakan perbandingan nilai heat flux dengan perbedaan temperature permukaan sumber kalor dan temperature saturated fluida kerja. Terdapat dua variasi yang akan dibandingkan dengan *rohseow correlation* sebagai acuan pengujian *pool boiling*. Dari grafik dapat terlihat dengan menambahkan aktuasi getaran akustik mampu menggeser kurva pendidihan dimana pada heat flux yang sama beda temperatur pada aktuasi getaran akustik meningkat. Ataupun pada perbedaan temperatur yang besar nilai heat fluks yang terjadi tidak terlalu besar. Namun secara garis besar semakin besar nilai *heat flux* yang terjadi maka beda temperatur juga semakin besar. Pergeseran kurva *boiling* terbesar adalah pada pengujian pada frekuensi 15 kHz.

Perbandingan nilai *heat transfer coefficient* dengan heat fluks dapat terlihat pada gambar 3. Dimana secara garis besar semakin meningkatnya nilai *heat flux* maka *heat transfer coefficient* juga meningkat. Dari grafik diatas dapat terlihat bahwasannya pada pengujian dengan frekuensi 5 kHz memiliki nilai tertinggi. Namun pada setiap peningkatan nilai *heat flux* garis kurva semakin berhimpitan.

### 3.3 *Bubbles Phenomenon*

Fenomena gelembung diamati dengan melakukan pengambilan video yang akan diambil beberapa *capture* gambar berdasarkan daya input yang diberikan. Gambar diambil sesuai dengan waktu dimana temperatur pada sumber kalor telah mencapai kondisi *steady*. Kondisi *steady* dibuktikan oleh grafik yang terlihat di *software* Labview pada *computer*. Kemudian untuk memvalidasi kondisi tersebut dapat kita lihat pada gambar 6, gambar 7, dan gambar 8 yang menampilkan distribusi temperatur. Sampel gambar dinalisa menggunakan *software image J* berdasarkan beberapa parameter yang meliputi luas gelembung yang menempel pada permukaan sumber kalor, diameter rata-rata gelembung yang menempel pada permukaan sumber kalor, serta diameter rata-rata gelembung yang terlepas dari permukaan sumber kalor. Hasil dari Analisa gambar dapat dilihat pada tabel 2. Terdapat 3 (tiga) sampel gambar yang tersaji dalam paper ini yaitu pada daya input 100-Watt, 350 Watt, dan 600 Watt. Tiga sampel gambar diambil pada kondisi pada daya input rendah, menengah, dan tinggi. Adapun sample gambar dapat terlihat pada gambar 3, gambar 4, dan gambar 5.



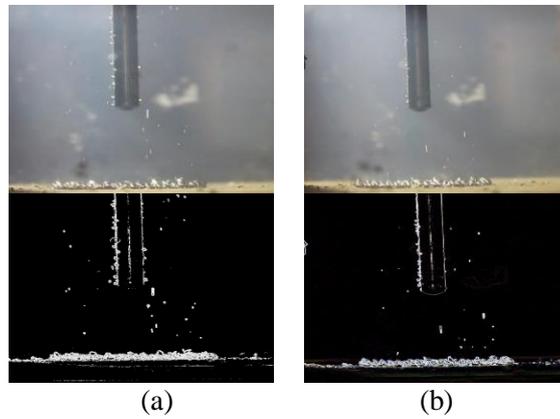
Gambar 3 Boiling Heat transfer coefficient vs Heat Flux

Tabel 2 Data Hasil Analisa Gambar

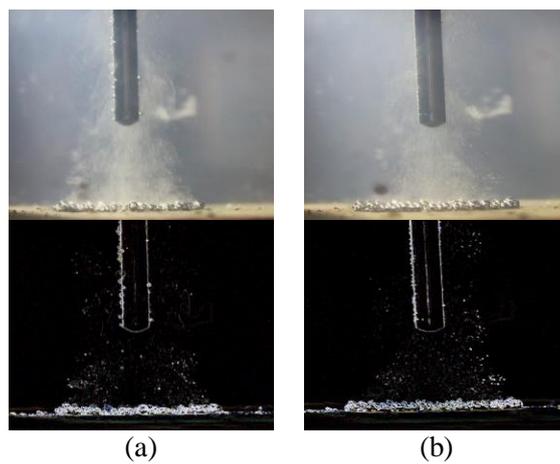
Daya Input (Watt)	Frekuensi 5 kHz			Frekuensi 15 kHz		
	Luas gelembung menempel (mm <sup>2</sup> )	Diameter gelembung menempel (mm)	Diameter gelembung terlepas (mm)	Luas gelembung menempel (mm <sup>2</sup> )	Diameter gelembung menempel (mm)	Diameter gelembung terlepas (mm)
100	70.493	1.417	0.332	70.006	1.335	0.256
150	84.105	1.602	0.224	78.209	1.705	0.206
200	80.021	2.463	0.097	90.855	1.869	0.109
250	65.377	1.964	0.128	84.611	2.463	0.097
300	69.778	1.494	0.112	83.708	2.244	0.097
350	69.858	1.456	0.093	71.204	1.712	0.090
400	70.698	1.333	0.085	75.636	1.474	0.065
450	74.968	1.645	0.097	72.179	1.385	0.090
500	66.336	1.057	0.182	56.635	1.545	0.080
550	68.516	1.068	0.076	59.992	1.289	0.077
600	65.053	1.092	0.077	45.338	1.308	0.075

Dari hasil Analisa gambar yang terdapat pada table diatas dimana *bubble* yang dianalisa berdasarkan nilai dari setiap variasi daya input dari dua pengujian dengan frekuensi berbeda. Secara garis besar luas gelembung yang menempel pada sumber kalor akan semakin berkurang pada setiap kenaikan daya input. Namun pada daya input 100 watt sapaai 200 watt luas gelembung yang menempel pada permukaan sumber kalor mengalami peningkatan. Hal ini terjadi pada masing-masing pengujian baik pada frekuensi 5 kHz dan 15 kHz. Luasan gelembung terkecil yang menempel pada sumber kalor adalah pada pengujian dengan frekuensi 15 kHz yaitu sebesar 45.338 mm<sup>2</sup> sedangkan pada pengujian dengan frekuensi 5 kHz adalah 65.053 mm<sup>2</sup>. Dari hasil pengamatan dan Analisa menggunakan *software image j* diameter rata-rata *bubble* terkecil yang menempel pada sumber kalor adalah pada pengujian dengan frekuensi 5 kHz yaitu sebesar 1.057 mm sedangkan *bubble* terbesar rata-rata adalah sebesar 2.463 pada setiap pengujian. Diameter *bubble* terkecil yang terlepas dari permukaan

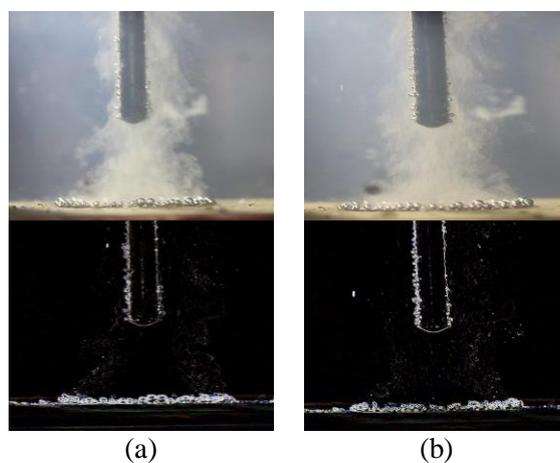
sumber kalor adalah pada pengujian dengan frekuensi 15 kHz yaitu sebesar 0.065 mm, sedangkan *bubble* terbesar yang terlepas dari permukaan sumber kalor adalah pada pengujian dengan frekuensi 5 kHz yaitu sebesar 0.332 mm.



Gambar 4 Sampel 100 Watt (a) Frekuensi 5 kHz, (b) Frekuensi 15 kHz.



Gambar 5 Sampel 350 Watt (a) Frekuensi 5 kHz, (b) Frekuensi 15 kHz.



Gambar 6 Sampel 600 Watt (a) Frekuensi 5 kHz, (b) Frekuensi 15 kHz.

Dari ketiga sampel gambar diatas dapat kita lihat pada masing-masing pengujian dengan frekuensi yang berbeda menunjukkan bahwa semakin tinggi daya input yang diberikan maka *bubble* yang dihasilkan akan semakin kecil, begitu pula dengan luas gelembung yang terperangkap pada permukaan sumber kalor.

#### 4. Kesimpulan

Nilai *heat transfer coefficient* pada frekuensi 5 kHz lebih tinggi daripada frekuensi 15 kHz. Nilai *heat flux* pada frekuensi 5 kHz yang meningkat disertai perubahan temperatur yang tidak terlalu besar menyebabkan *boiling heat transfer coefficient* meningkat. Berdasarkan sampel gambar yang di analisa diperoleh luasan gelembung terbesar yang menyelimuti benda uji pada frekuensi 15 kHz lebih besar daripada frekuensi 5 kHz dimana masing-masing memiliki nilai 90.855 mm<sup>2</sup> dan 84.105. mm<sup>2</sup>. Ditemukan juga bahwa gelembung terkecil yang menempel pada benda uji pada pengujian dengan frekuensi 15 khz dan 5 khz masing-masing memiliki diameter rata-rata sebesar 1.289 mm dan 1.057 mm. Sedangkan gelembung yang terlepas dari benda uji pada masing pengujian memiliki diameter rata-rata yang lebih kecil yaitu 0.065 mm dan 0.076 mm.

#### Ucapan Terima Kasih

Terimakasih kepada Bapak Adhika Widyaparaga dan Bapak I Made Miasa yang telah membantu dalam hal diskusi dan finansial selama penelitian berlangsung.

#### Referensi

- [1] Z. Zhang, X. Wang, and Y. Yan, "A review of the state-of-the-art in electronic cooling," *e-Prime*, p. 100009, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.prime.2021.100009.
- [2] Z. He, Y. Yan, and Z. Zhang, "Thermal management and temperature uniformity enhancement of electronic devices by micro heat sinks: A review," *Energy*, vol. 216, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119223.
- [3] Q. Zhang, Z. Feng, J. Zhang, F. Guo, S. Huang, and Z. Li, "Design of a mini-channel heat sink for high-heat-flux electronic devices," *Appl Therm Eng*, vol. 216, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119053.
- [4] L. Cirillo, A. Greco, and C. Masselli, "Development of an electronic circuit cooling system using elastocaloric effect: a FEM comparison among different configurations," *Appl Therm Eng*, vol. 219, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119463.
- [5] *Electronics Cooling*, vol. S M Sohel Murshed. InTech, 2016. doi: 10.5772/61407.
- [6] M. Bahiraei and S. Heshmatian, "Electronics cooling with nanofluids: A critical review," *Energy Conversion and Management*, vol. 172. Elsevier Ltd, pp. 438–456, Sep. 15, 2018. doi: 10.1016/j.enconman.2018.07.047.
- [7] Yunus. A. Cengel, *Heat Transfer: A Practical Approach*, Second Edition. New York: Mc Graw-Hill, 2002.
- [8] Frank. Kreith, *The CRC handbook of thermal engineering*. CRC Press, 2000.
- [9] F. P. Incropera, T. L. Bergman, D. P. Dewitt, and Adrienne. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*. 2007.
- [10] M. D. Nashrullah, "Experimental Study On The Effect Of Surface Roughing And Nanoceramic Coating Using Copper On Pool *Boiling* Phenomena," Universitas Gajah Mada, Yogyakarta, 2019.
- [11] D. Lee, J.-S. Lim, N. Lee, and H. H. Cho, "Enhanced thermal uniformity and stability in pool *boiling* heat transfer using ultrasonic actuation," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 106, pp. 22–30, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.03.019.
- [12] M. Khooshehchin, A. Mohammadidoust, and S. Ghotbinasab, "An optimization study on heat transfer of pool *boiling* exposed ultrasonic waves and particles addition," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 114, p. 104558, May 2020, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104558.
- [13] F. W. Schmidt, D. F. Torok, and G. E. Robinson, "Experimental Study of the Effects of an Ultrasonic Field in a Nucleate *Boiling* System," *J Heat Transfer*, vol. 89, no. 4, pp. 289–294, Nov. 1967, doi: 10.1115/1.3614387.

- [14] C. Liu, J. B. Harley, M. Bergés, D. W. Greve, and I. J. Oppenheim, “Robust ultrasonic damage detection under complex environmental conditions using singular value decomposition,” *Ultrasonics*, vol. 58, pp. 75–86, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.ultras.2014.12.005.