

ANALISIS EFEK TORTUOSITAS PADA HEATSINK BERPORI TERHADAP PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI ALAMI

Imam Akbar^(1*), Ahmad Malik Abdul Aziz⁽²⁾, Hariman Al Faritzie⁽³⁾, dan Dewi Rawani⁽¹⁾

⁽¹⁾Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tridianti, Palembang, Sumatra Selatan, Indonesia

⁽²⁾Jurusan Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Tridianti, Palembang, Sumatra Selatan, Indonesia

⁽³⁾Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tridianti, Palembang, Sumatra Selatan, Indonesia

(*E-mail *Corresponding Author* : imam@univ-tridianti.ac.id)

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh tortuositas pada *heatsink* berpori terhadap transfer panas konveksi alami. *Heatsink* memainkan peran penting dalam menghilangkan panas dari komponen elektronik, dan optimasi desain *heatsink* sangat penting untuk manajemen termal yang efektif dan efisien. Dalam penelitian ini, struktur *heatsink* termasuk *splitP*, *diamond*, *gyroid*, dan pin dibuat menggunakan metode desain generatif, dan hubungan antara tortuositas dan kinerja termal *heatsink* diselidiki melalui *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Hasil menunjukkan bahwa peningkatan tortuositas menyebabkan peningkatan signifikan pada *Surface Area* dan *pressure drop*, dengan nilai berkisar antara 9298.48-12711.93 mm² dan 0.08701-0.09474 Pa, masing-masing. Selain itu, tortuositas juga menunjukkan korelasi linear yang kuat dengan *Nusselt number*, dengan nilai $R^2=0.88$. Seiring dengan peningkatan tortuositas, *Nusselt number* mengalami penurunan signifikan dari 18.04-9.90. Dalam penelitian ini, kami menyimpulkan bahwa tortuositas adalah parameter penting yang memengaruhi kinerja *heatsink*, dan struktur TPMS yang kami kembangkan merupakan kandidat *desain heatsink* yang menjanjikan untuk perangkat manajemen termal. Namun, perlu dicari keseimbangan antara *Surface Area*, *pressure drop*, transfer panas keseluruhan, dan parameter lain seperti ukuran pori dan interkoneksi untuk mencapai kinerja *heatsink* yang optimal.

Kata Kunci: *Heatsink*, Tortuositas, Konveksi Alami, *Computational Fluid Dynamic*

Abstract

This research aims to analyze the effect of tortuosity porous heatsink on natural convection heat transfer. Heatsink plays a crucial role in dissipating heat from electronic components, and optimizing heatsink design is essential for effective and efficient thermal management. In this study, heatsink structures including splitP, diamond, gyroid, and pin were created using generative design methods, and the relationship between tortuosity and heatsinks thermal performance was investigated through Computational Fluid Dynamics (CFD). The results show that an increase in tortuosity leads to a significant increase in surface area and pressure drop, with values ranging from 9298.48-12711.93 mm² and 0.08701-0.09474 Pa, respectively. Additionally, tortuosity also exhibits a strong linear correlation with the Nusselt number, with value $R^2=0.88$. As tortuosity increases, the Nusselt number decreases significantly from 18.04-9.90. In this research, we conclude that tortuosity is an important parameter that affects heatsink performance, and the TPMS structure we developed is a promising heatsink design candidate for thermal management devices. However, a balance needs to be sought between surface area, pressure drop, overall heat transfer, and other parameters such as pore size and interconnectivity to achieve optimal heatsink performance.

Keywords: *Heatsink*, Tortuosity, Natural Convection, *Computational Fluid Dynamic*

1 PENDAHULUAN

Pemanasan berlebih pada komponen elektronik dapat menurunkan kinerja dan menyebabkan kerusakan pada perangkat elektronik. Oleh karena itu, diperlukan sistem pendinginan yang efektif dan efisien untuk menghilangkan panas yang dihasilkan oleh komponen elektronik. Salah satu komponen utama dalam sistem pendinginan adalah *heatsink*, yaitu suatu alat yang dirancang untuk menyerap dan mengeluarkan panas dari komponen elektronik ke lingkungan sekitarnya melalui perpindahan panas konvektif, konduktif, atau radiatif. Salah satu jenis perpindahan panas yang terjadi pada *heatsink* adalah konveksi alamiah, yaitu perpindahan panas yang secara alami terjadi akibat gaya apung yang dihasilkan oleh variasi densitas akibat variasi suhu dalam fluida, akhirnya menciptakan aliran [1]. Sebagai hasilnya, dalam beberapa dekade terakhir, *heatsink* telah intensif dipelajari dari segi bentuk dan strukturnya, seperti *heatsink* berbentuk plat-fin [2]–[4], *heatsink* berbentuk silinder [5], *cross-fin* [6], *pin-fin heatsinks* [7], dan *micro-channel heatsinks* [8], [9]. Selain itu, dengan revolusi di bidang manufaktur, peneliti telah mulai menyelidiki geometri yang tidak dapat dibuat dengan metode manufaktur konvensional, seperti struktur seluler. Struktur ini terdiri dari pori-pori yang saling terhubung dan dapat diklasifikasikan sebagai periodik atau stokastik (busa logam) [10], [11].

Struktur seluler, khususnya busa logam, sangat menjanjikan dalam manajemen termal. Struktur busa logam memiliki porositas tinggi, menghasilkan struktur ringan dan fenomena pencampuran fluida yang lebih baik dibandingkan *heatsink* konvensional. Selain itu, *heatsink* busa logam memiliki rasio permukaan terhadap volume yang tinggi dan sifat kekakuan yang menarik [12]. Namun, *heatsink* busa logam memiliki kelemahan seperti susunan void stokastik yang sulit dikendalikan dan kurang efisien dalam perpindahan panas. Selain itu, *heatsink* busa logam memiliki resistensi hidrolis tinggi, mengurangi laju aliran fluida dan *Nusselt number*. Oleh karena itu, para peneliti sedang mengeksplorasi opsi alternatif, seperti struktur *Triply Periodic Minimal Surface* (TPMS), yang memiliki distribusi void periodik dan geometri yang lebih kompleks. Sebagai contoh, Baobaid et al. [13] menemukan bahwa *heatsink* TPMS lebih unggul dibandingkan *heatsink* konvensional dengan peningkatan sebesar 48-61% akibat gangguan aliran acak dan kepadatan pengemasan tinggi. Al-Ketan et al. [14] berhasil menganalisis kinerja termal *heatsink* seluler berdasarkan struktur TPMS, dan hasil mereka menunjukkan bahwa variasi topologi, fraksi volume, dan laju aliran memiliki pengaruh signifikan pada kinerja termal *heatsink*.

Meskipun penelitian sebelumnya telah menunjukkan kinerja termal yang menjanjikan dari *heatsink seluler* berdasarkan struktur TPMS, penelitian ini belum mengevaluasi tortuositas sebagai parameter yang

dapat menggambarkan kompleksitas struktur seluler. Tortuositas mengacu pada rasio panjang jalur aliran udara aktual terhadap panjang jalur aliran udara dalam ketiadaan hambatan [15]. Kami menghipotesiskan bahwa seiring dengan peningkatan nilai tortuositas, area permukaan *heatsink* juga akan meningkat. Dengan *Surface Area* yang lebih besar, lebih banyak panas dapat dihilangkan ke lingkungan sekitarnya [16]. Namun, seiring dengan peningkatan nilai tortuositas, akan terjadi *pressure drop* yang lebih tinggi pada *heatsink* konveksi alamiah, yang pada akhirnya mengurangi koefisien perpindahan panas konvektif. Oleh karena itu, penelitian yang menyelidiki pengaruh tortuositas pada perpindahan panas dalam *heatsink* sangat penting untuk memahami lebih baik dan meningkatkan desain *heatsink* yang lebih efisien.

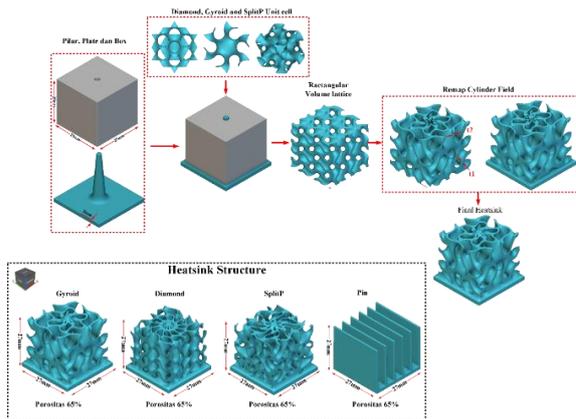
Dalam penelitian ini ini, kami akan melakukan analisis numerik menyeluruh untuk menyelidiki pengaruh tortuositas pada perpindahan panas konveksi alamiah dalam empat variasi struktur *heatsink*: *gyroid*, *diamond*, *splitP*, dan *plate fin*. Penelitian ini akan menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk memodelkan aliran udara di sekitar sirip *heatsink* dan menghitung distribusi suhu, kecepatan aliran udara, konduktivitas termal material *heatsink*, dan koefisien perpindahan panas konvektif dengan nilai tortuositas yang berbeda. Kami akan menganalisis data secara detail untuk mengidentifikasi dampak tortuositas pada perpindahan panas dan memahami mekanisme yang terlibat. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang pengaruh tortuositas pada perpindahan panas dalam *heatsink*. Penelitian ini akan memberikan wawasan berharga bagi desainer dan insinyur sistem pendinginan dalam pengembangan *heatsink* yang lebih efisien. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang faktor-faktor yang memengaruhi tortuositas dan perpindahan panas dalam *heatsink*, akan memungkinkan untuk merancang *heatsink* optimal dan meningkatkan efisiensi pendinginan komponen elektronik.

2 METODOLOGI

2.1 Desain Heatsink

Dalam penelitian ini, kami telah mengembangkan desain *heatsink* menggunakan pemodelan generatif, menggunakan algoritma untuk menghasilkan struktur geometris kompleks dengan menggunakan perangkat lunak nTopology 3.43.3. Diagram desain skematis untuk struktur *gyroid*, *diamond*, dan *splitP* dapat dilihat pada Gambar 1. Proses desain melibatkan beberapa langkah: Pertama, membuat model untuk pilar, plat, dan kotak. Selanjutnya, menerapkan fitur *rectangular volume lattice* ke kotak dan memilih unit sel *diamond* dan *gyroid*. Kemudian, menerapkan fitur *remap cylinder field* untuk membuat susunan unit sel menjadi melingkar. Fitur *The remap feature*

memudahkan pengendalian yang lebih baik atas ketebalan unit sel di bagian-bagian berbeda dari struktur jika kinerjanya tidak memadai selama simulasi. Selain itu, ketebalan dikendalikan untuk menentukan tingkat porositas struktur. Terakhir, menerapkan fitur *Boolean Union* untuk menggabungkan plat dan pilar, dengan radius perpaduan sebesar 0,5 mm. Langkah-langkah ini diikuti untuk menghasilkan geometri rumit dari struktur *heatsink*, yang memungkinkan pengendalian atas ketebalan unit sel dan porositas keseluruhan. Penggunaan teknik desain generatif desain memungkinkan pembuatan desain *heatsink* yang dioptimalkan untuk kinerja termal yang lebih baik.



Gambar 1. Diagram skematik proses desain *heatsink*

Berdasarkan desain *heatsink* pada Gambar 1, untuk mencapai porositas yang seragam pada seluruh desain *heatsink* sebesar 65%, nilai ketebalan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter desain *heatsink*.

Heatsink Structure	Thickness [mm]		Total volume (mm ³)	Heatsink volume (mm ³)	Porosity (%)
	t1	t2			
<i>Gyroid</i>	1	0.5	20384	6940.9	65.9
<i>Diamond</i>	0.9	0.3	20384	6980.3	65.8
<i>splitP</i>	0.9	0.3	20384	6951.7	65.9
<i>Pin</i>	1.09	0.9	20384	6955.9	65.9

2.2 Pengukuran Tortuosity

Dalam penelitian ini, kami menerapkan pengukuran *heatsink* menggunakan aplikasi MATLAB (*Mathworks Inc*) dengan metode *Finite Difference Method* (FDM) dan menggunakan aplikasi Taufactor. Metode ini menggunakan *voxel* gambar sebagai mesh diskritisasi untuk simulasi [17]. Pertama, impor desain *heatsink* STL ke program perangkat lunak pemotong (*slicer*) seperti *ChiTuBox* (CBD-Tech), kemudian gambar 3D dibuat menjadi 426 *slice*, dan selanjutnya gambar yang sudah di-*slice* dianalisis menggunakan perangkat lunak Fiji *Image J* dan Taufactor dengan langkah-langkah (i) penyesuaian kecerahan, (ii) penerapan ambang batas, dan (iii) penghapusan *noise* menggunakan fungsi "*remove outliers*". Untuk perhitungan yang akurat, dilakukan

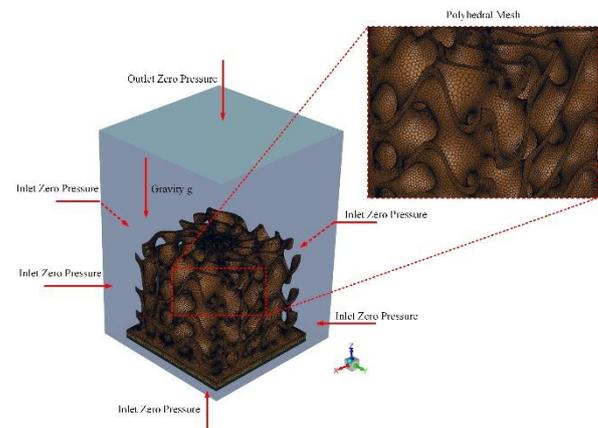
dengan memasukkan ukuran *voxel* yang sesuai sehingga panjang, lebar, dan tingginya sama dengan ukuran sebenarnya.

Tabel 2. Karakteristik desain *heatsink*.

Struktur Heatsink	Surface Area (mm ²)	Tortuosity
<i>Gyroid</i>	9871.02	1.74
<i>Diamond</i>	11929.04	1.78
<i>splitP</i>	12711.93	2.46
<i>Pin</i>	9298.48	1

2.3 Kondisi Batas Computational fluid dynamics (CFD)

Dalam penelitian ini, untuk mensimulasikan aliran udara dan perpindahan panas dalam *heatsink*, kami menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dari perangkat lunak ANSYS dengan *solver* berbasis tekanan. Bahan *heatsink* yang digunakan adalah aluminium, sedangkan fluida yang digunakan adalah udara dengan model gas ideal yang tidak dapat dikompres. Batas kondisi yang diterapkan dalam simulasi ini melibatkan masukan dan keluaran tekanan nol, kondisi dinding adiabatik *no-slip* di sisi-sisi *heatsink* dengan suhu lingkungan sebesar 300K. Selain itu, *fluks* panas dengan nilai 100W/cm² [18] diterapkan pada permukaan bawah *heatsink*. Model fluida yang digunakan adalah model gas ideal. Selanjutnya, *mesh* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *mesh* tetrahedral, yang menguntungkan dalam merepresentasikan objek 3D secara akurat. Kondisi batas keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Kondisi batas dan *mesh*

2.4 Persamaan Pengatur

Dalam penelitian ini, mode yang dipertimbangkan melibatkan konduksi panas dari sumber panas ke sirip *heatsink* dan konveksi panas dari sirip *heatsink* ke fluida. Persamaan yang mengatur fenomena fisik ini adalah persamaan *Navier-Stokes* untuk momentum dan persamaan energi [19].

Persamaan kontinuitas [20].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Persamaan momentum dalam arah x, y, dan z dapat dituliskan sebagai berikut [21]:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} & \quad (2) \\ & = -\frac{\partial p}{\partial x} \\ & + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} & \quad (3) \\ & = -\frac{\partial p}{\partial y} \\ & + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} & \quad (4) \\ & = -\frac{\partial p}{\partial z} \\ & + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] - \rho g_z \end{aligned}$$

Di mana ρ adalah kerapatan fluida, p adalah tekanan, μ adalah viskositas dinamis fluida, g (u , v , dan w) adalah komponen akselerasi gravitasi dalam arah x, y, dan z, masing-masing.

Persamaan energi untuk fluida dapat dituliskan sebagai berikut [20]:

$$\begin{aligned} \rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} & \quad (5) \\ & = k_f \frac{\partial p}{\partial y} \\ & + \mu \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \end{aligned}$$

Di mana c_p adalah kapasitas panas spesifik pada tekanan konstan, k_f adalah konduktivitas termal dari fluida, dan T adalah suhu.

Untuk menghitung koefisien perpindahan panas, dapat dituliskan sebagai berikut [22]:

$$q_w'' = -k \frac{dt}{dy} \quad (6)$$

$$Q = q_w'' A \quad (7)$$

$$Q = hA(T_w - T_\infty) \quad (8)$$

$$h = \frac{Q}{A(T_w - T_\infty)} \quad (9)$$

Dimana K adalah konduktivitas termal, q_w'' adalah fluks panas yang diterima oleh dinding, Q adalah total panas yang diterima oleh dinding, h adalah koefisien perpindahan panas konvektif antara dinding dan fluida sekitarnya, A adalah *surface area*, T_w adalah suhu dinding, T_∞ adalah suhu fluida disekitar dinding.

Untuk menghitung nilai rata-rata dari *Nusselt number*, dapat dituliskan sebagai berikut [23]:

$$Nu = \frac{h \cdot l}{K} \quad (10)$$

Dimana l adalah panjang karakteristik *heatsink*, K adalah konduktivitas termal dari fluida.

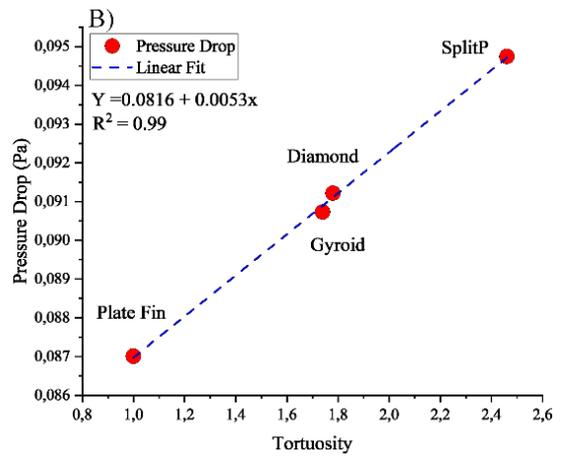
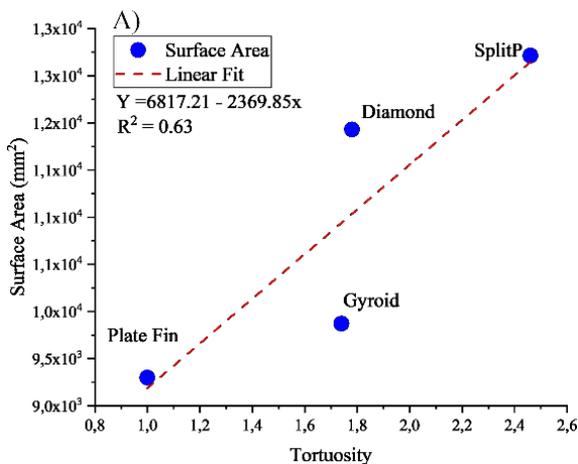
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Tortuosity

Kerusakan seperti kelebihan panas pada komponen elektronik sering terjadi, dan *heatsink* bertanggung jawab untuk mengatasi masalah ini. Oleh karena itu, banyak penelitian telah dilakukan untuk menyelidiki parameter yang mempengaruhi kinerja *heatsink*, terutama faktor geometris seperti porositas *heatsink* [24], dimensi *heatsink* [25], dan orientasi *heatsink* [26] menggunakan pendekatan eksperimental dan metode elemen hingga sebagai upaya untuk meningkatkan dissipasi panas dan mencegah kerusakan pada komponen elektronik. Dalam penelitian ini, Gambar 3 A dan B mengilustrasikan hubungan antara tortuosity, *Surface Area*, dan *pressure drop*, yang diprediksi menggunakan regresi linear dengan $R^2=0.63$ untuk *surface area* dan $R^2=0.99$ untuk *pressure drop*. Ini menunjukkan korelasi yang kuat antara tortuosity dan *Surface Area*, serta *pressure drop*. Peningkatan tortuosity dalam desain *heatsink*, berkisar dari 1-2.4, secara signifikan meningkatkan *Surface Area*. Di antara desain-desain tersebut, *heatsink splitP* menunjukkan *Surface Area* terbesar dengan nilai 12711.93 mm², diikuti oleh *diamond* dengan nilai 11929.04 mm², *gyroid* dengan nilai 9871.02 mm², dan *pin* dengan nilai 9298.48 mm², yang memiliki *Surface Area* terendah. Oleh karena itu, struktur TPMS seperti *splitP*, *diamond*, dan *gyroid* memenuhi kriteria *heatsink* yang efektif, karena dapat mencapai *Surface Area* yang lebih besar sambil mempertahankan dimensi *heatsink* yang sama dengan memanipulasi nilai tortuosity. Secara umum, salah satu cara termudah untuk meningkatkan *Surface Area* adalah dengan memperbesar dimensi fisik *heatsink* itu sendiri. Ini dapat melibatkan peningkatan panjang, lebar, atau tinggi *heatsink*, yang menghasilkan peningkatan proporsional dalam *Surface Area*. Namun, pendekatan ini dapat

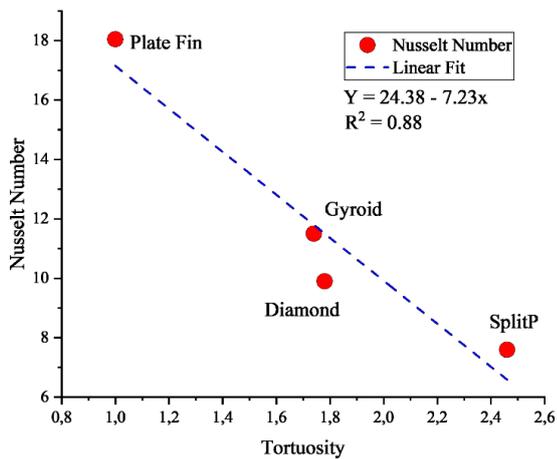
Analisis Efek Tortuositas pada *Heatsink* Berpori terhadap Perpindahan Panas Konveksi Alami

memunculkan tantangan baru, terutama dalam hal ruang yang tersedia. Selain itu, seiring dengan peningkatan nilai tortuosity, *pressure drop* juga meningkat secara signifikan. *Pressure drop* tertinggi teramati pada struktur *splitP* dengan nilai 0.09474 Pa, diikuti oleh *diamond* dengan nilai 0.09122 Pa, *gyroid* dengan nilai 0.09073 Pa, dan *pin* dengan nilai 0.08701 Pa, yang memiliki *pressure drop* terendah. Berdasarkan hasil yang diperoleh dalam penelitian ini, tortuosity adalah parameter yang sangat penting untuk dipertimbangkan dalam desain *heatsink*, karena tortuosity yang lebih tinggi atau jalur aliran yang lebih berliku menghasilkan jalur aliran yang lebih panjang dan peningkatan resistensi aliran fluida, yang konsisten dengan temuan Jose et al. [27]. Akbar et al. [28] juga menjelaskan dalam penelitian mereka bahwa peningkatan tortuosity menyebabkan peningkatan *Surface Area* efektif. Secara keseluruhan, *Surface Area* adalah parameter yang sangat penting dalam desain *heatsink*, karena nilai yang lebih tinggi sesuai dengan dissipasi panas yang lebih baik, berkat peningkatan *Surface Area* yang tersedia untuk pertukaran panas dari *heatsink* ke udara sekitarnya. Namun, hal ini datang dengan biaya. Seiring dengan peningkatan tortuosity dan *Surface Area heatsink*, *pressure drop* juga meningkat. Ini menunjukkan bahwa tortuosity menyebabkan peningkatan resistensi aliran dalam fluida. *Pressure drop* di *heatsink* dapat memiliki dampak signifikan pada laju aliran udara yang melewati *heatsink*, yang pada akhirnya memengaruhi kinerja keseluruhan sistem. Oleh karena itu, ada sebuah kompromi antara manfaat meningkatkan *Surface Area* dan kerugian peningkatan *pressure drop*. Oleh karena itu, tortuosity perlu dioptimalkan untuk mencapai keseimbangan antara efisiensi aliran dan perpindahan panas.



Gambar 3. Hubungan antara tortuosity dengan A) surface area dan B) pressure drop.

Dalam penelitian ini, Gambar 4 menggambarkan hubungan antara tortuosity dan *Nusselt number*, yang diprediksi menggunakan regresi linear dengan nilai $R^2=0.88$. Ini menunjukkan korelasi linear yang sangat kuat antara tortuosity dan *Nusselt number*. Seiring dengan peningkatan tortuosity dari 1-2.4, *Nusselt number* secara signifikan menurun. Struktur *pin* menunjukkan *Nusselt number* tertinggi dengan nilai 18.04 dibandingkan dengan struktur TPMS: *gyroid* dengan nilai 11.5002, *diamond* dengan nilai 9.9001, dan *splitP* dengan nilai 7.5958. Penurunan ini dapat diatribusikan pada kenyataan bahwa seiring dengan peningkatan tortuosity, geometri saluran menjadi lebih kompleks dan curam, menyebabkan peningkatan turbulensi aliran. Meskipun turbulensi dapat meningkatkan perpindahan panas konvektif, ini juga menyebabkan fluida menjauh dari dinding saluran. Hal ini mengakibatkan penurunan area kontak antara fluida dan dinding saluran, menghambat perpindahan panas. Oleh karena itu, meskipun perpindahan panas konvektif dapat meningkat karena turbulensi yang lebih besar, secara keseluruhan perpindahan panas menurun akibat kontak terbatas antara fluida dan dinding saluran. Akibatnya, *Nusselt number*, yang mewakili perpindahan panas secara keseluruhan, menurun seiring dengan peningkatan tortuosity dan turbulensi aliran. Para peneliti menyimpulkan bahwa tortuosity adalah faktor penting yang mempengaruhi kinerja *heatsink* berbasis konveksi alamiah. Meskipun peningkatan tortuosity dapat meningkatkan *Surface Area* untuk dissipasi panas yang lebih baik, ini juga menyebabkan peningkatan *pressure drop*, yang pada akhirnya mengurangi *Nusselt number*, yang secara langsung berdampak negatif pada kinerja keseluruhan sistem. Oleh karena itu, sangat penting untuk menemukan keseimbangan optimal antara faktor-faktor ini untuk mencapai kinerja terbaik dari sebuah *heatsink*.

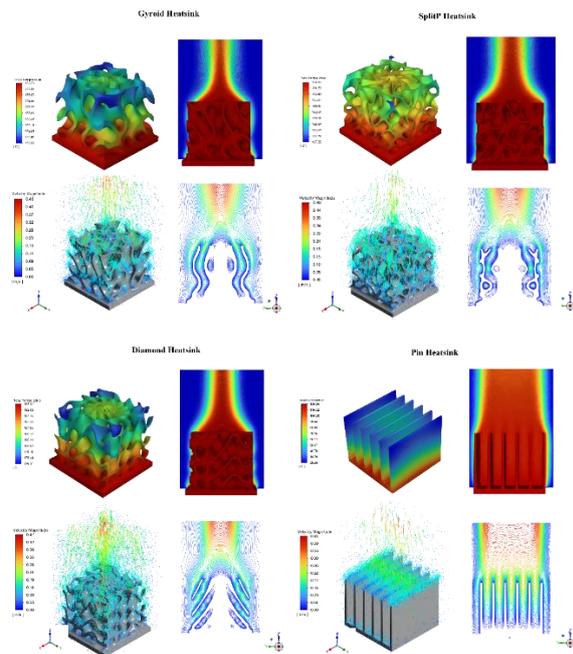


Gambar 4. Hubungan antara Tortuosity and *Nusselt number*.

3.2 Analisis Aliran Fluida

Berdasarkan hasil simulasi dari penelitian ini, Gambar 5 menunjukkan suhu total dan kecepatan lokal dari seluruh struktur heatsink, masing-masing memiliki legenda warna sendiri. Warna merah menunjukkan nilai suhu dan kecepatan maksimum, sedangkan warna biru mewakili nilai suhu dan kecepatan minimum. Dapat diamati bahwa di antara struktur *heatsink*, struktur *splitP* memiliki rentang suhu yang lebih tinggi, berkisar antara 187.35°C - 191.66°C, dibandingkan dengan *diamond* dengan rentang suhu 179.11°C-183.35°C, *gyroid* dengan rentang 176.08°C -179.73°C, dan *pin* dengan suhu 126.6°C. Selain itu, struktur *splitP* juga menunjukkan distribusi panas yang lebih merata dibandingkan dengan struktur lainnya. Ada sedikit sekali area permukaan biru pada struktur *splitP*, menunjukkan bahwa tortuosity yang lebih tinggi, yang berbanding lurus dengan *Surface Area*, menghasilkan dissipasi panas yang lebih baik. Selain itu, dari segi kecepatan, struktur *splitP* memiliki kecepatan maksimum tertinggi dengan nilai 0,48 m/s, diikuti oleh *diamond* dengan kecepatan 0,47 m/s, *gyroid* dengan 0,46 m/s, dan struktur *pin* yang menunjukkan nilai terendah sebesar 0,44 m/s. Hal ini disebabkan oleh struktur *heatsink* TPMS seperti *gyroid*, *diamond*, dan *splitP* yang memberikan lebih banyak *Surface Area* untuk kontak dengan aliran udara. Selain itu, dalam struktur TPMS, udara dapat masuk secara bebas dari segala arah, menyebabkan peningkatan turbulensi udara di dalam *heatsink*, yang pada gilirannya memperpanjang waktu tinggal udara di dalam *heatsink*, menghasilkan kecepatan maksimum yang lebih tinggi. Di sisi lain, untuk struktur *pin*, *Surface Area* untuk kontak dengan aliran udara terbatas pada ujung *pin*. Selain itu, jika diamati dengan cermat, celah-celah antara sirip-sirip pada struktur *pin* tidak terhubung, dan udara hanya dapat masuk melalui arah x. Akibatnya, turbulensi yang terjadi di dalam *heatsink*, menyebabkan kecepatan yang lebih rendah. Namun, investigasi lebih lanjut diperlukan mengenai keterhubungan pori-pori heatsink dan dampaknya

pada kinerja termal untuk mengembangkan *heatsink* yang efektif dan efisien.



Gambar 5. Kontur suhu total dan kecepatan *heatsink*.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan dalam penelitian ini, terdapat korelasi yang kuat antara tortuosity dan *Surface Area*, serta *pressure drop* pada *heatsink*, sebagaimana diprediksi menggunakan regresi linear dengan $R^2=0,63$ untuk *Surface Area* dan $R^2=0,99$ untuk *pressure drop*. Seiring dengan peningkatan tortuosity, baik *Surface Area* maupun *pressure drop* meningkat secara signifikan. Selain itu, tortuosity juga menunjukkan korelasi linear yang kuat dengan *Nusselt number*, dengan $R^2=0,88$, menandakan bahwa seiring dengan peningkatan tortuosity, *Nusselt number* (yang mewakili perpindahan panas keseluruhan) menurun. Berdasarkan analisis aliran fluida berbasis konveksi alamiah dalam struktur *heatsink*, struktur dengan tortuosity tinggi, seperti struktur TPMS (*gyroid*, *diamond*, *splitP*), menunjukkan distribusi panas yang lebih merata dan kecepatan maksimum yang lebih tinggi. Struktur TPMS memberikan lebih banyak *Surface Area* untuk kontak dengan aliran udara, menyebabkan peningkatan turbulensi di dalam *heatsink*. Di sisi lain, struktur *pin* memiliki keterbatasan dalam hal *Surface Area* kontak dan cenderung memiliki turbulensi yang lebih rendah serta kecepatan yang lebih rendah. Dalam penelitian ini, disimpulkan bahwa tortuosity adalah parameter penting yang memengaruhi kinerja *heatsink*, menjadikan struktur TPMS yang dikembangkan dalam penelitian ini sebagai kandidat yang baik untuk desain heatsink manajemen termal. Namun, perlu ditemukan keseimbangan antara *Surface Area*, *pressure drop*, perpindahan panas

keseluruhan, dan parameter lain seperti ukuran pori dan interkoneksi untuk mencapai kinerja *heatsink* yang optimal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Publikasi penelitian artikel ini didanai oleh BIMA Kemendikbud (Basis Informasi Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat) dengan nomor kontrak: 235/LL2/AL.04/2023 pada 22 Juni 2023. Kami dengan tulus menghargai dukungan yang kuat untuk penelitian ini yang diberikan oleh BIMA Kemendikbud. Kami juga ingin menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tridinanti, atas dorongan dan diskusi produktif yang berkaitan dengan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Lampio and R. Karvinen, "A new method to optimize natural convection heat sinks," *Heat Mass Transf. und Stoffuebertragung*, 2018, doi: 10.1007/s00231-017-2106-4.
- [2] S. Zulk, T. Koneke, and A. Mertens, "Analytical Modeling of Plate Fin Heat Sinks for Natural Convection Cooling in Power Electronics," 2016, doi: 10.1109/VPPC.2016.7791618.
- [3] D. Hou, X. Xin, and J. Qian, "Analysis of natural convection heat transfer from vertical and inclined plate fin heat sinks," 2020, doi: 10.1007/978-981-32-9441-7_49.
- [4] V. Meena and A. Arora, "Three-Dimensional Numerical Simulation of Free Convection Over Parallel Fins Heat Sink," 2023, doi: 10.1007/978-981-19-3410-0_8.
- [5] S. W. Pua, K. S. Ong, K. C. Lai, and M. S. Naghavi, "Natural and forced convection heat transfer coefficients of various finned heat sinks for miniature electronic systems," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy*, 2019, doi: 10.1177/0957650918784420.
- [6] S. Feng, M. Shi, H. Yan, S. Sun, F. Li, and T. J. Lu, "Natural convection in a cross-fin heat sink," *Appl. Therm. Eng.*, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.12.049.
- [7] A. M. E. Arefin, "Thermal analysis of modified pin fin heat sink for natural convection," 2016, doi: 10.1109/ICIEV.2016.7759986.
- [8] T. Qiu, D. Wen, W. Hong, and Y. Liu, "Heat transfer performance of a porous copper micro-channel heat sink," *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2020, doi: 10.1007/s10973-019-08547-4.
- [9] R. Joison, V. Babu, A. Kannan, A. Muhammed, and G. Harikrishnan, "Numerical study on thermal performance of lotus type copper porous heat sink," 2021, doi: 10.1063/5.0057947.
- [10] E. C. Silva, Á. M. Sampaio, and A. J. Pontes, "Evaluation of active heat sinks design under forced convection—effect of geometric and boundary parameters," *Materials (Basel)*, 2021, doi: 10.3390/ma14082041.
- [11] K. S. Al-Athel, "A computational methodology for assessing the thermal behavior of metal foam heat sinks," *Appl. Therm. Eng.*, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.014.
- [12] C. Y. Zhao, "Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells," *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2012, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.017.
- [13] N. Baobaid, M. I. Ali, K. A. Khan, and R. K. Abu Al-Rub, "Fluid flow and heat transfer of porous TPMS architected heat sinks in free convection environment," *Case Stud. Therm. Eng.*, 2022, doi: 10.1016/j.csite.2022.101944.
- [14] O. Al-Ketan, M. Ali, M. Khalil, R. Rowshan, K. A. Khan, and R. K. Abu Al-Rub, "Forced Convection Computational Fluid Dynamics Analysis of Architected and Three-Dimensional Printable Heat Sinks Based on Triply Periodic Minimal Surfaces," *J. Therm. Sci. Eng. Appl.*, 2021, doi: 10.1115/1.4047385.
- [15] W. L. Roque and F. G. Wolf, "Computing the tortuosity of cancellous bone cavity network through fluid velocity field," pp. 1–4, 2014.
- [16] I. El Ghandouri, A. El Maakoul, S. Saadeddine, and M. Meziane, "A comprehensive review of methods used to improve the thermal performance of heat sinks in natural convection," *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 2023, doi: 10.1007/s00231-022-03298-9.
- [17] S. J. Cooper, A. Bertei, P. R. Shearing, J. A. Kilner, and N. P. Brandon, "TauFactor: An open-source application for calculating tortuosity factors from tomographic data," *SoftwareX*, 2016, doi: 10.1016/j.softx.2016.09.002.
- [18] D. Kesavan, R. Senthil Kumar, and P. Marimuthu, "Heat transfer performance of air-cooled pin-fin heatsinks: a review," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, doi: 10.1007/s10973-022-11691-z.
- [19] A. Bataineh, W. Batayneh, A. Al-Smadi, and B. Bataineh, "Ladder heat sink design using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)," *Jordan J. Mech. Ind. Eng.*, 2019.
- [20] C. H. Huang, J. J. Lu, and H. Ay, "A three-dimensional heat sink module design problem with experimental verification," *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2011, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.11.044.
- [21] D. K. Kim, S. J. Kim, and J. K. Bae, "Comparison of thermal performances of plate-fin and pin-fin heat sinks subject to an impinging flow," *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2009, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.041.
- [22] R. Mohan and P. Govindarajan, "Experimental and CFD analysis of heat sinks with base plate for CPU cooling," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol.

- 25, no. 8, pp. 2003–2012, 2011, doi: 10.1007/s12206-011-0531-8.
- [23] V. A. da Silva, L. A. C. de Neves Gomes, A. L. F. de Lima e Silva, and S. M. M. de Lima e Silva, “Analysis of natural convection in heat sink using OpenFOAM and experimental tests,” *Heat Mass Transf. und Stoffuebertragung*, 2019, doi: 10.1007/s00231-019-02574-5.
- [24] N. Sreedhar *et al.*, “Mass transfer analysis of ultrafiltration using spacers based on triply periodic minimal surfaces: Effects of spacer design, directionality and voidage,” *J. Memb. Sci.*, 2018, doi: 10.1016/j.memsci.2018.05.028.
- [25] A. A. A. Jabber, M. R. Jawad, A. Abdul, and M. Humadi, “the Effect of Heat Sink Fins Length and Material on Its Performance,” no. December, 2016.
- [26] Q. Shen, D. Sun, Y. Xu, T. Jin, and X. Zhao, “Orientation effects on natural convection heat dissipation of rectangular fin heat sinks mounted on LEDs,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2014, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.085.
- [27] J. M. Carcione, D. Gei, T. Yu, and J. Ba, “Effect of Clay and Mineralogy on Permeability,” *Pure Appl. Geophys.*, 2019, doi: 10.1007/s00024-019-02117-3.
- [28] A. T. Prakoso *et al.*, “The Effect of Tortuosity on Permeability of Porous Scaffold,” *Biomedicines*, vol. 11, no. 2, p. 427, 2023, doi: 10.3390/biomedicines11020427.