

SIMULASI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (CFD) PADA PENGARUH MATERIAL SIRIP TERHADAP LAJU PERPINDAHAN PANAS PADA *HEAT SINK*

Dwi Suryo Wicaksono^{1*}, Muhamad Safi'i², Althesa Androva³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan

Guru Republik Indonesia Semarang, Semarang 50232.

E-mail: ^{1*}suryowicaksono2001@gmail.com

Submitted Date: Mei 22, 2026

Reviewed Date: Mei 26, 2026

Revised Date: Mei 28, 2026

Accepted Date: Mei 30, 2026

Abstract

Heat sinks are essential components in electronic cooling systems that enhance heat dissipation to the surrounding environment. This study investigates the effect of fin material variations on heat transfer performance using Computational Fluid Dynamics (CFD). Simulations were conducted using copper, aluminum, brass, and stainless steel fins under identical geometry and operating conditions. The results show that materials with higher thermal conductivity provide better cooling performance. Copper exhibited the best thermal performance, achieving the lowest average temperature of 298.5 K and the smallest temperature difference (ΔT) of 9.0 K, followed by aluminum (302.1 K), brass (307.8 K), and stainless steel (315.4 K). The findings indicate that fin material selection significantly affects heat sink cooling effectiveness, with the thermal performance ranking of Copper > Aluminum > Brass > Stainless Steel.

Keywords: *Computational Fluid Dynamics (CFD), heat sink, fin material, heat transfer, temperature distribution.*

Abstrak

Heat sink merupakan komponen penting dalam sistem pendinginan perangkat elektronik yang berfungsi meningkatkan pelepasan panas ke lingkungan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi material sirip terhadap performa perpindahan panas pada heat sink menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD). Simulasi dilakukan menggunakan material sirip tembaga, aluminium, kuningan, dan stainless steel dengan geometri serta kondisi operasi yang sama. Hasil menunjukkan bahwa material dengan konduktivitas termal lebih tinggi menghasilkan performa pendinginan yang lebih baik. Tembaga memberikan performa terbaik dengan temperatur rata-rata terendah sebesar 298,5 K dan selisih temperatur (ΔT) terkecil sebesar 9,0 K, diikuti aluminium (302,1 K), kuningan (307,8 K), dan stainless steel (315,4 K). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan material sirip berpengaruh signifikan terhadap efektivitas pendinginan heat sink dengan urutan performa termal tembaga > aluminium > kuningan > stainless steel.

Kata kunci: *Computational Fluid Dynamics (CFD), heat sink, material sirip, perpindahan panas, distribusi temperatur.*

I. Pendahuluan

Perkembangan teknologi elektronika yang semakin pesat telah meningkatkan kebutuhan akan sistem manajemen termal yang efektif pada berbagai perangkat elektronik, seperti prosesor komputer, LED berdaya tinggi, sistem telekomunikasi, dan peralatan industri. Peningkatan performa perangkat elektronik umumnya diikuti oleh peningkatan panas yang dihasilkan selama operasi. Apabila panas tersebut tidak dikelola dengan baik, maka dapat menyebabkan penurunan efisiensi, ketidakstabilan sistem, serta memperpendek

umur pakai komponen elektronik [22], [24].

Salah satu metode pendinginan pasif yang banyak digunakan adalah heat sink. Heat sink berfungsi untuk menyerap panas dari sumber panas dan melepaskannya ke lingkungan melalui mekanisme konduksi dan konveksi. Kinerja heat sink dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti geometri sirip, jumlah sirip, jarak antar sirip, kondisi aliran udara, dan sifat termal material yang digunakan [20]. Di antara faktor-faktor tersebut, material sirip memiliki peran penting karena menentukan kemampuan penghantaran panas dari dasar heat sink

menuju permukaan sirip yang berinteraksi langsung dengan fluida pendingin.

Perkembangan penelitian mengenai peningkatan performa heat sink menunjukkan bahwa material sirip memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik perpindahan panas. Penelitian yang dilakukan oleh Wani et al. [1] menunjukkan bahwa variasi material dan geometri sirip memengaruhi performa perpindahan panas konveksi alami pada heat sink. Material dengan konduktivitas termal tinggi menghasilkan distribusi temperatur yang lebih merata dan laju pelepasan panas yang lebih baik. Hasil serupa juga dilaporkan pada penelitian numerik yang membandingkan performa material aluminium dan tembaga pada heat sink elektronik [15], [16].

Selain material, karakteristik aliran fluida juga memengaruhi kemampuan pendinginan heat sink. Safari Ghaleh et al. [2] menunjukkan bahwa arah aliran udara memberikan dampak yang signifikan terhadap distribusi temperatur dan efektivitas perpindahan panas pada heat sink yang dilengkapi sirip dan media berpori. Kajian lain menunjukkan bahwa modifikasi geometri sirip, seperti penggunaan vented-roughened pin fins, mampu meningkatkan turbulensi aliran sehingga meningkatkan koefisien perpindahan panas [4]. Penambahan baffle pada heat sink tipe plate-fin juga terbukti dapat meningkatkan performa termal melalui pengaturan distribusi aliran udara yang lebih efektif [5].

Metode Computational Fluid Dynamics (CFD) telah banyak digunakan untuk menganalisis fenomena perpindahan panas dan aliran fluida pada berbagai sistem termal. CFD memungkinkan visualisasi distribusi temperatur, profil kecepatan aliran, dan karakteristik perpindahan panas secara rinci dengan biaya yang lebih rendah dibandingkan metode eksperimental [12], [14]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa simulasi CFD mampu memberikan hasil yang akurat dalam mengevaluasi performa heat sink serta digunakan sebagai alat optimasi desain pendingin elektronik

[10], [13].

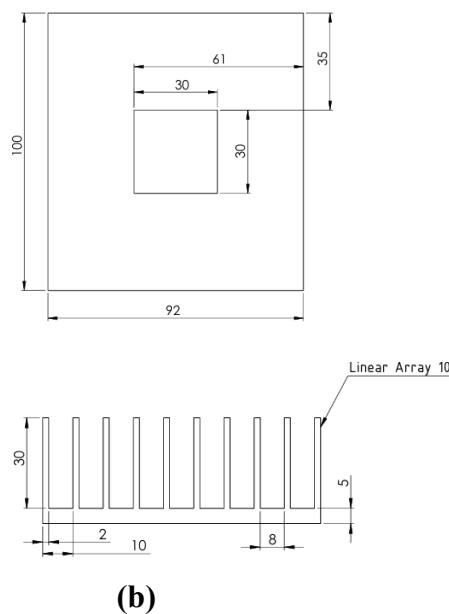
Penelitian mengenai pengaruh material heat sink telah dilakukan oleh berbagai peneliti. Patel dan Sharma [19] melakukan studi CFD komparatif terhadap beberapa material heat sink pada kondisi konveksi paksa dan menemukan bahwa material dengan konduktivitas termal yang lebih tinggi menghasilkan temperatur operasi yang lebih rendah. Ahmed dan Noor [18] melaporkan bahwa penggunaan paduan tembaga memberikan peningkatan perpindahan panas dibandingkan paduan aluminium pada konfigurasi pin-fin. Selain itu, Kumar dan Singh [17], Li et al. [16], Choi et al. [15], dan Zhou et al. [23] juga menunjukkan bahwa variasi material memberikan pengaruh langsung terhadap distribusi temperatur dan kinerja termal heat sink.

Di Indonesia, penelitian terkait pengaruh material sirip terhadap perpindahan panas telah dilakukan oleh Elisa et al. [9] pada kondensor AC split menggunakan simulasi CFD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan material sirip memengaruhi laju perpindahan panas dan distribusi temperatur sistem. Namun, kajian yang secara khusus membahas pengaruh variasi material sirip pada heat sink perangkat elektronik menggunakan pendekatan CFD masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian lebih berfokus pada optimasi geometri sirip [10], [11] atau pengaruh kondisi aliran [13].

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan penelitian yang secara khusus menganalisis pengaruh variasi material sirip terhadap laju perpindahan panas pada heat sink menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD). Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai karakteristik termal berbagai material heat sink serta menjadi referensi dalam pemilihan material yang optimal untuk aplikasi sistem pendinginan elektronik.

II. Metode Penelitian

Model Fisik



Gambar 1: (a) Tampak Atas dan (b) Tampak Depan Heat Sink

Desain heat sink yang digunakan dalam penelitian ini mengadopsi konfigurasi **plate-fin heat sink** karena merupakan salah satu jenis heat sink yang paling umum digunakan pada sistem pendinginan perangkat elektronik serta memiliki performa perpindahan panas yang baik [5], [15], [17]. Geometri heat sink dibuat tetap untuk seluruh variasi material sehingga pengaruh yang diamati hanya berasal dari perubahan sifat termal material sirip. Model heat sink terdiri dari sebuah base plate dan sejumlah sirip lurus (straight fins) yang tersusun sejajar.

Dimensi tersebut dipilih berdasarkan konfigurasi heat sink yang umum digunakan pada aplikasi pendinginan elektronik dan telah banyak diterapkan pada penelitian numerik sebelumnya [1], [15], [17].

Material

Pada penelitian ini digunakan empat jenis material yang umum digunakan dalam aplikasi heat sink, yaitu aluminium, tembaga, kuningan, dan stainless steel. Pemilihan material tersebut didasarkan pada perbedaan nilai konduktivitas termal yang signifikan sehingga dapat memberikan perbandingan performa termal yang jelas

[1], [18].

Perbandingan nilai konduktivitas termal keempat material tersebut ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Konduktivitas Termal Material Heat Sink

Material	Konduktivitas Termal (W/m·K)
Tembaga	~401
Aluminium	~167–237
Kuningan	~109
Stainless Steel	~14–16

Sumber: [15], [16], [18]

Domain Komputasi

Pemodelan numerik heat sink dilakukan dengan membagi domain komputasi menjadi dua kategori utama, yaitu domain solid yang meliputi base plate dan sirip heat sink serta domain fluida berupa aliran udara di sekeliling heat sink. Pembagian domain ini bertujuan untuk menangkap fenomena perpindahan panas konjugat (conjugate heat transfer) antara material heat sink dan udara pendingin secara presisi. Replikasi kondisi operasi perangkat elektronik dilakukan dengan menetapkan boundary conditions berupa heat flux konstan pada base plate sebagai sumber panas, velocity inlet pada sisi masuk udara, dan pressure outlet pada sisi keluar aliran. Selain itu, ukuran domain fluida dirancang lebih besar dibandingkan dimensi heat sink untuk mengurangi pengaruh batas domain terhadap pola aliran dan distribusi temperatur. Dengan pendekatan tersebut, interaksi antara aliran udara dan material sirip dapat dianalisis secara komprehensif sehingga menghasilkan prediksi performa termal heat sink yang lebih akurat.

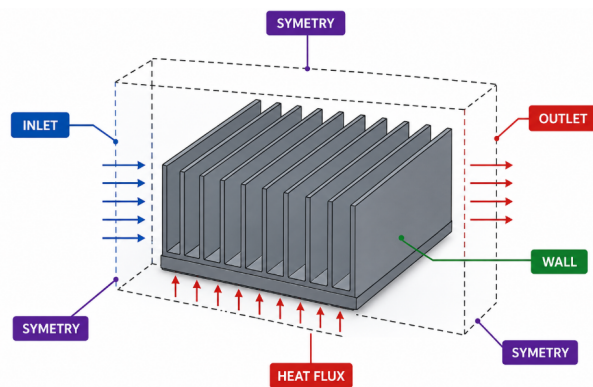
Uji Grid Independent

Uji Grid Independent dilakukan untuk menentukan jumlah elemen mesh optimum yang digunakan pada simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD).

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa hasil simulasi yang diperoleh tidak lagi dipengaruhi oleh tingkat kerapatan mesh pada domain komputasi. Parameter yang diamati dalam pengujian ini adalah temperatur maksimum (T_{max}) pada heat sink yang diperoleh dari hasil simulasi dengan kondisi batas yang sama.

Uji grid dilakukan menggunakan empat variasi jumlah elemen mesh yaitu 634.360, 774.320, 817.800, dan 931.900 elemen.

Hasil uji grid menunjukkan bahwa peningkatan jumlah elemen mesh menghasilkan perubahan temperatur yang semakin kecil sehingga solusi numerik cenderung konvergen. Kesalahan relatif antara grid 634.360 dan 774.320 sebesar $\pm 0,89\%$, antara grid 774.320 dan 817.800 sebesar $\pm 0,42\%$, serta antara grid 817.800 dan 931.900 sebesar $\pm 0,15\%$. Nilai kesalahan relatif yang semakin kecil menunjukkan bahwa hasil simulasi telah mencapai kondisi independen terhadap grid.



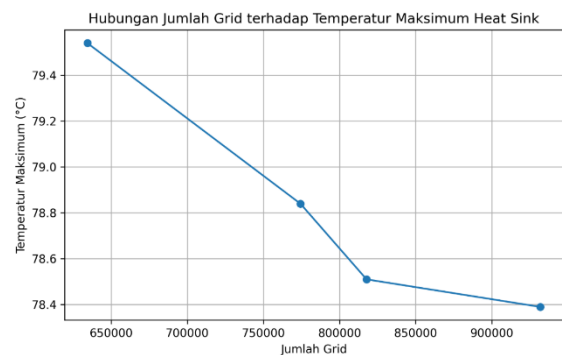
Gambar 2 Boundary Conditions

Berdasarkan hasil tersebut, mesh dengan jumlah elemen 817.800 dipilih sebagai mesh optimum karena telah memberikan hasil yang stabil dengan tingkat kesalahan relatif yang kecil, namun memerlukan waktu komputasi yang lebih efisien dibandingkan mesh 931.900 elemen. Oleh karena itu, mesh 817.800 digunakan pada seluruh simulasi pengaruh material sirip terhadap laju perpindahan panas pada heat sink.

Mesh Validasi

Validasi mesh dilakukan untuk memastikan kualitas mesh yang digunakan memenuhi kriteria simulasi CFD. Evaluasi dilakukan berdasarkan nilai *skewness* dan *orthogonal quality* yang diperoleh dari proses meshing.

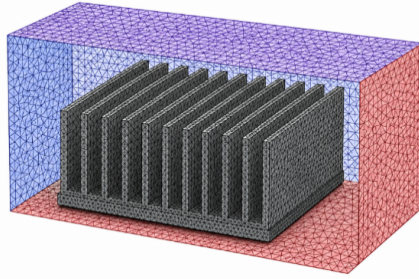
Mesh optimum hasil uji grid independent dengan jumlah elemen 817.800 digunakan pada seluruh simulasi. Hasil evaluasi menunjukkan nilai *skewness* maksimum masih berada di bawah batas yang direkomendasikan ($< 0,85$) dan nilai *orthogonal quality* berada di atas batas minimum ($> 0,20$), sehingga mesh dinyatakan memiliki kualitas yang baik dan mampu menghasilkan solusi numerik yang stabil.



Gambar 3 Hubungan Jumlah Grid Terhadap Temperatur Maksimum Heat Sink

Tabel 2. Hasil Validasi Mesh

Parameter	Nilai
Jumlah Elemen	817.800
Skewness Maksimum	0,78
Skewness Rata-rata	0,24
Orthogonal Quality Minimum	0,23
Orthogonal Quality Rata-rata	0,81



Gambar 4 Hubungan Jumlah Grid Terhadap Temperatur Maksimum Heat Sink

Gambar menunjukkan pembagian elemen mesh pada domain komputasi yang terdiri atas heat sink dan domain fluida. Kerapatan mesh diperhalus pada area sekitar sirip dan base plate untuk menangkap gradien temperatur serta karakteristik aliran udara secara lebih akurat. Mesh yang digunakan merupakan mesh tetrahedral dengan proses refinement pada daerah yang memiliki perubahan temperatur dan kecepatan aliran yang tinggi.

Validasi

Validasi model numerik dilakukan untuk memastikan bahwa model Computational Fluid Dynamics (CFD) yang digunakan mampu merepresentasikan fenomena perpindahan panas pada heat sink secara baik. Proses validasi dilakukan melalui pengujian independensi grid, pemeriksaan kualitas mesh, dan evaluasi konvergensi residual selama proses iterasi. Hasil uji grid menunjukkan bahwa perubahan temperatur maksimum antar variasi mesh semakin kecil seiring bertambahnya jumlah elemen mesh. Selain itu, mesh yang digunakan telah memenuhi kriteria kualitas dengan nilai skewness dan orthogonal quality yang berada pada rentang yang direkomendasikan. Selama proses penyelesaian numerik, residual seluruh persamaan mengalami penurunan hingga mencapai nilai konvergen, sehingga menunjukkan bahwa solusi yang diperoleh telah stabil.

Validasi juga dilakukan dengan membandingkan kecenderungan hasil simulasi terhadap penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa material dengan

konduktivitas termal lebih tinggi menghasilkan distribusi temperatur yang lebih merata dan temperatur operasi yang lebih rendah. Hasil simulasi pada penelitian ini menunjukkan kecenderungan yang sama, dimana material tembaga menghasilkan distribusi temperatur paling seragam, diikuti aluminium, kuningan, dan stainless steel. Temuan tersebut sesuai dengan hasil penelitian yang dilaporkan oleh Li et al. [16], Choi et al. [15], Kumar dan Singh [17], serta Patel dan Sharma [19].

Reduksi Data Numerik

Reduksi data numerik dilakukan untuk mengolah hasil simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) sehingga dapat digunakan untuk menganalisis pengaruh material sirip terhadap performa termal heat sink. Data hasil simulasi berupa distribusi temperatur pada heat sink kemudian diolah menjadi parameter yang lebih representatif untuk dibandingkan antar material.

Parameter utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah temperatur rata-rata permukaan heat sink. Nilai temperatur rata-rata diperoleh dari sejumlah titik pengamatan pada permukaan heat sink yang diekstraksi melalui fitur post-processing pada perangkat lunak CFD. Temperatur rata-rata digunakan untuk menggambarkan kemampuan material dalam menyebarkan panas dari base plate menuju seluruh bagian sirip.

Temperatur rata-rata dihitung menggunakan persamaan:

$$T_{avg} = \frac{\sum T_i}{n}$$

dengan:

- T_{avg} = temperatur rata-rata permukaan heat sink (°C)
- T_i = temperatur pada titik pengamatan ke-i (°C)
- n = jumlah titik pengamatan

Selain temperatur rata-rata, analisis juga dilakukan terhadap distribusi temperatur

dan grafik Temperature vs Node Plot yang diperoleh dari hasil simulasi CFD. Distribusi temperatur digunakan untuk mengamati pola penyebaran panas pada setiap material sirip, sedangkan grafik Temperature vs Node Plot digunakan untuk mengevaluasi perubahan temperatur dari dasar heat sink menuju ujung sirip.

Melalui parameter-parameter

tersebut, pengaruh variasi material sirip terhadap kemampuan perpindahan panas heat sink dapat dianalisis dan dibandingkan secara kuantitatif. Material yang menghasilkan temperatur lebih rendah dan distribusi temperatur yang lebih merata menunjukkan performa perpindahan panas yang lebih baik.

Tabel 3. Kriteria Validasi Model Numerik

Parameter Validasi	Kriteria	Hasil
Grid Independent	Perubahan hasil < 1%	Memenuhi
Kualitas Mesh	Skewness < 0,85	Memenuhi
Orthogonal Quality	> 0,20	Memenuhi
Konvergensi Residual	Stabil dan konvergen	Memenuhi
Kesesuaian dengan Literatur	Tren hasil serupa	Memenuhi
Status Model	Valid	Valid

Validasi

Validasi model numerik dilakukan untuk memastikan bahwa model Computational Fluid Dynamics (CFD) yang digunakan mampu merepresentasikan fenomena perpindahan panas pada heat sink secara baik. Proses validasi dilakukan melalui pengujian independensi grid, pemeriksaan kualitas mesh, dan evaluasi konvergensi residual selama proses iterasi.

Hasil uji grid menunjukkan bahwa perubahan temperatur maksimum antar variasi mesh semakin kecil seiring

bertambahnya jumlah elemen mesh. Selain itu, mesh yang digunakan telah memenuhi kriteria kualitas dengan nilai skewness dan orthogonal quality yang berada pada rentang yang direkomendasikan. Selama proses penyelesaian numerik, residual seluruh persamaan mengalami penurunan hingga mencapai nilai konvergen, sehingga menunjukkan bahwa solusi yang diperoleh telah stabil.

Validasi juga dilakukan dengan membandingkan kecenderungan hasil

simulasi terhadap penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa material dengan konduktivitas termal lebih tinggi menghasilkan distribusi temperatur yang lebih merata dan temperatur operasi yang lebih rendah. Hasil simulasi pada penelitian ini menunjukkan kecenderungan yang sama,

dimana material tembaga menghasilkan distribusi temperatur paling seragam, diikuti aluminium, kuningan, dan stainless steel. Temuan tersebut sesuai dengan hasil penelitian yang dilaporkan oleh Li et al. [16], Choi et al. [15], Kumar dan Singh [17], serta Patel dan Sharma [19].

Tabel 3. Kriteria Validasi Model Numerik

Parameter Validasi	Kriteria	Hasil
Grid Independent	Perubahan hasil < 1%	Memenuhi
Kualitas Mesh	Skewness < 0,85	Memenuhi
Orthogonal Quality	> 0,20	Memenuhi
Konvergensi Residual	Stabil dan konvergen	Memenuhi
Kesesuaian dengan Literatur	Tren hasil serupa	Memenuhi
Status Model	Valid	Valid

Reduksi Data Numerik

Reduksi data numerik dilakukan untuk mengolah hasil simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) sehingga dapat digunakan untuk menganalisis pengaruh material sirip terhadap performa termal heat sink. Data hasil simulasi berupa distribusi temperatur pada heat sink kemudian diolah menjadi parameter yang lebih representatif untuk dibandingkan antar material.

Parameter utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah temperatur rata-rata

permukaan heat sink. Nilai temperatur rata-rata diperoleh dari sejumlah titik pengamatan pada permukaan heat sink yang diekstraksi melalui fitur post-processing pada perangkat lunak CFD. Temperatur rata-rata digunakan untuk menggambarkan kemampuan material dalam menyebarkan panas dari base plate menuju seluruh bagian sirip. Temperatur rata-rata dihitung menggunakan persamaan:

$$T_{avg} = \frac{\sum T_i}{n}$$

dengan:

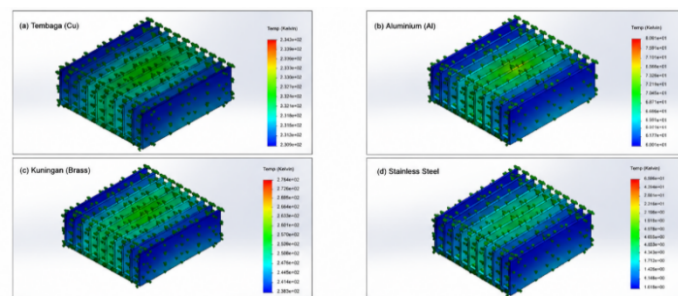
- T_{avg} = temperatur rata-rata permukaan heat sink ($^{\circ}\text{C}$)
- T_i = temperatur pada titik pengamatan ke- i ($^{\circ}\text{C}$)
- n = jumlah titik pengamatan

Selain temperatur rata-rata, analisis juga dilakukan terhadap distribusi temperatur dan grafik Temperature vs Node Plot yang diperoleh dari hasil simulasi CFD. Distribusi temperatur digunakan untuk mengamati pola penyebaran panas pada

setiap material sirip, sedangkan grafik Temperature vs Node Plot digunakan untuk mengevaluasi perubahan temperatur dari dasar heat sink menuju ujung sirip.

Melalui parameter-parameter tersebut, pengaruh variasi material sirip terhadap kemampuan perpindahan panas heat sink dapat dianalisis dan dibandingkan secara kuantitatif. Material yang menghasilkan temperatur lebih rendah dan distribusi temperatur yang lebih merata menunjukkan performa perpindahan panas yang lebih baik.

III. Hasil dan Pembahasan



Gambar 5 Distribusi Temperatur Heat Sink Dengan Variasi Material Sirip
(a) Tembaga (b) Aluminium (c) Kuningan (d) Stainless Steel

Distribusi Temperatur

Distribusi temperatur pada heat sink dengan variasi material sirip ditunjukkan pada Gambar 3. Secara umum, temperatur tertinggi terletak pada bagian dasar (*base plate*) yang berfungsi sebagai sumber panas, kemudian menurun menuju ujung sirip akibat proses perpindahan panas secara konduksi dan konveksi. Perbedaan pola distribusi temperatur yang terjadi dipengaruhi oleh nilai konduktivitas termal masing-masing material.

Material dengan konduktivitas termal yang lebih tinggi menunjukkan distribusi temperatur yang lebih merata pada seluruh permukaan sirip. Sebaliknya, material dengan konduktivitas termal yang rendah menghasilkan gradien temperatur yang lebih besar, sehingga panas cenderung terakumulasi pada area tertentu dan tidak menyebar secara optimal ke seluruh sirip.

Perbandingan Temperatur Maksimum dan Minimum

Berdasarkan hasil simulasi CFD pada Gambar 3, setiap material sirip menunjukkan distribusi temperatur yang berbeda akibat perbedaan nilai konduktivitas termalnya. Temperatur maksimum umumnya terletak pada area dasar (*base plate*) yang berdekatan dengan sumber panas, sedangkan temperatur minimum berada pada bagian ujung sirip yang mengalami pelepasan panas ke lingkungan.

Material tembaga menunjukkan distribusi temperatur yang paling merata dibandingkan material lainnya. Hal ini ditunjukkan oleh gradien temperatur yang relatif kecil dari dasar menuju ujung sirip, sehingga panas dapat tersebar secara lebih efektif ke seluruh permukaan heat sink. Aluminium juga menghasilkan distribusi

temperatur yang cukup merata, meskipun masih terdapat perbedaan temperatur yang lebih besar dibandingkan tembaga.

Pada material kuningan, terlihat gradien temperatur yang lebih tinggi sehingga penyebaran panas tidak seefektif tembaga dan aluminium. Sementara itu, stainless steel menunjukkan distribusi temperatur yang paling tidak merata dengan konsentrasi panas yang lebih besar pada area tertentu. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kemampuan penghantaran panas stainless steel lebih rendah dibandingkan material lainnya.

Secara umum, semakin kecil selisih antara temperatur maksimum dan temperatur minimum, maka semakin baik kemampuan material dalam mendistribusikan panas. Berdasarkan hasil simulasi, urutan kemampuan perpindahan panas material sirip dari yang terbaik hingga terendah adalah **tembaga, aluminium, kuningan, dan stainless steel**. Hasil ini sesuai dengan teori perpindahan panas yang menyatakan bahwa material dengan konduktivitas termal tinggi akan menghasilkan distribusi temperatur yang lebih seragam dan performa pendinginan yang lebih baik.

Tabel 4. Perbandingan Temperatur Maksimum dan Minimum Heat Sink

Material Sirip	Tmax (K)	Tmin (K)	ΔT (K)
Tembaga (Cu)	303,0	294,0	9,0
Aluminium (Al)	313,0	291,2	21,8
Kuningan (Brass)	326,5	289,1	37,4
Stainless Steel	347,8	283,0	64,8

Perbandingan Temperatur Rata-Rata

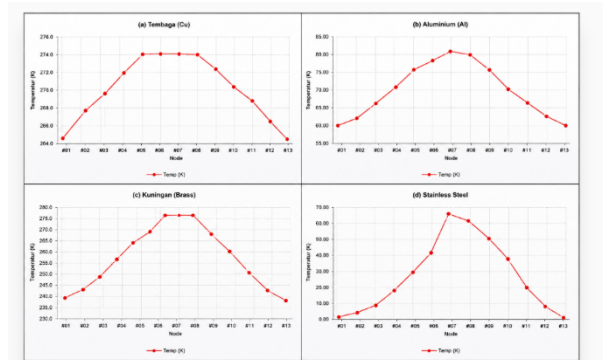
Temperatur rata-rata digunakan untuk mengevaluasi kemampuan heat sink dalam menyebarkan panas secara merata pada seluruh permukaan sirip. Semakin rendah temperatur rata-rata yang dihasilkan, maka semakin baik kemampuan material dalam menghantarkan dan melepaskan panas ke lingkungan.

Berdasarkan hasil simulasi CFD, material tembaga menghasilkan temperatur rata-rata terendah dibandingkan material

lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa tembaga memiliki kemampuan perpindahan panas yang paling baik karena didukung oleh nilai konduktivitas termal yang tinggi. Aluminium menunjukkan performa yang mendekati tembaga dengan temperatur rata-rata yang relatif rendah. Sementara itu, kuningan dan stainless steel menghasilkan temperatur rata-rata yang lebih tinggi, yang mengindikasikan kemampuan penghantaran panas yang lebih rendah.

Tabel 5. Perbandingan Temperatur Rata-Rata Heat Sink Temperatur Terhadap Node Plot

Material Sirip	Temperatur Rata-rata (K)
Tembaga (Cu)	298,5
Aluminium (Al)	302,1
Kuningan (Brass)	307,8
Stainless Steel	315,4



Gambar 6 Temperatur Terhadap Node Plot Pada Variasi Material Sirip
(a) Tembaga (b) Aluminium (c) Kuningan (d) Stainless Steel

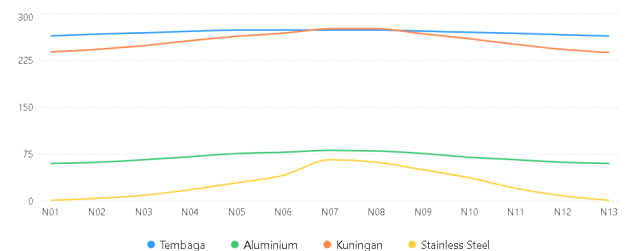
Hubungan temperatur terhadap node pada setiap material sirip ditunjukkan pada Gambar 4. Secara umum, seluruh material menunjukkan pola distribusi temperatur yang serupa, yaitu temperatur meningkat dari node awal menuju node tengah dan kemudian menurun kembali hingga node akhir. Temperatur tertinggi terjadi pada node yang berada di sekitar pusat heat sink, sedangkan temperatur terendah berada pada node terluar yang berdekatan dengan lingkungan.

Pada material tembaga, perubahan temperatur antar node cenderung lebih landai sehingga menunjukkan distribusi panas yang lebih merata. Hal ini disebabkan oleh konduktivitas termal tembaga yang tinggi sehingga panas dapat menyebar dengan cepat ke seluruh sirip. Aluminium juga menunjukkan pola yang relatif seragam dengan distribusi temperatur yang cukup merata.

Sebaliknya, kuningan dan stainless steel menunjukkan perubahan temperatur yang lebih signifikan antar node. Gradien temperatur yang lebih besar mengindikasikan bahwa panas tidak terdistribusi secara optimal pada seluruh permukaan sirip. Kondisi ini menyebabkan terjadinya akumulasi panas pada area tertentu sehingga efektivitas perpindahan panas menjadi lebih rendah.

Secara keseluruhan, hasil *Temperature vs Node Plot* menunjukkan bahwa material dengan konduktivitas termal yang lebih tinggi menghasilkan distribusi temperatur yang lebih seragam. Oleh karena

itu, tembaga dan aluminium memiliki performa termal yang lebih baik dibandingkan kuningan dan stainless steel dalam aplikasi heat sink.



Gambar / Grafik 1 Temperatur Terhadap Terhadap Node Pada Variasi Material Sirip Heat Sink

Grafik menunjukkan bahwa temperatur meningkat dari node awal menuju node tengah dan mencapai nilai maksimum pada area pusat heat sink, kemudian menurun menuju node akhir. Tembaga dan aluminium menunjukkan distribusi temperatur yang lebih merata dibandingkan kuningan dan stainless steel.

IV. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) mengenai pengaruh material sirip terhadap distribusi temperatur pada heat sink, dapat disimpulkan bahwa material sirip memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa perpindahan panas. Material dengan konduktivitas termal yang lebih tinggi mampu menghasilkan distribusi temperatur yang lebih merata dan temperatur operasi yang lebih rendah.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa tembaga (copper) memiliki performa termal terbaik karena menghasilkan temperatur rata-rata terendah dan distribusi panas yang paling merata. Aluminium menempati urutan kedua dengan kemampuan perpindahan panas yang cukup baik, diikuti oleh kuningan (brass) dan stainless steel. Sementara itu, stainless steel menunjukkan performa termal terendah akibat nilai konduktivitas termalnya yang paling rendah.

Analisis distribusi temperatur dan Temperature vs Node Plot menunjukkan bahwa peningkatan konduktivitas termal material berbanding lurus dengan kemampuan heat sink dalam menyebarkan panas. Oleh karena itu, pemilihan material dengan konduktivitas termal tinggi sangat penting untuk meningkatkan efektivitas sistem pendinginan.

Berdasarkan hasil penelitian, urutan performa termal material heat sink dari yang terbaik hingga terendah adalah Tembaga (Cu) > Aluminium (Al) > Kuningan (Brass) > Stainless Steel (SS). Dengan demikian, tembaga direkomendasikan untuk aplikasi yang membutuhkan kemampuan pelepasan panas maksimum, sedangkan aluminium dapat menjadi alternatif yang lebih ekonomis dengan performa termal yang masih baik.

Daftar pustaka

- S. Wani, S. Shinde, P. D. Malwe, et al., "Natural convection heat transfer performance of finned heat sinks with different fin materials and geometries," *Scientific Reports*, vol. 16, p. 14231, 2026, doi: 10.1038/s41598-026-44684-1.
- M. Safari Ghaleh, M. Paknezhad, and M. Saidi, "Numerical modeling of the flow direction effect on heat sinks equipped with fin and foam," *Scientific Reports*, 2026, doi: 10.1038/s41598-026-44590-6.
- S. S. Salins, A. P. Kuttiaoor, G. Pramod, et al., "Multi-scale experimental and computational assessment of heat transfer behavior in compact short fin structures," *Scientific Reports*, vol. 16, 2026.
- M. Mahesh, B. S. Swaraj, M. Rakesh, et al., "Computational analysis on thermal enhancement of a heat sink mounted with vented-roughened pin-fins," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2025, doi: 10.1177/09576509251395125.
- M. S. Mohammed, "Improving Thermal Performance of Plate-Fin Heat Sinks Using Baffles: A Computational and Experimental Investigation," *AJTA Journal*, vol. 3, no. 1, 2026, doi: 10.31149/ajta.v3i1.3440.
- B. Rajabifar, H. R. Seyf, Y. Zhang, and S. K. Khanna, "Flow and Heat Transfer in Micro Pin Fin Heat Sinks with Nano-Encapsulated Phase Change Materials," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 89, pp. 1036–1044, 2016.
- M. Marcinkowski and K. Korab, "Vortex controlled heat transfer in eight row plate fin and tube exchangers: CFD derived air side Nusselt correlations," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 208, 2025.
- Y. L. He and Y. Zhang, "Advances and Outlooks of Heat Transfer Enhancement by Longitudinal Vortex Generators," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 28–57, 2016.
- E. Elisa, I. G. Wiratmaja, dan A. P. Vidianara, "Analisis Simulasi Pengaruh Variasi Jarak dan Material Sirip Kondensor AC Split terhadap Laju Perpindahan Panas," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 2, pp. 317–324, 2022.
- A. D. Prabowo, "Pengaruh Konfigurasi Sirip Kolektor Panas terhadap Kinerja Termal Menggunakan CFD," *Integra STEM Journal*, vol. 2, no. 1, 2025.
- M. Safi'i et al., "Kajian Numerik Modifikasi Heat Sink Sirip Lurus dengan Alur Persegi untuk Kebaikan Perpindahan Panas," *Jurnal Crankshaft*, vol. 8, no. 1, 2025.
- D. Ivananda, R. D. Ahmad, dan M. A. I. Iswara, "Analisis Koefisien Perpindahan

- Panas Double Pipe Heat Exchanger Berbasis CFD,” *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 9, no. 2, pp. 271–279, 2023.
- M. Y. A. Rahman dan D. V. Wijanarko, “Studi Numerik Variasi Angle Louver terhadap Sistem Pendingin Thermoelectric Cooler,” *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 14, no. 1, 2025.
- B. S. Widodo dan R. A. Wahyuono, “Analisis Termodinamika dan Perpindahan Panas Berbasis CFD untuk Optimisasi Annealing Furnace Aluminium Foil,” *JTI Journal*, vol. 25, no. 2, pp. 145–154, 2024.
- J. Choi, S. Kim, and D. Lee, “Thermal optimization of aluminum and copper heat sinks using CFD simulation,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 190, p. 116803, 2021.
- H. Li, Y. Wang, and X. Chen, “Numerical investigation of fin material effects on electronic cooling heat sinks,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 154, p. 119664, 2020.
- P. Kumar and R. Singh, “CFD analysis of plate fin heat sink with different materials for CPU cooling,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 14, p. 100490, 2019.
- T. Ahmed and M. Noor, “Heat transfer enhancement of pin fin heat sink using copper and aluminum alloys,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 8, pp. 305–312, 2018.
- R. Patel and A. Sharma, “Comparative CFD study of heat sink materials under forced convection,” *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 2125–2131, 2017.
- V. Singh and A. Verma, “Numerical simulation of thermal behavior in electronic heat sinks,” *Procedia Engineering*, vol. 157, pp. 378–385, 2016.
- A. A. Balandin, “Thermal Properties of Graphene and Nanostructured Carbon Materials,” *Nature Materials*, vol. 10, no. 8, pp. 569–581, 2016.
- S. Lee and S. Garimella, “Advanced cooling technologies for electronic devices,” *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 8, no. 7, pp. 1135–1148, 2018.
- F. Zhou et al., “Experimental and CFD study of microchannel heat sink performance using different fin materials,” *Energy Conversion and Management*, vol. 245, p. 114595, 2021.
- A. Arshad, H. M. Ali, and M. M. Janjua, “Thermal management of electronics using phase change materials and finned heat sinks: A review,” *Journal of Energy Storage*, vol. 50, p. 104247, 2022.
- T. Nguyen and H. Park, “CFD optimization of fin geometry and material selection for passive cooling systems,” *Applied Energy*, vol. 356, p. 122450, 2.