

Studi Numerik *Air Cooling* dengan *Perforated Straight Fins Heat Sink* pada *Central Processing Unit (CPU)*

Abelovsky Emmanuel G. Ginting dan Bambang Arip Dwiyanoro
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: bambangads@me.its.ac.id

Abstrak—Di era digitalisasi ini dibutuhkan prosesor (CPU) yang cepat untuk memenuhi kebutuhan komputasi, namun prosesor yang cepat dapat menghasilkan temperatur yang tinggi. Dengan teknik pendinginan *air cooling*, *heatsink* dapat membantu dalam mendinginkan prosesor dengan bantuan *blower*/kipas. Dilakukan studi numerik untuk meninjau terkait distribusi temperatur pada *heatsink* dengan *perforated fin*, pengaruh jumlah lubang, dan pengaruh kecepatan *inlet* terhadap temperatur CPU. Dalam penelitian ini digunakan regular *fin* dan *perforated fin* dengan 6, 10, dan 14 lubang dengan variasi kecepatan udara pada *inlet* sebesar 1, 1.5, 2, 2.5, dan 3 m/s. Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi temperatur di model *perforated fin* lebih tinggi dibandingkan dengan model regular *fin*. Kecepatan udara *inlet* juga berperan dalam penurunan temperatur CPU, dimana semakin tinggi kecepatan udara *inlet*, maka semakin menurun pula temperatur CPU. Lubang dan kecepatan *inlet* juga mempengaruhi koefisien konveksi, dimana berdasarkan hasil simulasi, pada kecepatan 3 m/s, koefisien konveksi tertinggi terjadi pada *perforated fin* dengan 14 lubang, sedangkan koefisien konveksi terendah terjadi pada regular *fin*.

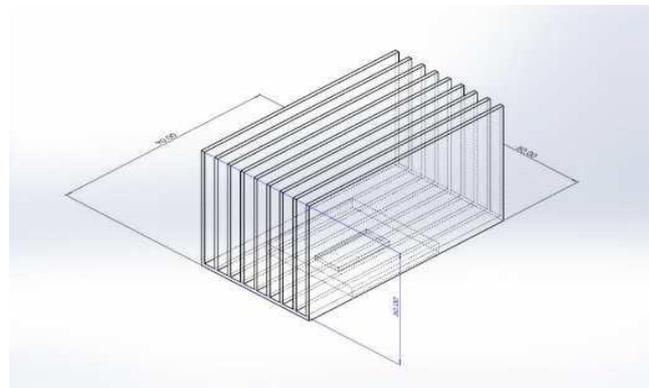
Kata Kunci—*Air Cooling*, Berlubang, *Heatsink*, Sirip.

I. PENDAHULUAN

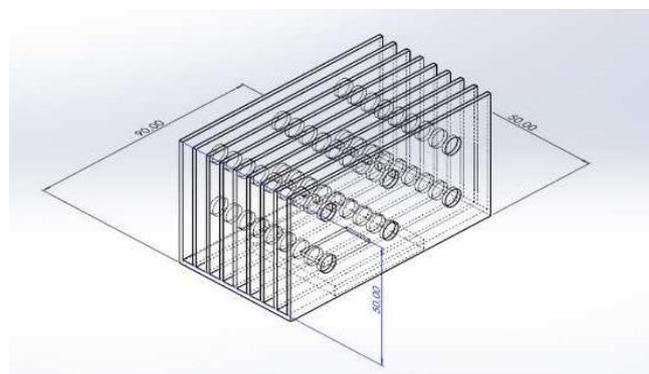
KINERJA komputer terus dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan komputasi di era digital ini. Prosesor atau CPU (*Central Processing Unit*) pada komputer diandalkan untuk memproses data besar dengan kecepatan luar biasa. yang menyebabkan peningkatan temperatur pada CPU. Selain itu, terdapat tren miniaturisasi yaitu tren dalam mendesain komponen-komponen elektronik menjadi lebih kecil sehingga lebih tipis, ringan, dan kompleks, mengakibatkan adanya titik panas yang berdampak buruk pada kinerja prosesor dan menurunkan efisiensi pendinginan [1-3].

Pendinginan CPU (*Central Processing Unit*) sangat penting untuk memiliki kondisi kerja yang andal dengan suhu yang sesuai untuk peralatan elektronik seperti komputer dan perangkat terkait. Pendinginan menggunakan *air cooling* melalui konveksi natural maupun forced, telah memberikan pengaruh yang signifikan untuk meningkatkan kinerjanya seiring dengan meningkatnya temperatur. Teknik pendinginan *forced convection* pada umumnya menggunakan kombinasi *heatsink* dan kipas, dimana *fin* atau sirip-sirip pada *heatsink* berguna sebagai alat penukar panas dari permukaan ke fluida di sekitarnya.

Sudah banyak penelitian mengenai konfigurasi *fin* mulai dari jarak antar *fin*, tinggi *fin*, ketebalan pelat, hingga bentuk *fin*. Penelitian yang dilakukan oleh M. R. Shaeri, et.al. (2009) menyelidiki pengaruh aliran fluida dan perpindahan panas secara konduksi dan konveksi pada 10 variasi desain sirip berlubang persegi panjang secara numerik [4]. Selanjutnya



Gambar 1. Ilustrasi model regular *heatsink*.



Gambar 2. Ilustrasi model *perforated heatsink*.

dilakukan studi eksperimen tentang efek dari berbagai bentuk lubang terhadap distribusi temperatur menggunakan *forced convection* oleh T. K. Ibrahim, et.al. (2018) [5]. Kembali lagi studi yang dilakukan oleh T. K. Ibrahim, et.al. (2019), yaitu eksperimen dan simulasi untuk merancang *heatsink* yang optimal berdasarkan jumlah lubang pada *fin* dengan variasi kecepatan *inlet* [6]. Penelitian-penelitian tersebut juga menyimpulkan bahwa *fin* yang diberikan lubang (*perforated*) dapat meningkatkan koefisien perpindahan panas, sehingga distribusi temperatur dan perpindahan panas pada *perforated fins* lebih baik daripada *fin* tanpa lubang (*solid fins*).

Kemajuan terbaru dalam teknologi komputer, seperti munculnya *game* berkinerja tinggi dan aplikasi pusat data, telah menyebabkan meningkatnya permintaan akan *heatsink* CPU yang lebih efisien dan efektif. Maka dari itu, tugas akhir ini berfokus pada pengaruh *heatsink* dengan *perforated fins* dengan variasi jumlah lubang dan kecepatan udara, pada peningkatan efisiensi pembuangan panas CPU.

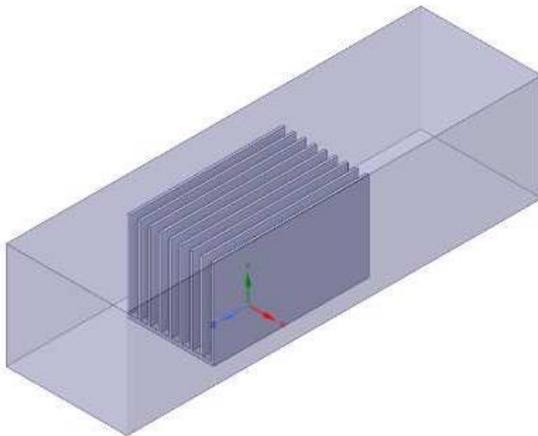
II. METODOLOGI

A. Model Sistem

Gambar 1 dan Gambar 2 merupakan ilustrasi model dari

Tabel 1.
Dimensi *heatsink*

Parameter	Nilai
Tinggi sirip	50 mm
Panjang sirip	90 mm
Ketebalan sirip	1.5 mm
Diameter lubang	7 mm
Jumlah sirip	9
Lebar <i>baseplate</i>	50 mm
Ketebalan <i>baseplate</i>	2 mm



Gambar 3. Pemodelan domain fluida.

heatsink dengan 9 *fins* yang digunakan pada penelitian ini.

Adapun dimensi *heatsink* yang sudah dimodelkan dapat dilihat pada Tabel 1.

Model pada *regular fins* dan *perforated fins* memiliki dimensi yang sama, namun dengan perbedaan yaitu pada *perforated fins* terdapat lubang dengan ukuran diameter sebesar 7 mm.

B. Meshing

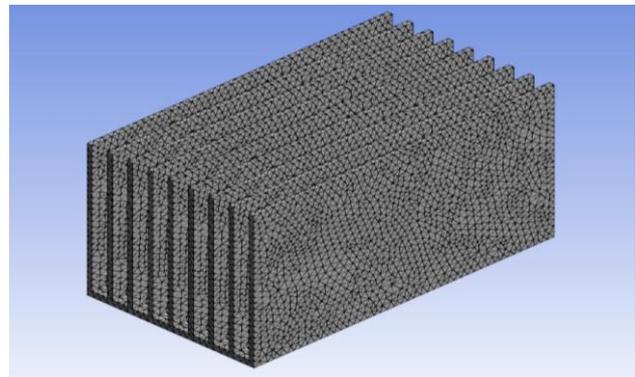
Model yang sudah dibuat akan didefinisikan sesuai kondisi dimensi aslinya. Setelah itu, dilakukan pembuatan domain fluida menggunakan ANSYS *SpaceClaim*, diberikan pada Gambar 3. Domain fluida memiliki panjang 240 mm dan lebar 70 mm serta tinggi 62 mm. Selanjutnya akan dilakukan proses *meshing*, yaitu pemecahan model dan domain fluida menjadi elemen-elemen kecil.

Dapat dilihat pada Gambar 4 hasil *mesh heatsink* model *regular fins* dan *perforated fins* menggunakan software ANSYS. *Mesh* dibuat menggunakan metode *automatic* tanpa menambahkan metode atau secara *Automatic*, dimana didapatkan jumlah elemen *mesh* awal sebesar 554642 untuk *regular fins* dan 752628 untuk *perforated fins*. Pada bagian *heatsink*, IHS, dan CPU Die ukuran *meshing* dibuat semakin rapat yang bertujuan untuk meningkatkan akurasi dari simulasi.

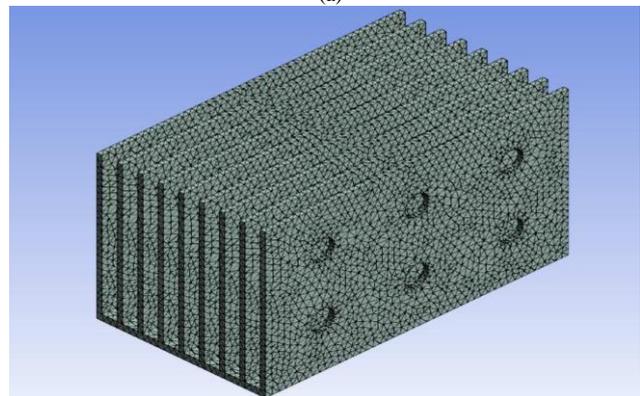
C. Boundary Conditions

Setelah pembuatan domain fluida dan *meshing*, dilakukan penentuan *boundary conditions*, yaitu penentuan kondisi dan *flow* yang terjadi pada model yang akan disimulasikan. Pada Gambar 5 dapat dilihat *boundary condition* pada domain fluida tampak keseluruhan.

Tabel 2 merupakan parameter *boundary conditions* beserta material yang digunakan. Pada *constant heat generation* diberikan input nilai sebesar 232.28 MW/m³.



(a)



(b)

Gambar 4. Hasil mesh (a) *regular fins* (b) *perforated fins*.

Selain itu properti material dari *boundary conditions* yang digunakan pada penelitian ini, dapat dilihat pada Tabel 3.

D. Variasi Penelitian

Pada penelitian ini, dilakukan variasi penelitian yang bertujuan untuk membandingkan dan memperluas faktor-faktor yang mempengaruhi hasil penelitian. Variasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah variasi jumlah lubang dan variasi kecepatan udara pada *inlet*. Variasi lubang yang akan digunakan pada penelitian ini adalah sebanyak 6, 10, dan 14 lubang dengan diameter lubang konstan sebesar 7 mm. Sedangkan kecepatan *inlet* divariasikan 1; 1.5; 2; 2.5; 3 m/s.

E. Grid Independency Test (GIT)

Pada Gambar 6 tampak grafik hasil GIT, dimana simulasi akan dilanjutkan dengan jumlah elemen *mesh* sebesar 2.81×10^6 untuk model *regular fins* dan jumlah elemen *mesh* sebesar 2.80×10^6 untuk model *perforated fins*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Pengaruh Geometri Fin

Simulasi dilakukan pada geometri *regular* dan *perforated fin heatsink* dengan kecepatan fluida pada *inlet* sebesar 2 m/s. Data diambil dari bidang ZX pada ketinggian 42 mm dari dasar *heatsink* dan pada sepanjang bidang XY, diberikan pada Gambar 7.

1) Pola Aliran Udara

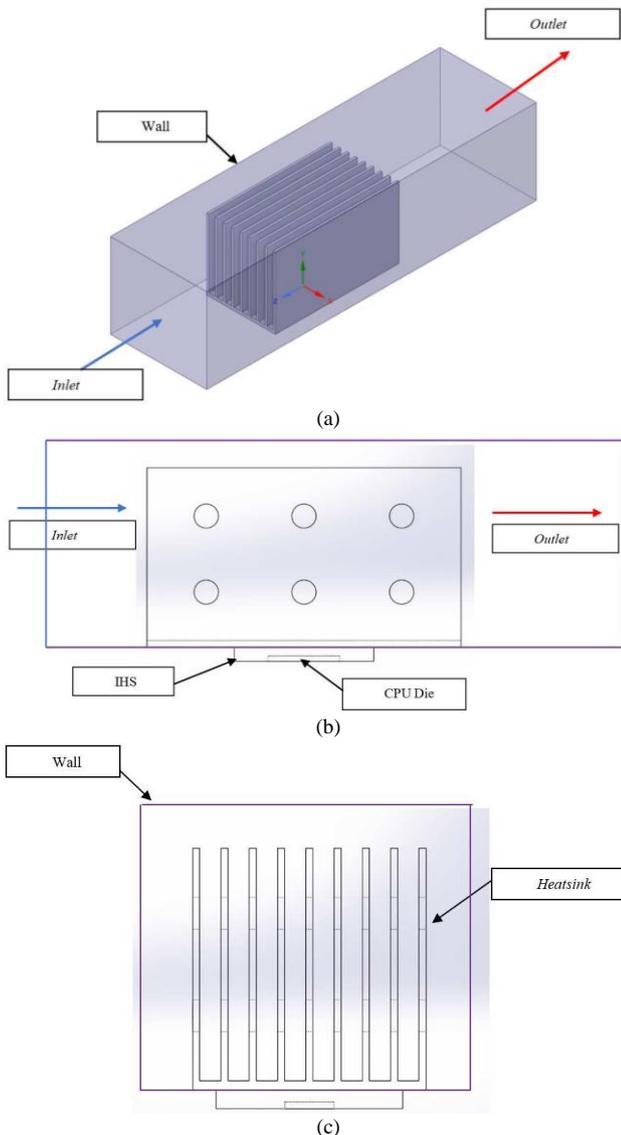
Berdasarkan Gambar 8 (a), kecepatan aliran udara awal terlihat berwarna hijau dan berubah menjadi kuning, oranye, dan merah. Dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 8 (b), kontur kecepatan berubah menjadi warna oranye dan merah mengindikasikan kecepatan aliran tertinggi berada di sisi kanan dan kiri dinding *boundary*. Hal ini terjadi dikarenakan

Tabel 3.
Boundary conditions simulasi

Boundary	Condition	Material
Inlet	Velocity Inlet	-
Outlet	Pressure Outlet	-
Fluid Domain	Wall	Air
CPU Die	Constant Heat Generation	Silicon
IHS CPU	Couple System	Copper
Heatsink	Couple System	Aluminium

Tabel 2.
Properti material boundary conditions

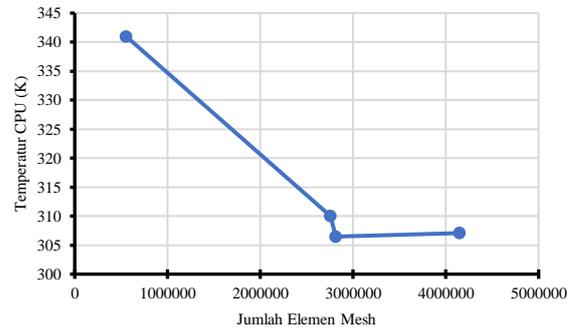
Material	Density (kg/m ³)	Specific Heat (J/kg K)	Thermal Conductivity (W/m K)
Air	1.225	1006.43	0.0242
Aluminium	2719	871	202.4
Copper	8978	381	387.6
Silicon	2330	703.3824	149



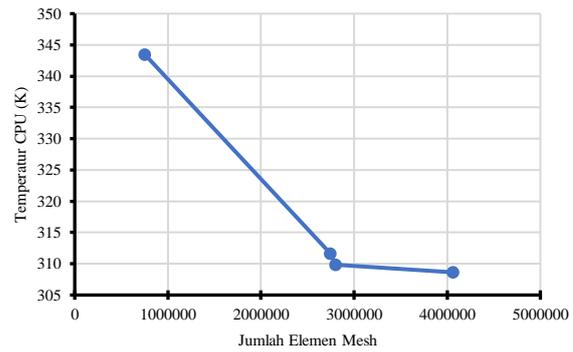
Gambar 7. Boundary conditions pada heatsink (a) tampak keseluruhan, (b) tampak samping, (c) tampak depan.

aliran menabrak sisi luar *fin* dan dinding *boundary*, sehingga kecepatan aliran meningkat. Pada saat aliran masuk ke celah *fin*, terdapat peningkatan kecepatan juga yang ditandai dengan warna kuning. Sedangkan kecepatan aliran menurun pada saat aliran menuju *outlet*, yang dapat dilihat di ujung-ujung *fin* yang ditunjukkan oleh warna biru dan di sepanjang outlet yang ditunjukkan oleh warna hijau.

Pada Gambar 9, di awal masuk celah *fin* terjadi peningkatan kecepatan yang ditandai dengan kontur berwarna kuning. Namun, terjadi penurunan kecepatan pada saat aliran melewati lubang yang terdapat di celah *fin* yang ditunjukkan oleh warna biru. Hal ini disebabkan karena aliran terjebak di lubang-lubang di sepanjang celah *fin*, sehingga aliran melambat. Namun, kecepatan aliran di luar celah

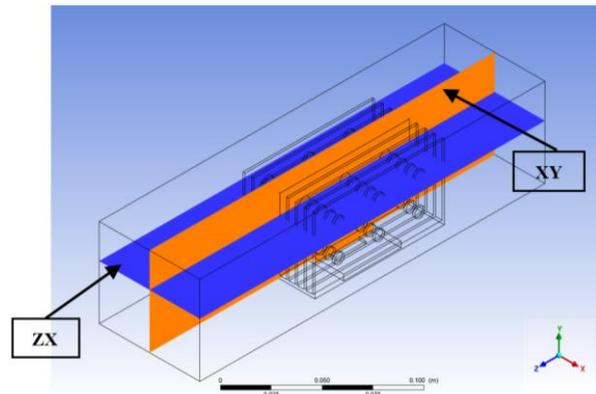


(a)



(b)

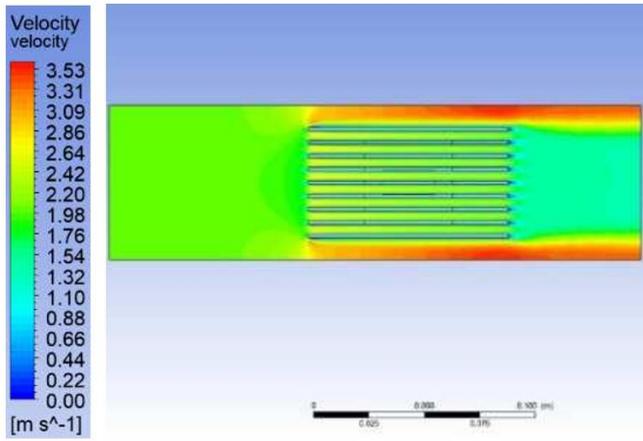
Gambar 5. Hasil GIT (a) regular *fin* dan (b) perforated *fin*.



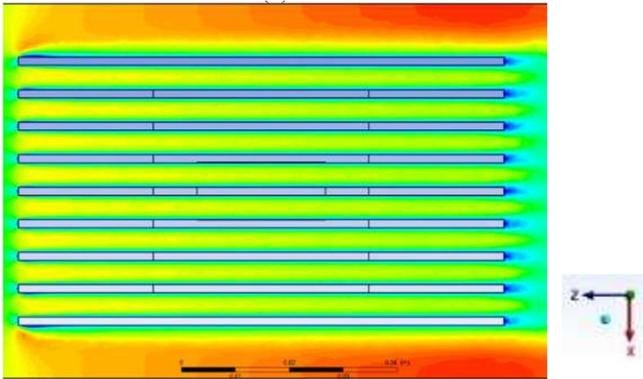
Gambar 6. Posisi pengambilan data.

menunjukkan sebaliknya, karena aliran tidak melewati lubang-lubang, maka kecepatan aliran maksimum terjadi di luar celah dan di sisi dinding yang ditunjukkan oleh warna merah dan oranye.

Pada Gambar 10 ditunjukkan pola aliran yang terjadi pada model *perforated fin*. Dapat dilihat bahwa terjadi separasi aliran yang ditunjukkan oleh *separation zone*, yang menandakan aliran masuk ke lubang dan terlepasnya *boundary layer* dari permukaan menjadi *wake*. Pada *mixing zone*, aliran udara mengalir ke ujung lubang dan kembali ke aliran udara utama, menyebabkan peningkatan aliran turbulen. Aliran turbulen inilah yang menyebabkan pendinginan menjadi lebih cepat. Selain itu terdapat



(a)



(b)

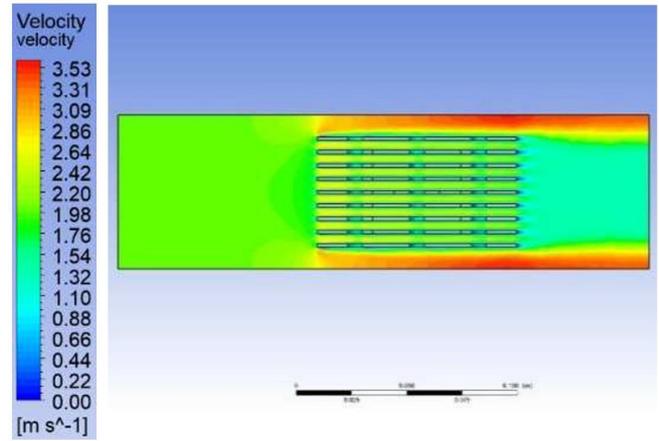
Gambar 9. Kontur kecepatan regular *fin* (a) tampak keseluruhan, (b) aliran pada *fins*.

reattachment flow, dimana aliran menempel kembali ke permukaan *fin* dan ke aliran utama setelah melewati lubang. Gambar 10 (b), (c), dan (d) menunjukkan pola aliran yang terjadi pada lubang *perforated fin* pada semua model *perforated fin*. Dapat diamati bahwa, *separation zone* membesar seiring dengan bertambahnya lubang. Fenomena ini terjadi karena jarak antar sirip yang semakin pendek karena bertambahnya lubang, menimbulkan turbulensi lebih banyak daripada jarak antar sirip yang panjang, sehingga *separation zone* semakin besar.

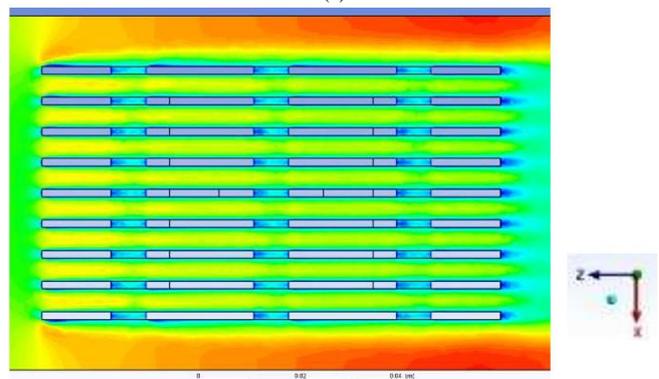
2) *Distribusi Temperatur Heatsink*

Kontur distribusi temperatur *heatsink*, IHS (*Integrated Heat Spreader*), dan CPU pada model regular dan *perforated fin*, ditampilkan oleh Gambar 11 di bidang XY dengan kecepatan aliran udara konstan 2 m/s serta *heat generation* berdasarkan TDP dari CPU Intel i9-12900KS sebesar 150W. Distribusi temperatur pada kedua model dapat dilihat dengan skala disamping gambar, dimana warna merah tua mengindikasikan temperatur paling tinggi dan warna biru mengindikasikan temperatur paling rendah.

Pada Gambar 11 (a), dapat dilihat kontur berwarna oranye dan kuning pada CPU yang menandakan temperatur tertinggi berada pada CPU, dan menjadi hijau seiring menuju ujung *fin* yang mengindikasikan terjadi distribusi temperatur dari CPU ke *fin*. Rata-rata temperatur pada CPU adalah sebesar 66.53°C, sedangkan temperatur maksimal pada CPU sebesar 69.07°C. Gambar 11 (b) menunjukkan kontur berwarna kuning yang mengindikasikan temperatur tertinggi terjadi di CPU, menuju sirip, kontur menjadi berwarna hijau dan di ujung sirip kontur menjadi berwarna biru yang mengindikasikan temperatur paling rendah terjadi di ujung



(a)



(b)

Gambar 8. Kontur kecepatan perforated *fin* (a) tampak keseluruhan, (b) aliran pada *fins*.

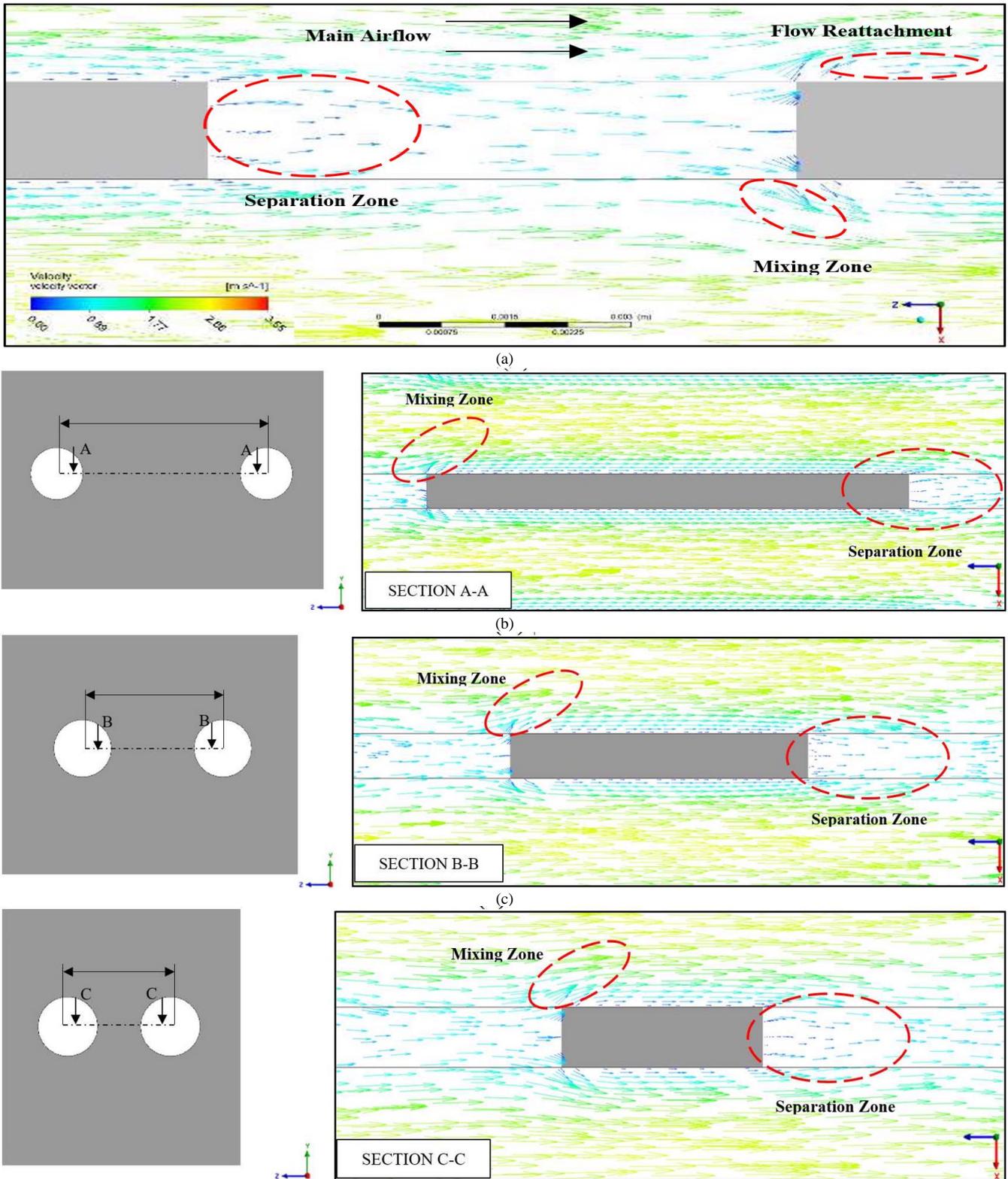
sirip. Rata-rata temperatur pada CPU adalah sebesar 61.23°C, sedangkan temperatur maksimal pada CPU sebesar 63.22°C.

Dilakukan pengambilan nilai temperatur pada *fin* di titik-titik yang diilustrasikan seperti pada Gambar 12. Titik T₁ berada di dasar *fin*, titik T₂ berada di tengah sirip, titik T₃ berada pada ujung *fin*. Nilai temperatur diambil untuk mengetahui distribusi temperatur *heatsink* dari dasar *heatsink* hingga ujung *fin*. Grafik pada Gambar 13 menunjukkan nilai-nilai temperatur yang diambil pada lokasi yang sudah ditentukan.

Distribusi temperatur pada *perforated fin* lebih baik daripada *regular fin* terbukti dari grafik dari Gambar 13. Dimana pada titik T₃, *perforated fin* dengan 6 lubang memiliki temperatur yang lebih rendah daripada *regular fin*. Fenomena ini terjadi karena lubang menyebabkan aliran menjadi turbulen sehingga panas lebih cepat terdisipasi, yang mengakibatkan perpindahan panas menjadi lebih cepat.

B. Analisis Pengaruh Jumlah Lubang terhadap Temperatur CPU

Pendinginan terjadi pada CPU disebabkan oleh *heatsink* yang dilewati oleh udara yang mengalir. Kecepatan *inlet* ditetapkan konstan sebesar 2 m/s. Dua *heatsink* dengan dua model *fin* yang berbeda yaitu regular dan *perforated* digunakan dalam penelitian ini. Model *perforated fin* divariasikan jumlah lubangnya dari 6 lubang, 10 lubang dan 14 lubang dengan diameter konstan sebesar 7 mm. Kontur temperatur CPU diamati pada bidang XY untuk mengetahui pengaruh jumlah lubang terhadap temperatur CPU. Kontur temperatur dari hasil simulasi model *heatsink* dapat dilihat pada Gambar 14.



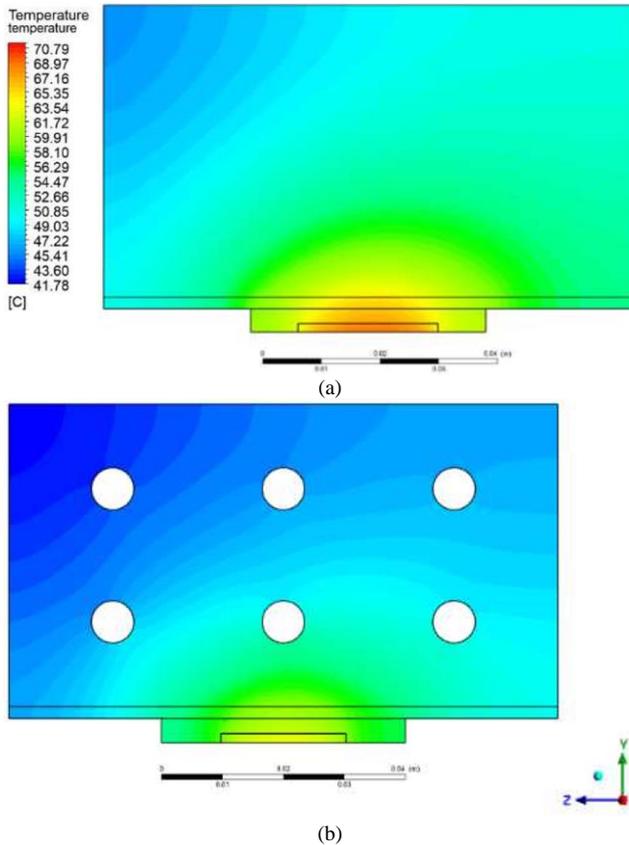
Gambar 10. Pola aliran (a) lubang, (b) 6 perforated fin, (c) 10 perforated fin, (d) 14 perforated fin pada model perforated fin dengan kecepatan inlet 2 m/s.

Dari hasil simulasi, kontur yang didapatkan cenderung berwarna merah pada bagian CPU dan perlahan menjadi biru menuju ujung sirip. Dapat dilihat pada Gambar 14 (a) kontur temperatur pada regular fin berwarna hijau biru dengan sedikit oranye pada CPU, hal ini menunjukkan terjadi distribusi temperatur dari CPU ke fins, dan temperatur tertinggi berada pada CPU. Namun pada saat menggunakan perforated fin heatsink, warna kontur temperatur berubah menjadi biru pada fin dan warna kuning hijau pada CPU, yang dapat dilihat pada Gambar 14 (b) dan (c). Fenomena ini

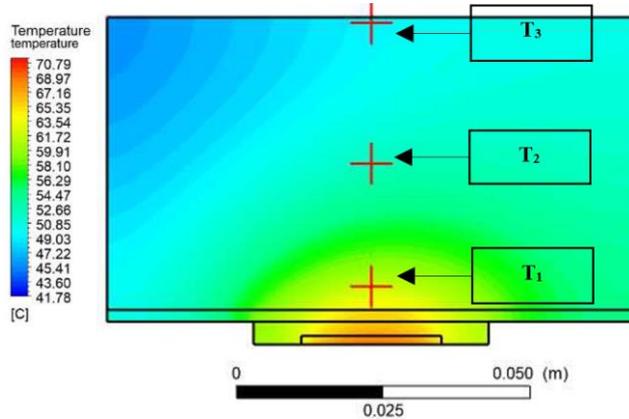
terjadi karena dengan menambahkan lubang pada fin, maka aliran menjadi lebih turbulen di sepanjang celah fin, sehingga laju perpindahan panas meningkat dan temperatur menurun. Temperatur maksimum berdasarkan jumlah lubang diberikan pada Tabel 4. Tetapi, laju perpindahan panas menurun seiring dengan meningkatnya jumlah lubang pada perforated fin. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 14 (d) yaitu pada 14 perforated fins, dimana temperatur CPU justru meningkat dikarenakan penambahan jumlah lubang yang dominan dapat

Tabel 4.
Temperatur maksimum berdasarkan jumlah lubang

Model	Maximum Temperature (°C)
Regular Fin	69.07
Perforated Fin N = 6	63.58
Perforated Fin N = 10	64.11
Perforated Fin N = 14	71.43



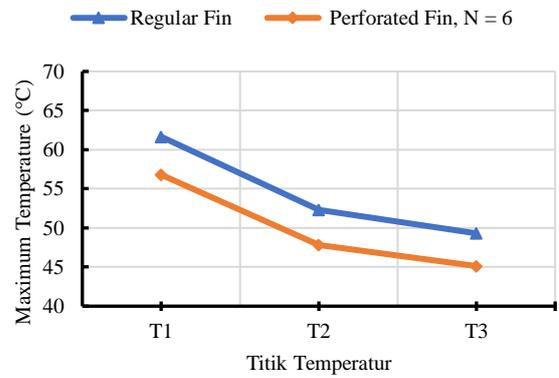
Gambar 11. Kontur distribusi temperatur (a) *regular fin* dan (b) *perforated fin*.



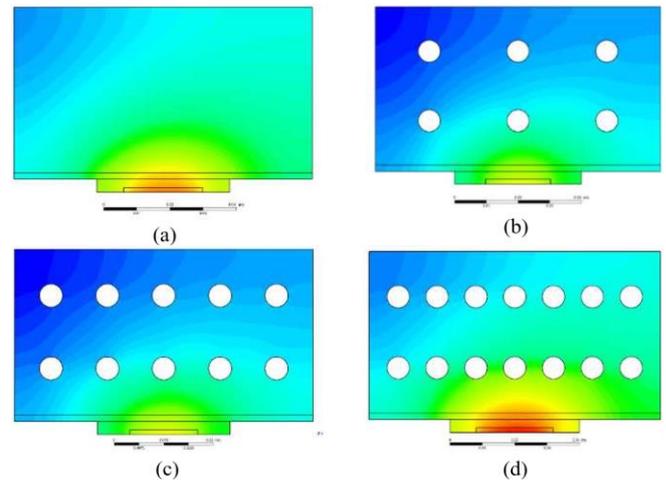
Gambar 12. Lokasi titik temperatur pada *fin*s.

menyebabkan area perpindahan panas berkurang. Hal ini terjadi karena meskipun lubang dapat membuat aliran menjadi turbulen di sepanjang celah *fin*, jumlah lubang yang terlalu banyak dapat menyebabkan luas area perpindahan panas berkurang sehingga laju perpindahan panas menurun.

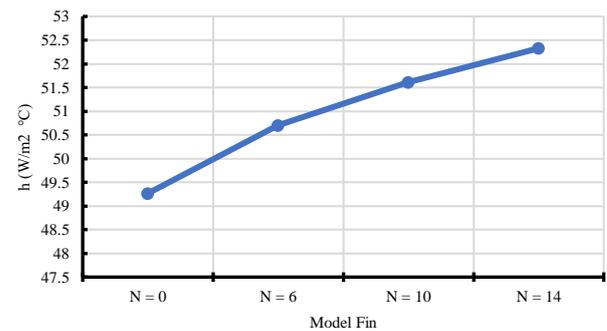
Koefisien konveksi adalah parameter yang menjelaskan peristiwa perpindahan panas antara permukaan solid dan fluida yang mengalir. Pada Gambar 15, dapat dilihat grafik koefisien konveksi pada setiap model *fin* dengan kecepatan 2 m/s. *Trendline* dari grafik diatas cenderung keatas yang menunjukkan meningkatnya nilai koefisien konveksi atau *h*



Gambar 13. Grafik distribusi temperatur.



Gambar 14. Kontur ditribusi temperatur model (a) *regular fins*, (b) 6 *perforated fins*, (c) 10 *perforated fins*, (d) 14 *perforated fins*.

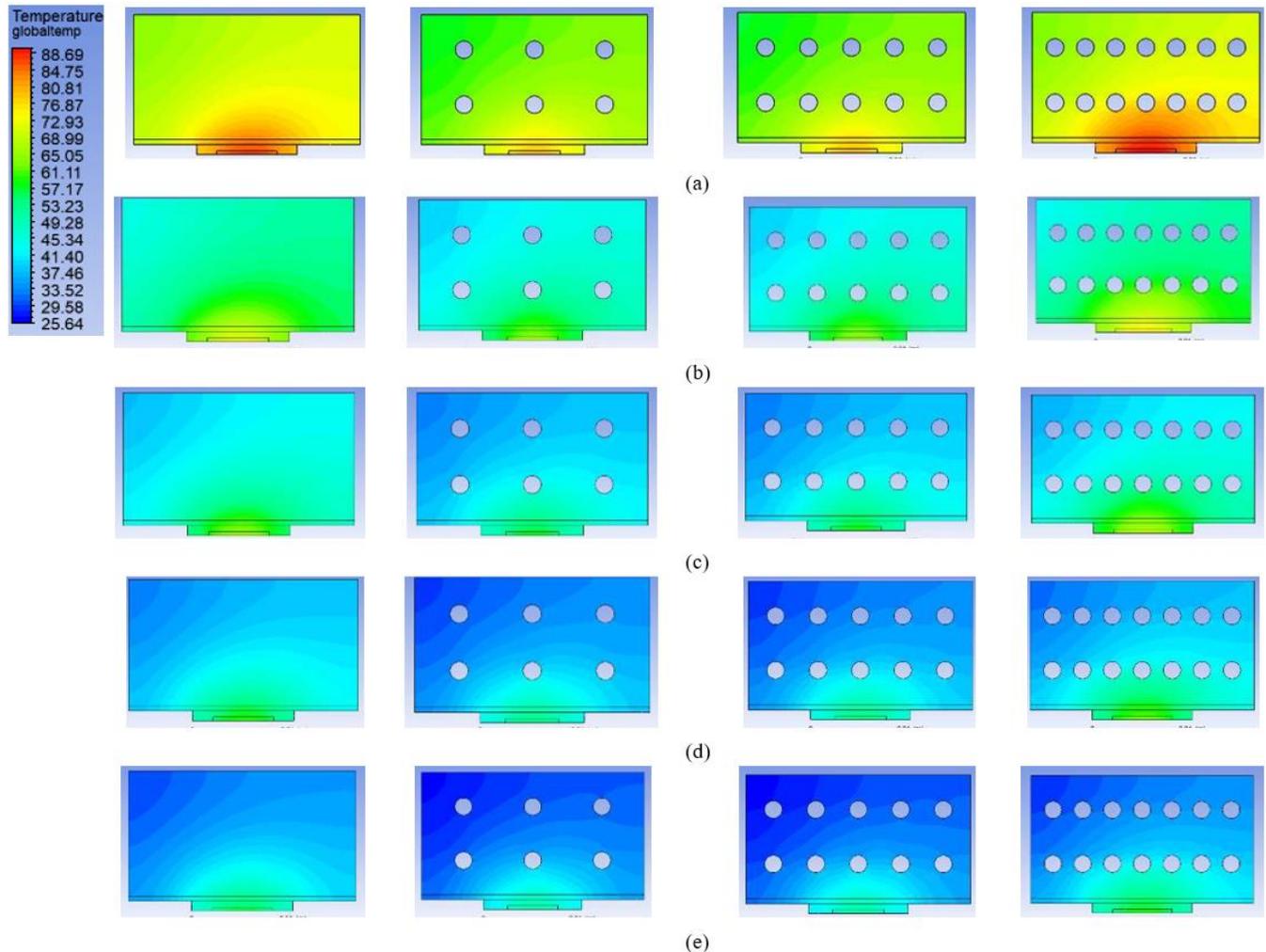


Gambar 15. Grafik pengaruh jumlah lubang terhadap koefisien konveksi.

seiring dengan bertambahnya jumlah lubang. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya luas area perpindahan panas secara konveksi. Nilai *h* terendah dimiliki oleh *heatsink regular fin* yaitu sebesar 49.62 W/m² K, sedangkan nilai *h* tertinggi dimiliki oleh *heatsink perforated fin* dengan 14 lubang yaitu sebesar 52.32 W/m² K.

C. Analisis Pengaruh Kecepatan Inlet terhadap Temperatur CPU

Simulasi dilakukan dengan menggunakan dua model *fin* yaitu *regular fin* dan *perforated fin*. Untuk mengetahui pengaruh kecepatan aliran terhadap pendinginan CPU, variasi kecepatan *inlet* konstan yang digunakan adalah 1 m/s, 1.5 m/s, 2 m/s, 2.5 m/s dan 3 m/s. Hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 16 (a) untuk kecepatan 1 m/s, Gambar 16 (b) untuk kecepatan 1.5 m/s, Gambar 16 (c) untuk kecepatan 2 m/s, Gambar 16 (d) untuk kecepatan 2.5 m/s, dan Gambar 16



Gambar 16. Perbandingan kontur temperatur *fin* dengan variasi kecepatan *inlet* (a) 1 m/s, (b) 1.5 m/s, (c) 2 m/s, (d) 2.5 m/s, (e) 3 m/s pada berbagai model *heatsink*.

(e) untuk kecepatan 3 m/s. Dari Gambar 16 secara keseluruhan, penurunan temperatur terjadi seiring dengan meningkatnya kecepatan inlet. Hal ini dapat dilihat dari kontur temperatur pada regular *fins* berubah dari warna hijau kuning pada kecepatan 1 m/s, menjadi berwarna biru pada kecepatan 3 m/s. Temperatur maksimum regular *fin* pada kecepatan *inlet* 1 m/s adalah sebesar 88.08°C, dan pada kecepatan *inlet* 3 m/s adalah sebesar 62.25°C.

Hal yang sama juga terjadi untuk *perforated fin*, dimana pada saat kecepatan *inlet* bertambah, maka temperatur juga semakin menurun. Dapat dilihat pada Gambar 16, kontur temperatur pada CPU berubah dari warna merah menjadi berwarna hijau biru, yang mengindikasikan terjadi penurunan temperatur pada CPU. Temperatur maksimum *perforated fin* 6 lubang pada kecepatan *inlet* 1 m/s adalah sebesar 79.67°C, dan pada kecepatan *inlet* 3 m/s adalah sebesar 57.77°C. Warna kontur temperatur *perforated fins* 10 lubang dan 14 lubang temperatur pada *fin* dan CPU terlihat berubah di setiap kenaikan kecepatan *inlet*. Hal ini menandakan, semakin cepat aliran udara pada *inlet*, maka temperatur pada *fin* dan CPU juga semakin menurun. Temperatur maksimum *perforated fin* 10 lubang pada kecepatan *inlet* 1 m/s adalah sebesar 80.33°C, dan pada kecepatan *inlet* 3 m/s adalah sebesar 58.23°C. Sedangkan temperatur maksimum *perforated fin* 14 lubang pada kecepatan *inlet* 1 m/s adalah sebesar 90.97°C, dan pada kecepatan *inlet* 3 m/s adalah sebesar 64.3°C.

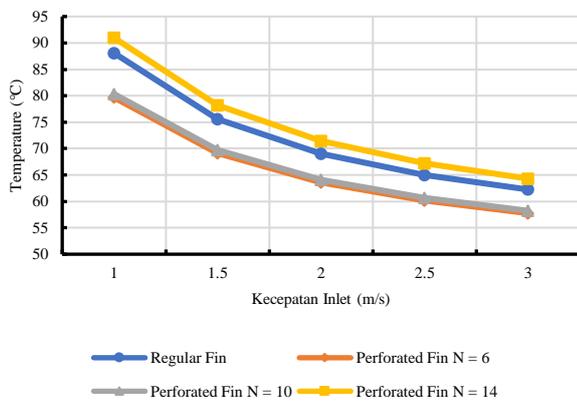
Melalui grafik pada Gambar 17, dari simulasi yang telah dilakukan, diketahui nilai-nilai temperatur maksimum yang

terdapat pada setiap model *fins*, dengan nilai temperatur maksimum tertinggi terjadi pada *perforated fin* dengan 14 lubang. Sedangkan nilai temperatur maksimum terendah diraih oleh model *perforated fin* dengan 6 lubang. Dapat dilihat juga bahwa nilai temperatur *perforated fin* dengan 10 lubang lebih tinggi daripada *perforated fin* dengan 6 lubang, meskipun perbedaan nilai tidak begitu signifikan.

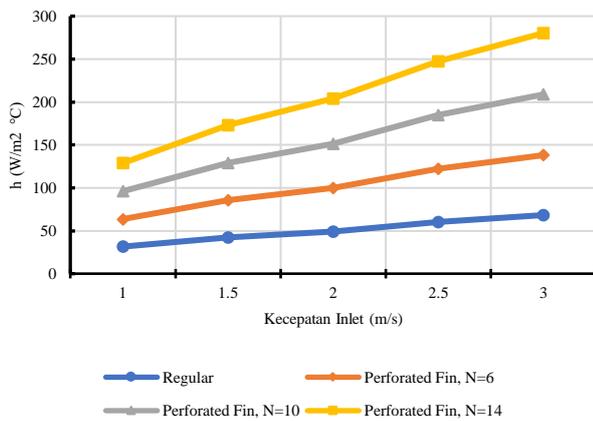
Koefisien konveksi bergantung terhadap beberapa faktor, seperti kecepatan fluida yang mengalir. Nilai koefisien konveksi berbanding lurus dengan kecepatan fluida, sehingga koefisien konveksi meningkat apabila kecepatan fluida juga meningkat. Adapun grafik nilai koefisien konveksi *h* pada setiap kecepatan *inlet* yang ditunjukkan oleh Gambar 18. Dapat dilihat dari grafik diatas, meningkatnya kecepatan *inlet* menyebabkan nilai koefisien konveksi juga semakin besar. Peningkatan kecepatan pada *inlet* menyebabkan aliran menjadi lebih turbulen dan terciptanya arus balik atau *eddy*, sehingga nilai koefisien konveksi juga semakin meningkat.

VII. KESIMPULAN/RINGKASAN

Berdasarkan hasil simulasi pengaruh *perforated fin* terhadap distribusi temperatur *heatsink* dan pendinginan CPU, didapatkan kesimpulan sebagai berikut: (1) Berdasarkan hasil simulasi, *perforated fin* memiliki distribusi temperatur yang lebih baik daripada regular *fin*. Distribusi temperatur paling baik terjadi pada *perforated fin* dengan 10 lubang. Lubang menyebabkan aliran pada *fin* menjadi



Gambar 17. Grafik temperatur terhadap variasi kecepatan inlet.



Gambar 18. Grafik koefisien konveksi terhadap kecepatan inlet.

turbulen, sehingga panas terdisipasi lebih cepat yang menyebabkan distribusi panas juga menjadi lebih baik. (2) Dengan kecepatan inlet konstan 2 m/s, temperatur CPU pada heatsink dengan model perforated fins 6 lubang dan 10 lubang lebih rendah daripada heatsink dengan model regular fins. Namun, hal sebaliknya terjadi pada model perforated fin

14 lubang, dimana perforated fin 14 lubang memiliki temperatur maksimal sebesar 71.43°C, lebih tinggi daripada model regular dan perforated lainnya. Fenomena ini terjadi karena meskipun lubang dapat membuat aliran menjadi turbulen di sepanjang celah fin, jumlah lubang yang terlalu banyak dapat menyebabkan luas area perpindahan panas berkurang sehingga laju perpindahan panas menurun. (3) Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan aliran udara pada inlet, maka temperatur CPU akan semakin menurun. Hal ini terjadi karena dengan peningkatan kecepatan aliran udara pada inlet, aliran udara akan semakin turbulen, sehingga disipasi panas lebih cepat. Temperatur maksimum perforated fin 6 lubang pada kecepatan inlet 1 m/s adalah sebesar 79.67°C, dan pada kecepatan inlet 3 m/s adalah sebesar 57.77°C. Sehingga dengan peningkatan kecepatan udara pada inlet berpengaruh pada penurunan temperatur CPU.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Epicoco, "Knowledge patterns and sources of leadership: Mapping the semiconductor miniaturization trajectory," *Res. Policy*, vol. 42, no. 1, pp. 180–195, 2013, doi: 10.1016/j.respol.2012.06.009.
- [2] H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann, "Industry 4.0," *Bus. Inf. Syst. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 239–242, 2014, doi: 10.1007/s12599-014-0334-4.
- [3] S. Wiriyasart, C. Hommalee, and P. Naphon, "Thermal cooling enhancement of dual processors computer with thermoelectric air cooler module," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 14, p. 100445, 2019, doi: 10.1016/j.csite.2019.100445.
- [4] M. R. Shaeri, M. Yaghoubi, and K. Jafarpur, "Heat transfer analysis of lateral perforated fin heat sinks," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 2019–2029, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2008.12.029.
- [5] T. K. Ibrahim et al., "Experimental study on the effect of perforations shapes on vertical heated fins performance under forced convection heat transfer," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 118, pp. 832–846, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.047.
- [6] T. K. Ibrahim et al., "Experimental and numerical investigation of heat transfer augmentation in heat sinks using perforation technique," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 160, p. 113974, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113974.