

INVESTIGASI MODEL NUMERIK PADA SIMULASI HEAT SINK SIRIP LURUS DENGAN MEMVARIASIKAN JUMLAH GRID, MODEL VISCOUS DAN METODE PEMECAHAN DENGAN PENDINGINAN KONVEKSI BEBAS

Muhamad Safi'i^{1*}, Nazaruddin Sinaga², Tabah Priangkoso³, Susanto⁴, Aji Digooyo⁵

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer,
Universitas Sains Al Qur'an Wonosobo.

Jl. KH. Hasyim Asy'ari Km. 03 Kalibeber, Kec. Mojotengah, Kab. Wonosobo 56351.

²Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Semarang.

Jl. Prof. Soedarto, S.H, Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah, 50275.

³Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Wahid Hasyim, Semarang.

Jl. Menoreh Tengah X/22, Sampangan, Semarang 50236.

⁴Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Politeknik Maritim Negeri Indonesia, Semarang.

Jl. Pawiyatan Luhur I, Bendan Duwur, Gajahmungkur, Kota Semarang, Jawa Tengah 50233.

⁵Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi, Universitas Jayabaya, Jakarta.

Jl. Jl. Pulomas Selatan Kav. No.23 4, RT.4/RW.9, Kayu Putih, Kec. Pulo Gadung, Kota Jakarta Timur, Jakarta 13210

*Email: muhamadsafii17@unsiq.ac.id.

Abstrak

Heat sink merupakan alat penyerap kalor yang banyak digunakan untuk mendinginkan komponen-komponen elektronika. Saat ini metode numerik menjadi salah satu opsi untuk menyelesaikan masalah perpindahan kalor karena memiliki keuntungan yaitu lebih cepat, murah, dan mudah. Riset ini bertujuan untuk mencari model simulasi terbaik pada straight fin heat sink (SFHS) yang diharapkan memiliki laju pendinginan yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang lainnya yang banyak dijumpai dalam praktek. Dalam penelitian ini telah dilakukan perhitungan numerik dengan variabel geometri $L_{ch}=150$ mm, $W_{hs}=75$ mm, $W_{fin}=3$ mm, $W_{ch}=9$ mm, $H=50$ mm, dan $P_{fin}=2,7$ mm yang mengalami perpindahan kalor konveksi bebas. Parameter yang divariasikan dalam riset ini adalah jumlah grid, model viscous, dan metode pemecahan persamaan, dan arah gravitasi udara. Perhitungan dilakukan dengan metode volume hingga dengan menggunakan program aplikasi numerik Ansys Fluent. Hasil simulasi menunjukkan bahwa laju pendinginan SFHS dapat ditingkatkan dengan menggunakan variasi jumlah grid sebesar 931.900 dengan model viscous k- ϵ Realizable dan metode pemecahan coupled. Terbukti bahwa metode tersebut menghasilkan penurunan temperatur dengan peningkatan nilai koefisien perpindahan panas. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa model simulasi yang didapatkan ini dapat digunakan untuk melakukan perhitungan-perhitungan numerik selanjutnya.

Kata kunci: Grid, heat sink, fin, SFHS, Sudut oblique, viscous.

PENDAHULUAN

Perkembangan pesat pada sistem elektronik, pendinginan menjadi perhatian utama untuk meningkatkan performa sistem elektronik (F. Han dkk., 2021). Sehingga, diperlukan teknik pendinginan yang efektif dan efisien untuk menghilangkan beban panas, meningkatkan perpindahan panas, dan meminimalkan penurunan tekanan pada sistem elektronik yang baik berupa *heat sink*. *Heat sink* berguna menjaga kinerja perangkat elektronik di semua kondisi dan sebagai teknologi pendingin yang efektif dan inovatif (A. M. A. Mageeth dkk., 2019, D. Kong et al, 2021, M. Ghaneifar dkk., 2020, M. R. Attar dkk., 2020). *Heat sink*

digunakan untuk mendinginkan perangkat elektronik seperti CPU komputer, lampu LED, dll (A. Moradikazarouni dkk., 2019, M. Pan dkk., 2021).

Heat sink tanpa kipas lebih disukai karena ukuran ringkas, tanpa suara, dan kebutuhan banyak daya (H. Zu dkk., 2021, A. Abbas, 2020). Dalam keadaan ini, konveksi dan radiasi adalah cara untuk meningkatkan perpindahan panas pada *heat sink* menjadi lebih baik karena dapat meningkatkan perpindahan panas radiasi (H. Hasan, 2021). Berbagai penelitian sudah banyak dilakukan baik secara eksperimen maupun numerik tentang perpindahan panas pada *heat sink* dengan tujuan mengetahui peningkatan

kinerja, performa, efisiensi, mengurangi suhu antar muka, dan tekanan berlebih pada *heat sink* (Y. Alihosseini dkk., 2021, J. G. Song dkk., 2021).

Berbagai macam desain dan konfigurasi *heat sink* dengan variasi bentuk *fin* seperti oval, *airfoil*, lingkaran, bentuk *fin* W, persegi panjang lurus, segi tiga, *oblique* diteliti untuk meningkatkan kinerja perpindahan panas, adanya induksi aliran di sekitar permukaan *fin* dan melakukan *inisialisasi* secara terus menerus lapisan batas termal dan hidraulik (D. Jung dkk., 2021, A. Rajalingam dan S. Chakraborty, 2021, H. Sait, 2022, Z. Soleymani dkk., 2020, M. Safi'I dkk., 2020). Bentuk *fin* meruncing (*rippling fin shape*) diselidiki untuk mengetahui karakteristik aliran dan kinerja termal pada *heat sink*, variasi tersebut menghasilkan penurunan temperatur permukaan *fin* hingga $18,35^{\circ}\text{K}$ dan menurunkan resistensi termal sebesar 9,81% (H. Nemati, 2020). Bentuk *fin* berupa *shape* yang dibengkokkan sebesar 90° diteliti dengan tujuan meningkatkan pusaran-pusaran *grid* turbulensi, hasilnya peningkatan perpindahan panas konvektif naik dengan persentase 57-60% (K. Zhang dkk., 2020).

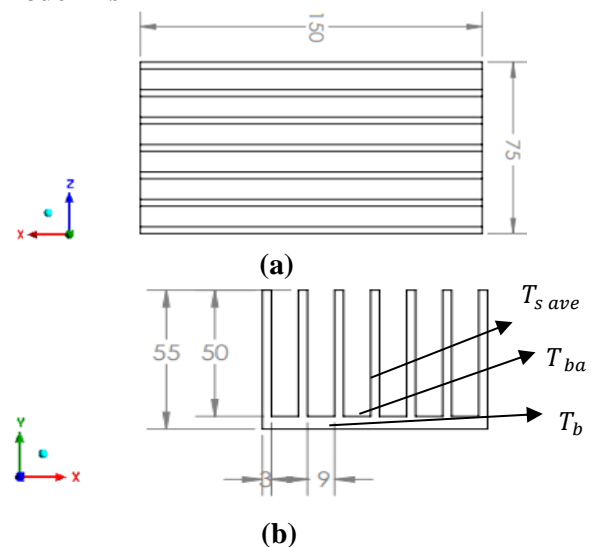
Bentuk *groove* pada permukaan bagian tengah *fin* di karakterisasi dengan memvariasikan *bubble* volume dan fluks panas yang masuk untuk meningkatkan perpindahan panas pada *heat sink*. Pengaruh geometri *groove* seperti lingkaran, persegi panjang, segitiga, dan belah ketupat yang divariasikan terhadap jarak dan tebal *fin* serta daya panas yang masuk dapat memberi keuntungan untuk meningkatkan area aliran dan mengurangi penurunan tekanan (S. Meganathan dkk., 2020). Dalam penelitian *heat sink* tidak hanya seputar eksperimental dan numerik, tetapi juga dilakukan optimasi. Optimasi dapat dijadikan acuan untuk perancangan pada MCHS dengan menggunakan program komputer COMSOL. Variasi panjang dan tinggi *fin* diteliti dengan tujuan mengetahui struktur konduksi panas pada *heat sink* (B. Kanargi dkk., 2020).

Optimasi dengan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) pada MATLAB dengan memasukkan algoritma berupa variasi jumlah, tebal, tinggi, dan jarak *fin* pada *heat sink* diteliti dengan tujuan untuk meningkatkan nilai entropi dari *heat sink* dengan hasil bahwa semakin tinggi, lebar, dan panjang *fin* pada *heat sink* maka kinerja *heat sink* akan lebih baik (I. EL Ghandouri, 2020). Penelitian sebelumnya

difokuskan pada aliran yang dikembangkan secara termal dan hidrodinamika terhadap variasi seperti tinggi *fin*, jumlah *fin*, jarak *fin*, bentuk *fin*, laju aliran massa, tekanan, dan daya pemanas dan lain sebagainya. Selain itu, tidak ada studi numerik tentang pengaruh variasi jumlah *grid*, model *viscous*, dan *methods* saat simulasi pada *straight fin heat sink* terhadap aliran fluida dan perpindahan panas pada *heat sink*. Untuk itu maka akan dilakukan penelitian guna mempelajari pengaruh tersebut pada geometri SFHS yang bertujuan untuk mengetahui performa termal dan hidrolis yang baik secara numerik menggunakan program *Computational Fluid Dynamics*.

METODE PENELITIAN

Model Fisik



Gambar 1: (a) Tampak Atas dan (b) Tampak Depan SFHS.

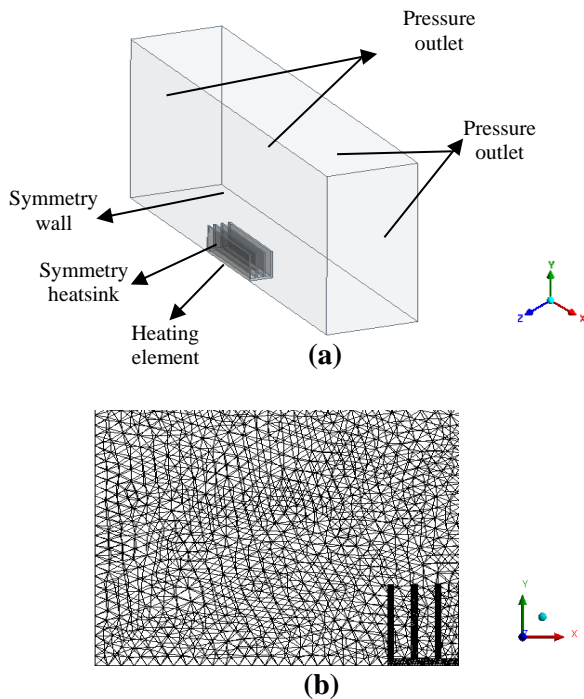
Gambar 1 (a) dan (b) merupakan tampilan atas dan depan pada SFHS beserta ukuran dan pengambilan data pada garis (T_b), (T_{ba}), dan ($T_{s\ ave}$). Pembuatan geometri *heat sink* dilakukan menggunakan *software* gambar yang mengacu pada literatur (C. H. Huang dkk., 2022). Dalam penelitian ini desain SFHS terdiri atas susunan geometri seperti jumlah, jarak, dan ketebalan *fin*.

Desain SFHS

Desain yang kami usulkan pada riset ini adalah SFHS dengan jumlah *fin* 7 pcs variabel geometri SFHS dengan L_{ch} 150 mm, W_{hs} 75 mm, W_{fin} 3 mm, W_{ch} 9 mm, dan H 50 mm seperti yang dijelaskan oleh Gambar 1 (a) dan (b).

Domain Komputasi

Jaring komputasi yang digunakan dalam simulasi ditunjukkan pada Gambar 2 (b) sebuah teknik berbasis volume kontrol digunakan untuk mendiskritkan persamaan yang mengatur skema *second order upwind* digunakan untuk akurasi yang tinggi. Domain komputasi dilakukan diskritisasi dengan *grid tetrahedral* terstruktur penuh dan resolusi tinggi didaerah dekat dinding untuk menangkap efek lapisan batas termal dan hidrolis lebih akurat. Domain komputasi ditetapkan dengan ukuran 700 mm x 330 mm x 300 mm. Penentuan dinding pada kondisi batas dapat dilihat pada Gambar 2 (a) analisis numerik aliran fase tunggal melalui *fin* berbentuk *straight* dilakukan dengan keadaan tunak.



Gambar 2. (a) Domain Komputasi (b) Struktur Grid Tetrahedral.

Persamaan kontinuitas, momentum dan energi untuk studi numerik pada SFHS dengan metode konveksi bebas ditunjukkan oleh:

Persamaan kontinuitas:

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

Dimana T_b adalah suhu *heat sink*, dan permukaan bawah *heat sink* mengalami fluks panas konstan.

Persamaan momentum:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \tag{2}$$

$$\rho \left(\frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \tag{3}$$

$$\rho \left(\frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g(\rho - \rho_\infty) \tag{4}$$

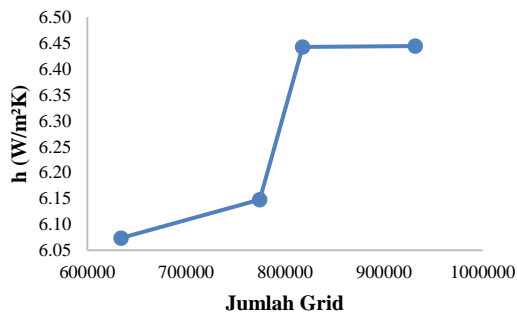
Persamaan energi:

$$\rho \left(\frac{\partial uT_a}{\partial x} + \frac{\partial vT_a}{\partial y} + \frac{\partial wT_a}{\partial z} \right) = -\frac{k}{C_p} + \mu \left(\frac{\partial^2 T_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_a}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_a}{\partial z^2} \right) \tag{5}$$

Uji Grid Independent

Uji *Grid Independent* dilakukan untuk menentukan titik optimum dari nilai percobaan berupa temperatur dasar SFHS (T_b), temperatur rata-rata bagian permukaan SFHS (T_{ba}) dihitung pada permukaan SFHS bagian dasar, sedangkan temperatur permukaan *fin* ($T_{s ave}$) dihitung pada semua permukaan *fin* SFHS. Uji *grid* dilakukan dengan mempertimbangkan jumlah *grid* pada domain komputasi antara 634360, 774320, 817800, dan 931900. Hasil uji *grid* disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 3 hubungan jumlah *grid* dan nilai koefisien perpindahan panas. Perhitungan pada studi numerik dalam uji *grid* menunjukkan kesalahan relatif antara *grid* 634360 dengan 774320 adalah $\pm 0,89\%$, 774320

dengan 817800 adalah $\pm 0,36\%$, sedangkan 817800 dengan 931900 adalah $\pm 0,02\%$.



Gambar 3. Hubungan Jumlah Grid Terhadap Koefisien Perpindahan Panas Pada SFHS.

Set up Simulasi

Rincian pemodelan domain komputasi ditampilkan pada Gambar 2 (a) yang dibuat dengan mempertimbangkan eksperimen (C. H. Huang et al, 2022). Gambar tersebut merupakan gambar keseluruhan geometri SFHS. Aliran udara yang terjadi pada riset ini diasumsikan dalam keadaan tunak, metode konveksi bebas pada studi numerik mengasumsikan sifat fisik termal konstan. Selain itu, perpindahan panas konveksi antar muka dan udara dipertimbangkan dalam SFHS. Kriteria konvergensi 10^{-4} untuk aliran, dan 10^{-7} untuk energi digunakan. Sifat udara bebas yang berperan sebagai pendingin pada studi numerik ini mempunyai properti material densitas $\rho = 1,2096 \text{ kg/m}^3$, spesifik kapasitas panas $C_p = 1005 \text{ J/kg.K}$, viskositas $\mu = 1,915 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$, konduktivitas termal $k = 0,0261 \text{ W/m.K}$, dan berat molekul $28,966 \text{ kg/kmol}$.

Temperatur lingkungan diasumsikan sebesar 25°C . Paduan *aluminium alloy 6061* digunakan untuk modul SFHS, dan konduktivitas termal diasumsikan $k = 168 \text{ (W/m.K)}$ dengan $Q = 50 \text{ W}$. Dinding tanpa selip ditentukan untuk permukaan sirip pada kondisi batas. Untuk mengkonfirmasi bahwa domain komputasi diselesaikan secara memadai dan ketidakpastian numerik kecil, maka dilakukan uji *grid independent* yang berguna untuk menyempurnakan secara bertahap ukuran *grid* sampai konvergensi yang dapat diterima dan tercapai untuk suhu *fin* maksimum, yang dirangkum dalam Gambar 3.

Reduksi Data Numerik

Kondisi operasi untuk simulasi SFHS mengacu pada arah aliran udara sekitar dan arah gravitasi pada *Software Computational Fluid Dynamics* didefinisikan sebagai berikut:

$$Ra_L = GR_L \cdot Pr = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (6)$$

Diameter hidraulik didefinisikan dengan persamaan:

$$D_h = \frac{4s.H}{2(H.s)} \quad (7)$$

Area permukaan SFHS dapat dihitung dengan persamaan:

$$A = (nLH) + (PL) \quad (8)$$

Area *base* SFHS dapat dihitung dengan persamaan:

$$A_b = 2(LP) \quad (9)$$

Resistensi termal dan koefisien perpindahan panas dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$R_{th} = \frac{T_{ave} - T_\infty}{Q} \quad (10)$$

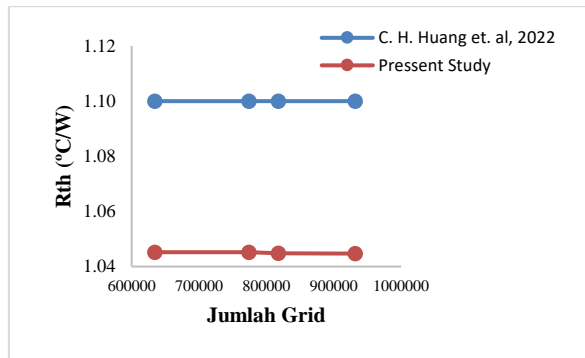
$$h = \frac{Q}{A_b(T_s \text{ ave} - T_\infty)} \quad (11)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian simulasi pada SFHS dengan variasi jumlah *grid*, model *viscous*, dan *methods* terhadap operasi kondisi gravitasi udara dengan metode konveksi bebas.

Validasi

Validasi dilakukan melalui pendekatan numerik terhadap eksperimen yang dilakukan literatur (C. H. Huang dkk., 2022) pada SFHS dengan metode konveksi bebas, parameter yang ingin dicari dalam penelitian ini adalah T_b , T_{ba} , $T_{s \text{ ave}}$ guna untuk menentukan nilai koefisien perpindahan panas dan tahanan termal SFHS yang baru diusulkan. Validasi dilakukan dengan variasi jumlah *grid* terhadap nilai tahanan termal dari SFHS.



Gambar 4. Hubungan Jumlah Grid Terhadap Hasil Simulasi Koefisien Tahanan Termal (R_{th}) Pada SFHS.

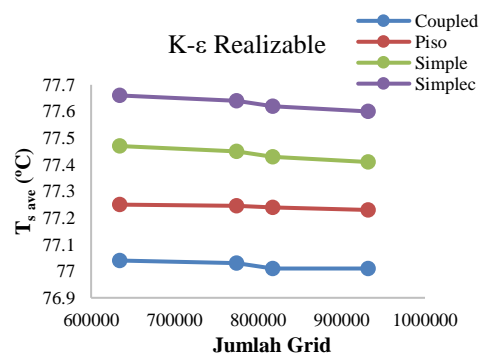
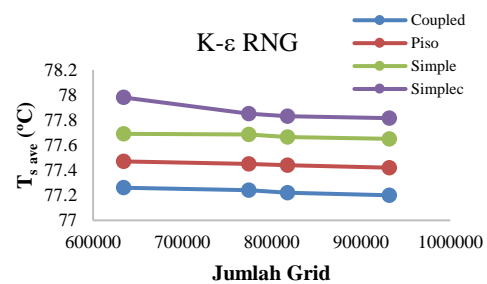
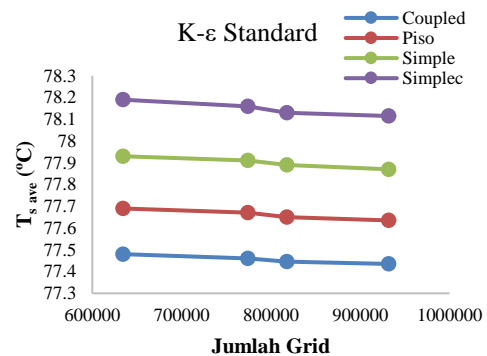
Hasil validasi disajikan dalam Gambar 4 hubungan antara jumlah *grid* terhadap tahanan termal *heat sink*. Pada grafik tersebut dapat dilihat hasil eksperimen yang dilakukan oleh literatur (C. H. Huang et al, 2022) pada *heat sink* tipe SFHS diperoleh nilai tahanan termal *heat sink* adalah $1,1^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Sedangkan perbandingan hasil simulasi konveksi bebas terhadap eksperimen dari literatur ditinjau dari nilai tahanan termal memiliki kesalahan relatif terbesar adalah 5,03% dengan nilai $1,044^{\circ}\text{C}/\text{W}$, sedangkan nilai kesalahan relatif terkecil adalah 4,98% dengan nilai resistensi termal $1,047^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Hasil tersebut menunjukkan adanya kesepakatan yang baik antara eksperimen (C. H. Huang et al, 2022) terhadap studi numerik yang sedang divalidasi.

Karakteristik Perpindahan Panas SFHS

Optimasi SFHS dengan variasi jumlah *grid*, model *viscous*, dan *methods* dilakukan untuk mencari desain yang paling optimal SFHS. Koefisien perpindahan panas mempunyai hubungan yang kuat terhadap fluks panas yang masuk untuk spesimen SFHS, kami menganggap fluks panas yang masuk adalah konstan. Pada eksperimen literatur (C. H. Huang et al, 2022) nilai koefisien perpindahan panas dihitung dengan berdasarkan nilai temperatur rata-rata pada *fin* dari semua permukaan SFHS.

Nilai temperatur permukaan SFHS diambil ketika *heat sink* dalam keadaan tunak, sehingga distribusi temperatur permukaan *fin* merata. Variasi jumlah *grid*, model *viscous*, dan *methods* juga memiliki gaya cukup kuat terhadap koefisien perpindahan panas. Pengaruh tersebut meningkat seiring diubahnya model *viscous* dan *methods* saat simulasi. Inisialisasi lapisan batas

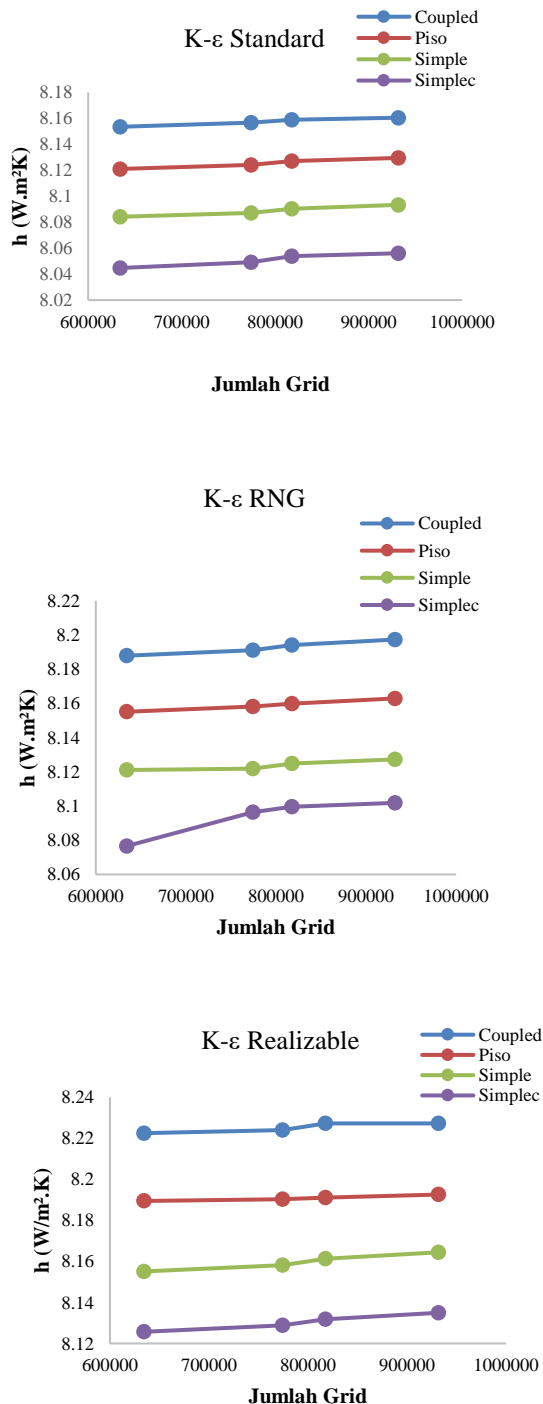
termal dan hidrolis yang sangat tipis di antara celah *fin*, walaupun dalam kondisi operasi dan mekanisme yang sama.



Gambar 5. Hubungan Jumlah Grid Terhadap Hasil Simulasi Temperatur Rata-rata Permukaan Sirip ($T_{s,ave}$) SFHS.

Gambar 5 adalah grafik hubungan antara jumlah *grid* terhadap hasil simulasi berupa temperatur rata-rata permukaan *fin* ($T_{s,ave}$) pada SFHS. Temperatur rata-rata permukaan sirip ($T_{s,ave}$) adalah nilai yang nantinya digunakan untuk menghitung nilai koefisien perpindahan panas. Pada SFHS dengan model *viscous* k- ϵ *Realizable* pada *methods coupled* nilai temperatur cenderung sama, nilai tersebut menjadi yang terbaik di antara model *viscous* dan *methods* lainnya ditinjau dari nilai temperatur rata-rata permukaan *fin* ($T_{s,ave}$) pada

SFHS, nilai berkisar $77,04^{\circ}\text{C}$ dan $77,01^{\circ}\text{C}$ pada variasi jumlah *grid* 931900.



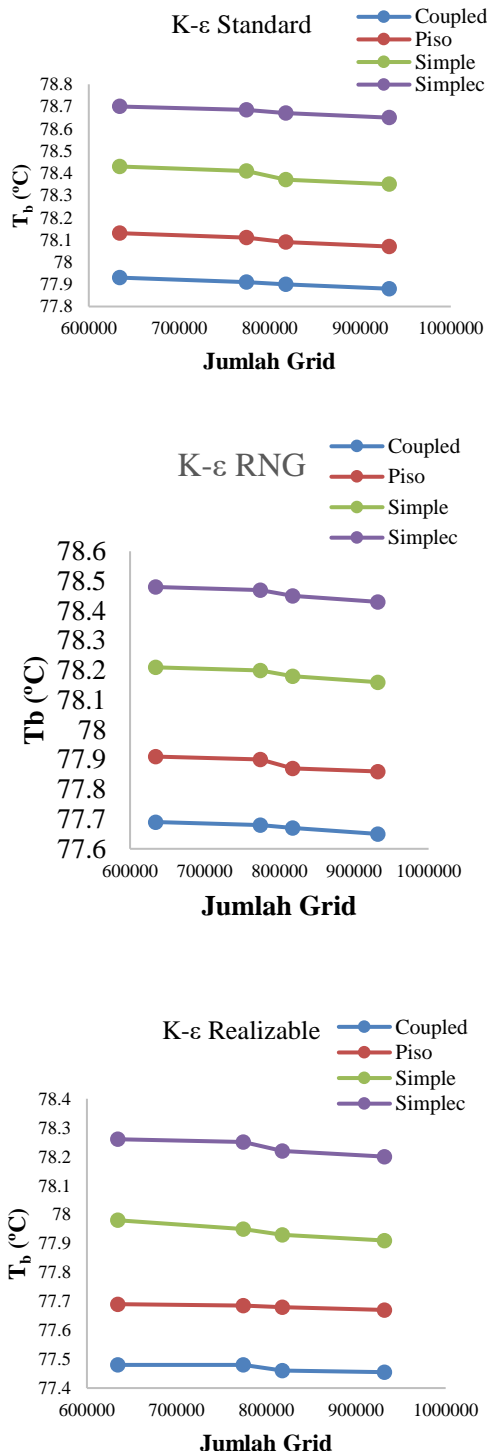
Gambar 6. Hubungan Jumlah Grid Terhadap Koefisien Perpindahan panas (h) Pada SFHS.

Gambar 6 adalah Grafik hubungan jumlah *grid* terhadap hasil simulasi berupa koefisien perpindahan panas pada SFHS. fluktuasi temperatur secara keseluruhan terjadi pada SFHS pada variasi model *viscous* $k-\epsilon$ *Standard* dengan *methods simplec* dengan variasi jumlah *grid* sebesar 634360, hal itu disebabkan oleh tekanan udara masuk yang kurang. Udara cenderung beralih secara cepat menuju lintasan celah bagian tengah SFHS yang dapat mempengaruhi temperatur permukaan *fin*. Pada SFHS dengan model *viscous* $k-\epsilon$ *Realizable* dan RNG dengan variasi *method coupled* dan *piso* dan jumlah *grid* 817800 dengan 931900 temperatur hampir seragam dengan selisih sedikit terhadap karena efek dari besarnya aliran udara yang masuk. Temperatur rata-rata permukaan *fin* pada SFHS tersebut berkisar antara $77,64^{\circ}\text{C}$ hingga $77,01^{\circ}\text{C}$.

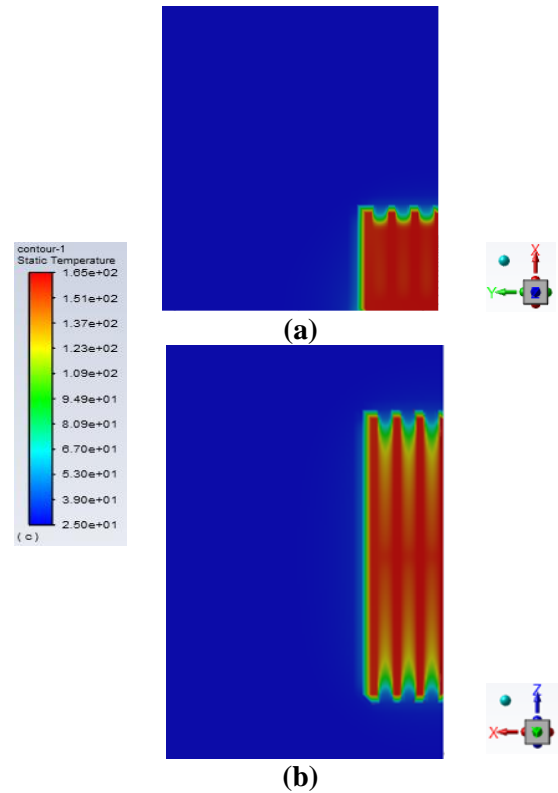
Perbedaan temperatur rata-rata permukaan SFHS memungkinkan koefisien perpindahan panas lebih efektif, pada Gambar 6 dijelaskan bahwa semakin besar variasi jumlah *grid* maka semakin besar nilai koefisien perpindahan panasnya. Dengan meningkatkan besaran jumlah *grid*, memungkinkan dapat mendinginkan permukaan *fin* pada SFHS. Namun anehnya dengan jumlah *grid* yang sama namun beda model *viscous* dan *method* saat simulasi nilai temperatur rata-rata permukaan *fin* pada SFHS mengalami kenaikan suhu sekitar 2%. Perbandingan nilai temperatur permukaan SFHS jumlah *grid* 774320 dengan 817800 adalah $77,47^{\circ}$ dan $77,24^{\circ}\text{C}$ pada operasi kondisi model *viscous* $k-\epsilon$ *Realizable* dengan *methods coupled*. Perbandingan nilai koefisien perpindahan panas antara SFHS tersebut sangat signifikan yakni berkisar antara $2 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{C}$ hingga $4 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{C}$, sehingga kinerja SFHS dapat ditingkatkan dan membantu mengoptimalkan kinerja komponen elektronika.

Simulasi pada SFHS dengan variasi jumlah *grid* dengan mempertimbangkan kondisi operasi arah gravitasi dengan domain penuh 3D telah dilakukan. Tujuan dari desain SFHS yang dioptimalkan untuk diusulkan kebaruannya adalah untuk memeriksa apakah proses desain optimasi dapat meningkatkan suhu dasar SFHS dengan mempertimbangkan jumlah *grid* dari SFHS terhadap perpindahan panas secara konveksi bebas di berbagai variasi model *viscous* dan *methods*. Konsep desain langkah

demikian langkah dipertimbangkan dalam penelitian ini.



Gambar 7. Hubungan Jumlah Grid Oblique Terhadap Temperatur Bagian Paling Bawah (T_b) SFHS.



Gambar 8. (a) Kontur Temperatur SFHS Arah x-z Plane Ketinggian $y = 5$ mm Dari Heating Element, (b) Kontur Temperature SFHS Arah y-z Plane $x = 150$ mm Dari Pressure Outlet.

Di setiap langkah dari desain SFHS dengan variasi jumlah *grid* diselesaikan dengan metode numerik dengan metode konveksi bebas untuk mencari nilai optimal dari SFHS tersebut, hanya variabel desain efektif yang dipertimbangkan untuk mengoptimalkan kinerja termal SFHS. Pada Gambar 7 menjelaskan hubungan besaran jumlah *grid* terhadap nilai temperatur permukaan bawah SFHS (T_{ba}), nilai temperatur tersebut berkisar antara $77,93^{\circ}\text{C}$ hingga 77°C pada jumlah *grid* yang sama namun dengan model *viscous* dan *methods* yang berbeda. Secara keseluruhan hasil simulasi pada SFHS dengan variasi jumlah *grid* antara 634360, 774320, 817800, dan 931900 memiliki perbedaan tersendiri mulai dari temperatur hingga parameter penting lainnya. Dari hasil tersebut dapat dikonfirmasi bahwa besaran variasi jumlah *grid* berpengaruh terhadap nilai temperatur permukaan bawah SFHS (T_{ba}).

Hasil dari beberapa literatur dan penelitian yang sedang dilakukan dapat dilihat bahwa dengan adanya pengaruh variasi jumlah

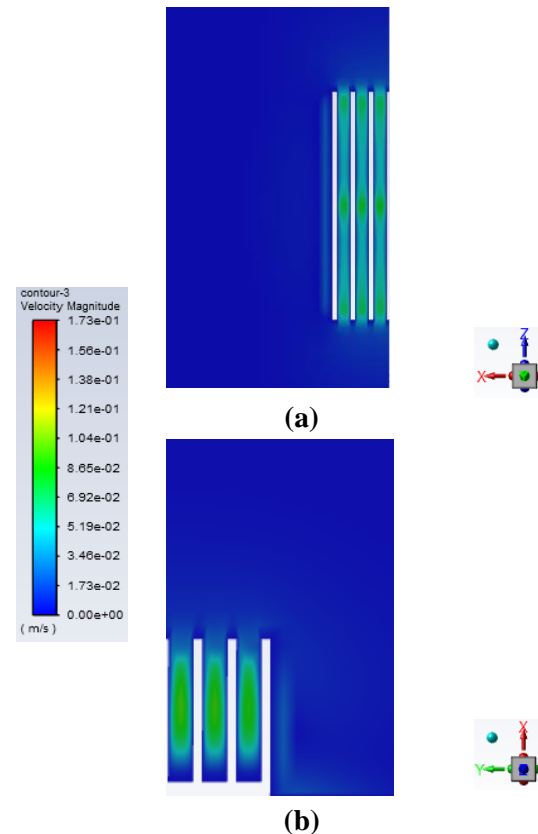
grid mengakibatkan peningkatan koefisien perpindahan panas yang tinggi, hal itu dikarenakan jumlah *grid* yang relatif banyak memungkinkan penangkapan efek lapisan batas termal lebih akurat. Parameter tersebut dapat berupa koefisien perpindahan panas dan tahanan termal.

Pengaruh Model *Viscous*

Secara umum, kecepatan pengaruh model *viscous* k- ϵ memberikan data kinerja terbaik untuk SFHS. Namun seiring diubahnya *methods* saat simulasi memungkinkan adanya perubahan menonjol dari beberapa parameter yang akan dicari pada penelitian ini. Gambar 9 (a) dan (b) menunjukkan bahwa aliran udara yang berkembang di sekitar SFHS pada model *viscous* k- ϵ *Realizable* dengan *methods coupled* terlihat sangat efektif dalam upaya mendinginkan SFHS. Namun pada model *viscous* k- ϵ *Standard* dengan *methods simplec* aliran udara cenderung melambat karena aliran terhambat oleh besarnya medan aliran, aliran melewati celah *fin* hanya sedikit. Besar kemungkinan variasi tersebut mengindikasikan bahwa perhitungan numerik saat simulasi mengalami keterlambatan daripada model lain. Perbedaan kecepatan aliran sekitar 1 m/s sangat berpengaruh terhadap proses pendinginan pada SFHS, terbukti nilai Temperatur permukaan bawah SFHS model *viscous* k- ϵ *Realizable* dengan *methods coupled* cukup tinggi, yakni sekitar 2°C-3°C.

Perbedaan besaran aliran udara yang berkembang pada SFHS mengakibatkan pendinginan permukaan bagian bawah SFHS sangat terlihat. Besaran laju aliran udara yang ditingkatkan akibat berubahnya model *viscous* dan *method* saat simulasi sebesar 1 hingga 2 m/s, perbedaan tersebut terbukti mampu mendinginkan permukaan *fin* pada SFHS sekitar 2°C-3°C. Distribusi aliran udara yang berkembang pada permukaan SFHS bagian bawah pada variasi model *viscous* k- ϵ *Realizable* dengan *methods coupled* sangat tinggi, baik pada variasi jumlah *grid* 634360, 774320, 817800, maupun 931900. Namun berbeda ketika variasi model *viscous* k- ϵ *Standard* dengan *methods simplec*. Distribusi aliran cenderung melambat efek bertemunya udara panas dan udara segar pada arah sumbu gravitasi yang mengakibatkan adanya *vortex* dan *swirflow* yang berkembang di sekitar SFHS

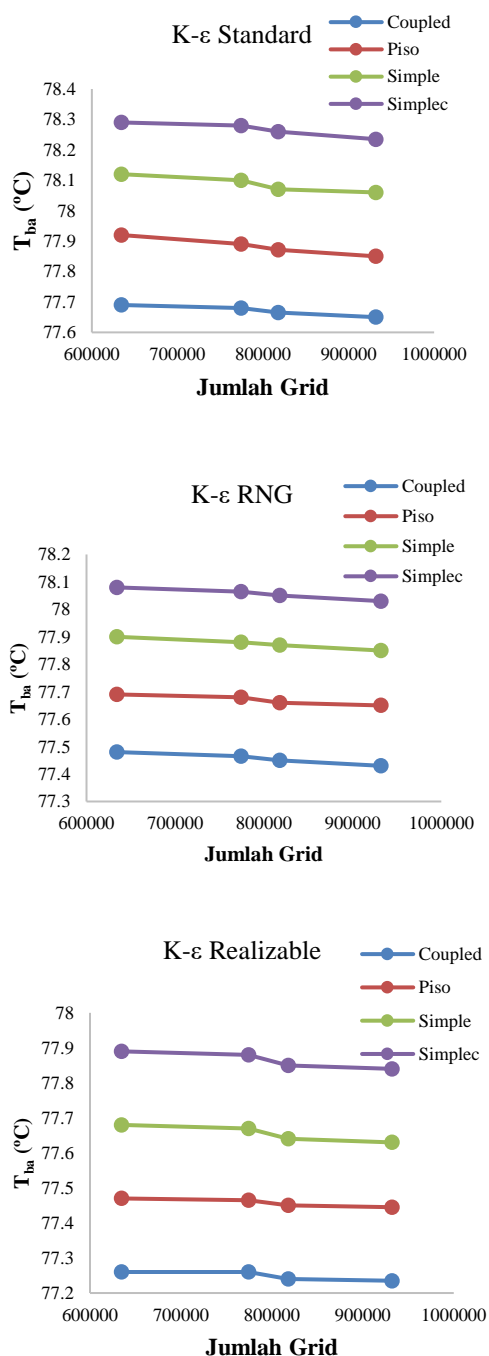
walaupun variasi jumlah *grid* ditingkatkan hingga 817800 dan 931900. Fenomena tersebut mengkonfirmasi bahwa udara tersebut memungkinkan untuk memberikan konveksi bebas lebih jelek dibandingkan dengan variasi model *viscous* k- ϵ *Realizable* dengan *methods coupled*.



Gambar 9. (a) Kontur Velocity SFHS Arah x-z Plane Ketinggian $y = 5$ mm Dari Heating Element, (b) Kontur Velocity SFHS Arah y-z Plane $x = 150$ mm Dari Pressure Outlet.

Pengaruh *Methods* Simulasi

Penelitian mengenai variasi model *viscous* dan *methods* pada simulasi sudah banyak dilakukan oleh peneliti seperti (R. C. Adhikari dkk., 2020 dan A. K. Rao, 2021). Pada penelitian ini pengaruh *methods* saat simulasi dipertimbangkan. Simulasi numerik SFHS dengan metode konveksi bebas dengan variasi tersebut menunjukkan adanya perbedaan laju perpindahan panas yang baik, namun perbedaan tersebut sangat kecil. Terbukti pada penelitian ini *methods coupled* memberikan data kinerja termal terbaik disusul oleh *simple*, dan *simplec*.



Gambar 12. Hubungan Jumlah Grid Terhadap Temperatur Permukaan Bawah (T_{ba}) SFHS.

Gambar 10 menunjukkan hubungan jumlah *grid* terhadap Temperature base permukaan SFHS (T_{ba}) di berbagai *methods* simulasi. temperatur relatif menurun di berbagai variasi jumlah *grid*. Temperatur terbaik didapatkan pada model *viscous* k- ϵ *Realizable* dengan *methods* *coupled* dengan nilai temperatur tertinggi 77,48°C dan terendah

77,01°C. Koefisien Perpindahan panas rata-rata dari seluruh SFHS meningkat dengan diubahnya *methods* simulasi, ada kemungkinan bahwa aliran dan perpindahan panas di saluran tidak sepenuhnya berkembang ketika *methods* yang dipilih tidak cocok untuk kasus simulasi SFHS. Peningkatan nilai koefisien perpindahan panas berkisar antara 1 hingga 2 Beberapa literatur seperti (B. Kanargi dkk., 2020 dan R. C. Adhikari dkk., 2020) dalam jurnalnya menyatakan bahwa model *viscous* k- ϵ *Realizable* dengan *methods* *coupled* memiliki data kinerja simulasi terbaik pada SFHS. Menurutnya model tersebut sangat cocok untuk menyelesaikan perhitungan numerik dan simulasi untuk studi kasus SFHS. Selain itu ada pernyataan bahwa model k- ϵ memang handal di aplikasikan pada model simulasi dengan bilangan Reynold rendah maupun tinggi.

Untuk parameter seperti panjang, lebar, tinggi, tebal, dan jarak antar *fin* yang proporsional, nilai temperatur SFHS memiliki kecenderungan tren untuk tumbuh dengan ditandai penurunan temperatur permukaan *fin* yang signifikan. Hal itu mungkin menjadi alasan bahwa penurunan luas disipasi panas menyebabkan peningkatan suhu rata-rata. Lapisan batas termal menipis di saluran masuk, yang berkontribusi pada peningkatan koefisien perpindahan panas lokal, terutama ketika lapisan termal yang terikat berpindah dari pengembangan penuh ke pengembangan tidak sepenuhnya.

PENUTUP Kesimpulan

Studi ini menunjukkan bahwa model simulasi numerik ini tergantung dari jumlah *grid*, dimana terdapat jumlah *grid* yang optimal yaitu sekitar 900.000 *grid*. Di samping itu hasil perhitungan tergantung dari pemilihan model *viscous*, dimana model yang terbaik adalah model turbulensi k- ϵ *Realizable*. Selain itu, metode pemecahan persamaan aliran dan energi juga memainkan peranan penting terhadap hasil perhitungan, dimana metode *coupled* memberikan hasil yang terbaik dalam simulasi ini. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa simulasi SFHS dengan jumlah *grid* 931.900, model *viscous* k- ϵ *Realizable*, dan *methods* *coupled* merupakan model simulasi yang dapat digunakan untuk melakukan perhitungan-perhitungan geometri lainnya dari heat sink ini.

Dalam perhitungan yang telah dilakukan terdapat perbedaan hasil perhitungan temperatur sebesar 1°C hingga 2°C jika menggunakan model simulasi yang berbeda. Adapun untuk nilai koefisien perpindahan kalor konveksi diperoleh perbedaan hasil hingga sebesar 2 hingga 4 W/m².°C.

UCAPAN TERIMA KASIH

Beasiswa Pendidikan Indonesia (BPI). Gedung C Lantai 13 Jl. Jenderal Sudirman Senayan, Jakarta Pusat 10270.

Laboratorium Efisiensi dan Konservasi Energi, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang. Jl. Prof. Sudarto No.13, Tembalang, Kec. Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah (50275), Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Abbas and C. C. Wang., (2020). "Augmentation of natural convection heat sink via using displacement design," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 154, pp. 1-14. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119757.
- A. K. Rao and V. Somkuwar., (2021). "Heat transfer of a tapered fin heat sink under natural convection," *Mater. Today Proc.*, vol. 46, pp. 7886–7891. doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.565.
- A. M. A. Mageeth, S. J. Park, M. Jeong, W. Kim, and C. Yu., (2019). "Planar-type thermally chargeable supercapacitor without an effective heat sink and performance variations with layer thickness and operation conditions," *Appl. Energy*, vol. 268, pp. 1-9. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114975.
- A. Moradikazerouni, M. Afrand, J. Alsarraf, S. Wongwises, A. Asadi, and T. K. Nguyen., (2019). "Investigation of a computer CPU heat sink under laminar forced convection using a structural stability method," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 134, pp. 1218–1226. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.02.
- B. Kanargi, J. M. S. Tan, P. S. Lee, and C. Yap., (2020). "A tapered inlet/outlet flow manifold for planar, air-cooled oblique-finned heat sink," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 174, pp. 1-18. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115250.
- C. H. Huang and W. Y. Chen., (2022). "A natural convection horizontal straight-fin heat sink design problem to enhance heat dissipation performance," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 176, pp. 1-13. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107540.
- D. Jung, H. Lee, D. Kong, E. Cho, K. W. Jung, C. R. Kharangate, M. Iyengar, C. Malone, M. Asheghi, K. E. Goodson, H. Lee., (2021). "Thermal design and management of micro-pin fin heat sinks for energy-efficient three-dimensional stacked integrated circuits," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 175, pp. 1-17. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121192.
- D. Kong, Y. Kim, M. Kang, E. Song, Y. Hong, H. S. Kim, K. J. Rah, H. G. Choi, D. Agonafer, H. Lee., (2021). "A holistic approach to the thermal-hydraulic design of 3D manifold microchannel heat sinks for energy-efficient cooling," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 28, pp. 1-13. doi: 10.1016/j.csite.2021.101583.
- F. Han, H. Guo, and X. Ding., (2021). "Design and optimization of a liquid-cooled heat sink for a motor inverter in electric vehicles." *Appl. Energy*, vol. 291, pp. 1-14. doi:10.1016/j.apenergy.2021.116819.
- H. Hassan and N. Y. A. Shafey., (2021). "3D study of convection-radiation heat transfer of electronic chip inside enclosure cooled by a heat sink," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 159, pp. 1-15, September 2021. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106585.
- H. Sait., (2022). "Cooling a plate lithium-ion battery using a thermoelectric system and evaluating the geometrical impact on the performance of heatsink connected to the system," *J. Energy Storage*, vol. 52, pp. 1-14. doi: 10.1016/j.est.2022.104692.
- H. Zu, W. Dai, Y. Li, K. Li, and J. Li., (2021). "Analysis of enhanced heat transfer on a passive heat sink with high-emissivity coating," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 166, pp. 1-10. doi: 2021.10.1016/j.ijthermalsci.2021.10697.
- I. El Ghandouri, A. El Maakoul, S. Saadeddine, and M. Meziane., (2020). "Design and numerical investigations of natural convection heat transfer of a new rippling

- fin shape*,” Appl. Therm. Eng., vol. 178, pp. 1-14. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115670.
- J. G. Song, J. H. Lee, and I. S. Park., (2021). “*Enhancement of the cooling performance of naval combat management system using heat pipe*,” Appl. Therm. Eng., vol. 188, pp. 1-12. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116657.
- K. Zhang, M. J. Li, F. L. Wang, and Y. L. He., (2020). “*Experimental and numerical investigation of natural convection heat transfer of W-type fin arrays*,” Int. J. Heat Mass Transf., vol. 152, pp. 1-13. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119315.
- M. Ghaneifar, H. Arasteh, R. Mashayekhi, A. Rahbari, R. B. Mahani, and P. Talebizadehsardari., (2020). “*Thermohydraulic analysis of hybrid nanofluid in a multilayered copper foam heat sink employing local thermal non-equilibrium condition: Optimization of layers thickness*,” Appl. Therm. Eng., vol. 181, pp. 1-13. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115961.
- M. R. Attar, M. Mohammadi, A. Taheri, S. Hosseinpour, M. P. Fard, M. H. Sabzevar, A. Davoodi., (2020). “*Heat transfer enhancement of conventional aluminum heat sinks with an innovative, cost-effective, and simple chemical roughening method*,” Therm. Sci. Eng. Prog., vol. 20, pp. 1-10. doi: 10.1016/j.tsep.2020.100742.
- R. C. Adhikari, D. H. Wood, and M. Pahlevani., (2020). “*An experimental and numerical study of forced convection heat transfer from rectangular fins at low Reynolds numbers*,” Int. J. Heat Mass Transf., vol. 163, pp. 1-12. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120418.
- Z. Soleymani, M. Rahimi, M. Gorzin, and Y. Pahamli., (2020). “*Performance analysis of hotspot using geometrical and operational parameters of a microchannel pin-fin hybrid heat sink*,” Int. J. Heat Mass Transf., vol. 159, pp. 1-18, June 2020. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120141.