

## Analisis Pengaruh Variasi Jumlah *Row* pada Kinerja Termal-Hidraulik *Fin Coil* Menggunakan Simulasi *Computational Fluid Dynamics*

Muhammad Syarif Hidayat\*<sup>1</sup>, Faza Haunan Wijaya<sup>2</sup>, Ega Taqwali Berman<sup>3</sup>, Kamin Sumardi<sup>4</sup>, Iriansyah Putra<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri, Universitas Pendidikan Indonesia

<sup>5</sup>PT. Wiratama Indotech

Email: <sup>1</sup>[Muhammadsyarifhidayat07@upi.edu](mailto:Muhammadsyarifhidayat07@upi.edu), <sup>2</sup>[faza.h.wijaya0251@upi.edu](mailto:faza.h.wijaya0251@upi.edu), <sup>3</sup>[egatb@upi.edu](mailto:egatb@upi.edu), <sup>4</sup>[kaminsumardi@upi.edu](mailto:kaminsumardi@upi.edu), <sup>5</sup>[putra@wiratamaindotech.co.id](mailto:putra@wiratamaindotech.co.id)

### Abstrak

Sistem *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC) merupakan komponen penting dalam menjaga kenyamanan termal dan kualitas udara dalam bangunan, namun juga menyumbang konsumsi energi yang besar. Salah satu komponen utama pada sistem ini adalah *fin and tube heat exchanger* yang berfungsi menyerap panas dari udara melalui proses evaporasi refrigeran. Kinerja komponen ini dipengaruhi oleh parameter geometri, salah satunya jumlah *row*, yang berpotensi meningkatkan luas permukaan perpindahan panas tetapi juga meningkatkan hambatan aliran udara. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi jumlah *row* terhadap kinerja termal-hidraulik *fin coil*. Metode penelitian menggunakan simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan perangkat lunak ANSYS *Fluent* pada konfigurasi 2, 3, 4, dan 5 *row*. Parameter yang dianalisis meliputi distribusi temperatur udara, tekanan, dan kecepatan aliran. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan jumlah *row* menurunkan temperatur udara *outlet* dari kisaran 24–25 °C pada konfigurasi 2 *row* menjadi sekitar 20–21 °C pada konfigurasi 5 *row*, yang menunjukkan peningkatan efektivitas perpindahan panas. Namun, peningkatan jumlah *row* juga menyebabkan kenaikan tekanan maksimum dari 16,64 Pa menjadi 32,80 Pa serta peningkatan kecepatan maksimum aliran dari 6,71 m/s menjadi 7,75 m/s, yang mengindikasikan peningkatan *pressure drop* dan resistansi aliran udara. Dengan demikian, penambahan jumlah *row* dapat meningkatkan performa perpindahan panas, tetapi perlu dipertimbangkan secara optimal karena berdampak pada peningkatan *pressure drop* pada sisi udara.

**Kata kunci:** *computational fluid dynamics, fin coil, thermo-hydraulic, row variation.*

## *Analysis of the Effect of Row Number Variation on the Thermal-Hydraulic Performance of a Fin Coil Using Computational Fluid Dynamics*

### Abstract

*Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC) systems are important components in maintaining thermal comfort and indoor air quality in buildings, but they also contribute significantly to energy consumption. One of the main components in this system is the *fin and tube heat exchanger*, which functions to absorb heat from the air through the evaporation process of the refrigerant. The performance of this component is influenced by geometric parameters, one of which is the number of tube rows (*row*), which can increase the heat transfer surface area but also increase airflow resistance. This study aims to analyze the effect of row number variation on the thermal-hydraulic performance of a *fin coil*. The research method uses numerical simulation based on *Computational Fluid Dynamics* (CFD) with ANSYS *Fluent* software for configurations of 2, 3, 4, and 5 *row*. The analyzed parameters include air temperature distribution, pressure, and airflow velocity. The simulation results show that increasing the number of row reduces the outlet air temperature from approximately 24–25 °C in the 2-row configuration to around 20–21 °C in the 5-row configuration, indicating an improvement in heat transfer effectiveness. However, the increase in the number of row also causes the maximum pressure to rise from 16.64 Pa to 32.80 Pa and the maximum airflow velocity to increase from 6.71 m/s to 7.75 m/s, indicating an increase in *pressure drop* and airflow resistance. Therefore, increasing the number of row can improve heat transfer performance, but it must be optimally considered because it also leads to higher pressure losses on the air side.

**Keywords:** *computational fluid dynamics, fin coil, thermo-hydraulic, row variation.*



## 1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan populasi, perkembangan teknologi, serta perubahan gaya hidup masyarakat telah meningkatkan kebutuhan terhadap sistem *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC) pada berbagai jenis bangunan [1]. Sistem HVAC memiliki peran krusial dalam menciptakan lingkungan *indoor* yang sehat dan nyaman, karena mampu mengontrol parameter utama seperti temperatur, kelembapan, distribusi aliran udara, serta mengurangi konsentrasi kontaminan udara untuk meningkatkan *Indoor Air Quality* (IAQ) dan kenyamanan termal penghuni [2]. Namun demikian, pengoperasian sistem HVAC juga berkontribusi besar terhadap konsumsi energi pada sektor bangunan. Sektor ini diketahui menyumbang lebih dari 39% konsumsi energi global, dengan porsi yang signifikan berasal dari sistem pendingin udara [3]. Oleh karena itu, peningkatan efisiensi komponen pendingin menjadi salah satu upaya penting dalam mendukung keberlanjutan energi serta mengurangi emisi karbon dari sistem HVAC [4]. Salah satu komponen utama dalam sistem HVAC adalah *heat exchanger*, yang berperan dalam proses perpindahan panas antara dua fluida dengan temperatur berbeda. Komponen ini digunakan secara luas pada berbagai sektor industri, seperti industri makanan dan farmasi, *refrigerasi* dan tata udara, elektronika, penyulingan minyak, proses kimia, hingga pembangkit listrik [5]. Dalam sistem *refrigerasi*, salah satu jenis penukar kalor yang umum digunakan adalah *fin coil*, yang berfungsi sebagai evaporator untuk menyerap panas melalui proses penguapan refrigeran [6]. *Fin coil* memiliki keunggulan berupa luas permukaan perpindahan panas yang besar akibat adanya *fin*, sehingga mampu meningkatkan efisiensi perpindahan panas dalam dimensi yang relatif kompak [7].

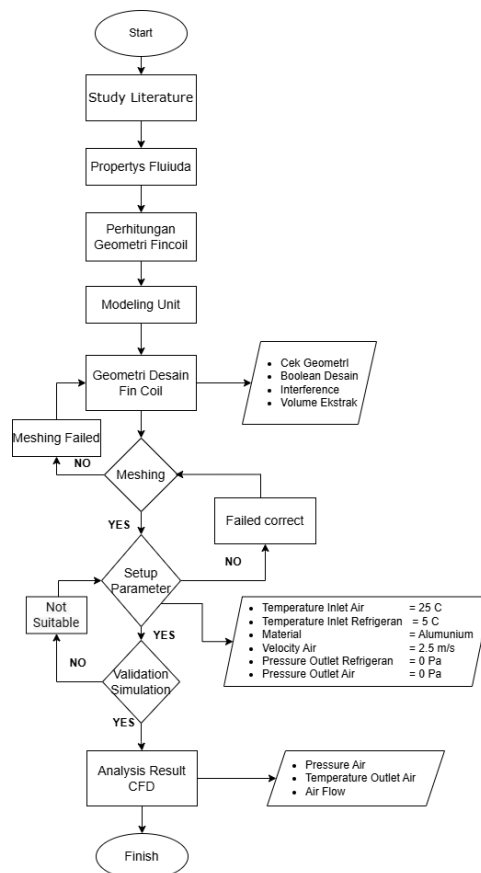
Kinerja *fin coil* dipengaruhi oleh berbagai parameter desain, seperti luas permukaan perpindahan panas, *fin pitch*, *material fin*, serta jumlah *row* [8]. Penambahan jumlah *row* secara teoritis dapat meningkatkan luas area perpindahan panas sehingga kapasitas pendinginan dapat meningkat [9]. Namun, peningkatan jumlah *row* juga dapat menyebabkan bertambahnya hambatan aliran udara yang berujung pada peningkatan *pressure drop*. Kondisi ini berpotensi meningkatkan kebutuhan daya kipas dan menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan [10]. Dengan demikian, terdapat hubungan timbal balik antara peningkatan performa perpindahan panas dan kenaikan *pressure drop* yang perlu dianalisis secara komprehensif [11].

Sejumlah penelitian sebelumnya telah menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk menganalisis karakteristik perpindahan panas dan hidrodinamika pada penukar panas *tube fin*. Dalam Mujtaba *et al.* [12] menunjukkan bahwa konfigurasi *tube*, *material*, dan jarak antar *fin* memengaruhi distribusi *temperatur*, profil kecepatan aliran, serta karakteristik penurunan tekanan. Raje dan Dhiman [13] melaporkan bahwa peningkatan bilangan *Reynolds* dapat meningkatkan koefisien perpindahan panas, namun disertai dengan peningkatan *pressure drop*. Penelitian lain oleh Huey *et al.* [14] menunjukkan bahwa peningkatan laju aliran udara dapat meningkatkan koefisien perpindahan panas dengan deviasi hasil simulasi yang kecil terhadap data literatur. Studi oleh Barquín dan Valencia [15] serta Erbay *et al.* [16] juga menegaskan bahwa peningkatan performa perpindahan panas pada penukar panas umumnya diikuti oleh kenaikan *trade off* tekanan pada sisi aliran udara.

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji pengaruh parameter geometri dan kondisi aliran pada *fin and tube heat exchanger*, kajian *numerik* yang secara khusus membahas pengaruh jumlah *row* pada *fin coil* masih relatif terbatas. Padahal, parameter ini memiliki peran penting dalam menentukan keseimbangan antara performa perpindahan panas dan karakteristik hidrodinamika aliran udara. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi jumlah *row* pada *fin coil* menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Analisis difokuskan pada distribusi aliran udara, karakteristik perpindahan panas, serta *pressure drop* pada setiap konfigurasi jumlah *row*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pengaruh jumlah *row* terhadap kinerja termal-hidraulik *fin coil* serta mendukung pengembangan desain penukar panas yang lebih efisien pada sistem HVAC.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk menganalisis kinerja *fin coil* dengan variasi jumlah *row*. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS *Fluent* untuk memvisualisasikan distribusi aliran udara dan pola perpindahan panas, sehingga secara numerik diperoleh gambaran yang lebih detail mengenai pengaruh variasi jumlah *row* terhadap performa pendinginan.



Gambar 1. Flowchart

Gambar 1. Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk menentukan properti fluida dan parameter dasar desain. Selanjutnya dilakukan perhitungan geometri *fin coil* yang menjadi acuan dalam proses pemodelan unit menggunakan perangkat lunak *SolidWorks*. Geometri yang telah dibuat kemudian diperiksa kembali sebelum memasuki tahap *meshing*. Apabila *mesh* berhasil, penelitian dilanjutkan dengan penetapan parameter simulasi, meliputi kondisi temperatur, kecepatan aliran, material, dan batas tekanan. Tahap berikutnya adalah validasi simulasi untuk memastikan kesesuaian antara model dan kondisi nyata. Setelah divalidasi, dilakukan analisis hasil CFD yang mencakup distribusi tekanan, temperatur, dan pola aliran udara.

Konfigurasi operasi dalam simulasi ini melibatkan dua fluida kerja, yaitu refrigeran R-134A pada sisi *coil* dan udara pada sisi pendingin. Spesifikasi operasional kedua fluida tersebut, yang berperan sebagai *input* fundamental dalam perhitungan analitik dan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD), dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Propertys Fluida

Propertys Fluida				
Propertys	Simbol	Refrigeran 410 A	Air	Unit
Temperature Inlet	T <sub>in</sub>	5	25	C
Temperature Outlet	T <sub>out</sub>	10	20	C
Velocity	V	-	2,5	m/s
Density	$\rho$	30,22	1,184	kg/m <sup>3</sup>
Specific Heat	C <sub>p</sub>	1180	1007	J/kg·K
Thermal Conductivity	k	0.0121	0,02551	W/m·K
Dynamic Viscosity	$\mu$	0,0000121	0,00001849	kg/m·s

**2.1. Desain dan Geometri *Fin coil***

Model *fin and tube coil* dengan konfigurasi geometri spesifik. Parameter geometri yang menjadi variabel dalam studi ini variasi jumlah *row* yang diimplementasikan berfungsi sebagai parameter kunci untuk mengkaji pengaruhnya terhadap performa termal, dilihat pada tabel 2.

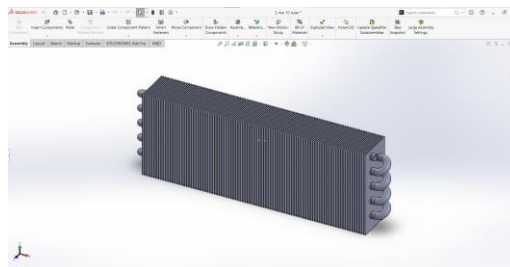
Tabel 2. Spesifikasi *Fin Coil*

Parameter	Simbol	Nilai	Unit
<i>Outside tube diameter</i>	do	12,7	mm
<i>Inside tube diameter</i>	di	11,38	mm
<i>Longitudinal tube spacing</i>	SL	25,4	mm
<i>Transverse tube spacing</i>	ST	29,21	mm
<i>Fin per Inch</i>	FPI	8	Fin/inch
<i>Fin Thickness</i>	Tf	0,4	mm
<i>Number fin</i>	Nf	137	fin
Material	-	Alumunium	

Model *fin coil* digambar menggunakan *SolidWorks* dan diekspor ke bagian *geometry* pada *ansys fluent* melalui format *file STEP* ditunjukkan pada Tabel 3. Model tiga dimensi *fin coil* tersebut kemudian dimodelkan dalam *SolidWorks*, seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.

Tabel 3. Dimensi *Fin Coil*

Row	Dimensi Fin <i>Length x Height x Width</i>	Number Tube
2	435x160x72 mm	10
3	435x160x97 mm	15
4	435x160x130 mm	20
5	435x160x156 mm	25



Gambar 2. *Fin coil*

**2.2. Meshing**

Proses ini tahapan pembentukan elemen-elemen kecil *mesh* pada geometri sehingga model dapat dihitung secara numerik dalam simulasi CFD atau termal. Proses ini membagi domain menjadi banyak elemen kecil dan menentukan kualitasnya, agar aliran fluida, perpindahan panas, dan gaya dapat dihitung dengan akurat oleh *solver*. dilihat pada gambar 3.

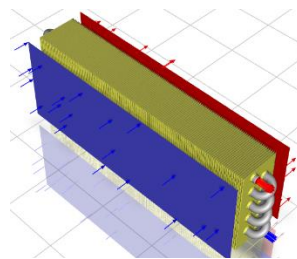
1. Metode *tetrahedral* digunakan pada domain *fluida, tube, dan fins*.
2. *Element sizing* sebesar 10 mm seluruh domain.
3. *Body sizing* sebesar 5 mm diterapkan pada domain *udara*.
4. *Edge sizing* sebesar 2 mm diterapkan seluruh domain.

Gambar 3. *Meshing*

### 2.3. Setup

Koefisien perpindahan panas, temperatur, tekanan, dan kecepatan pada penukar panas secara efisien, diperlukan setup dengan domain penukar panas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

1. *Double precision*, dan jumlah *solver* diatur sebanyak 1.
2. Mode *steady-state* dan *pressure-based*.
3. Model turbulensi yang digunakan adalah k-epsilon dengan *Enhanced Wall Treatment* dan tipe *standard*.
4. Material yang digunakan yaitu fluida berupa udara, *Tube* berisi R410a, dan fins berbahan aluminium.
5. *Boundary conditions* ditentukan sesuai dengan kebutuhan simulasi.
6. Pada *solution methods*, skema *second order* dipilih untuk menghasilkan hasil yang lebih akurat.
7. Perhitungan dihentikan setelah pola *convergen* tercapai, yaitu setelah 200 iterasi atau lebih.

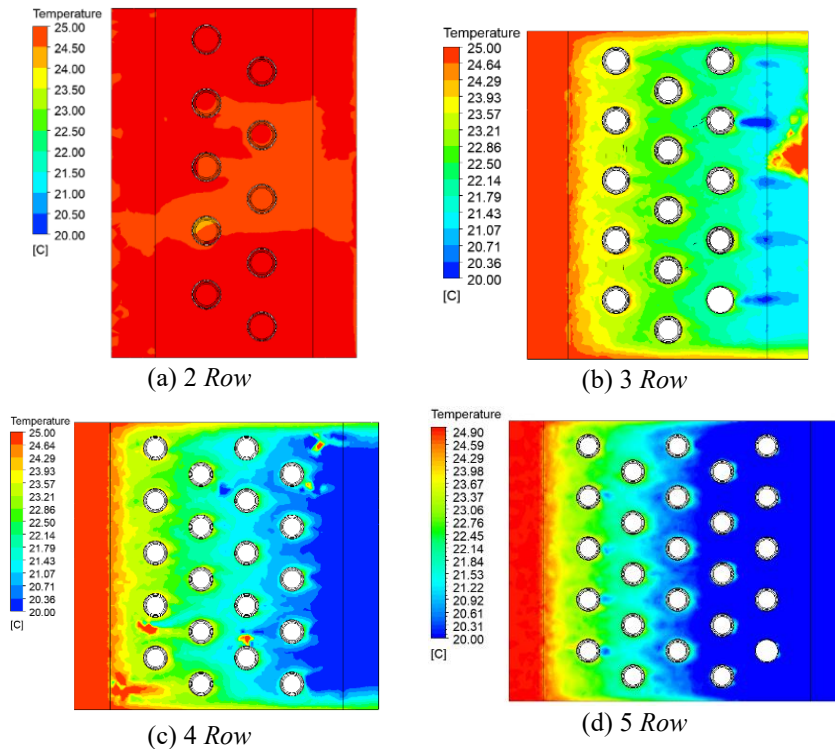
Gambar 4. Domain *fin coil*

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Temperatur Udara

Gambar (5) menunjukkan hasil simulasi distribusi temperatur udara pada variasi jumlah *row* pada *fin tube heat exchanger*. Secara umum, peningkatan jumlah *row* menghasilkan penurunan temperatur udara yang semakin signifikan sepanjang arah aliran. Pada konfigurasi 2 *row*, distribusi temperatur masih didominasi oleh warna merah dengan temperatur *outlet* berada pada kisaran 24–25 °C, yang menunjukkan bahwa proses perpindahan panas masih relatif rendah. Kondisi ini disebabkan oleh terbatasnya luas permukaan perpindahan panas serta waktu kontak antara aliran udara dan permukaan *tube*, sehingga energi panas yang dapat diserap oleh refrigeran masih terbatas. Ketika jumlah *row* ditingkatkan menjadi 3 *row*, mulai terlihat terbentuknya gradien temperatur yang lebih jelas dari sisi inlet menuju *outlet*. Zona warna kuning hingga hijau yang muncul pada bagian tengah hingga hilir menunjukkan bahwa temperatur udara mulai menurun hingga kisaran 21–23 °C, menandakan meningkatnya efektivitas perpindahan panas akibat bertambahnya luas area kontak termal. Pada konfigurasi 4 *row*, penurunan temperatur udara menjadi lebih signifikan dengan munculnya dominasi warna biru pada bagian *downstream heat exchanger*. Temperatur udara pada area *outlet* berada pada kisaran 20,5–21,5 °C, yang menunjukkan bahwa proses penyerapan panas lebih intensif dibandingkan konfigurasi sebelumnya. Hal ini terjadi karena penambahan jumlah *row* memperpanjang lintasan aliran udara serta meningkatkan interaksi termal antara udara dan permukaan *fin*. Sementara itu, konfigurasi 5 *row* menunjukkan performa termal paling optimal, di mana distribusi temperatur udara menjadi lebih rendah dan relatif lebih merata pada kisaran 20–21 °C. Dominasi warna biru pada bagian hilir menunjukkan bahwa sebagian besar energi panas dari udara telah berhasil dipindahkan sebelum mencapai outlet. Secara keseluruhan, hasil simulasi ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah *row* pada *fin tube heat exchanger* meningkatkan luas permukaan perpindahan panas dan memperpanjang waktu interaksi aliran udara dengan permukaan penukar kalor, sehingga efektivitas pendinginan sistem meningkat secara signifikan. Temuan ini

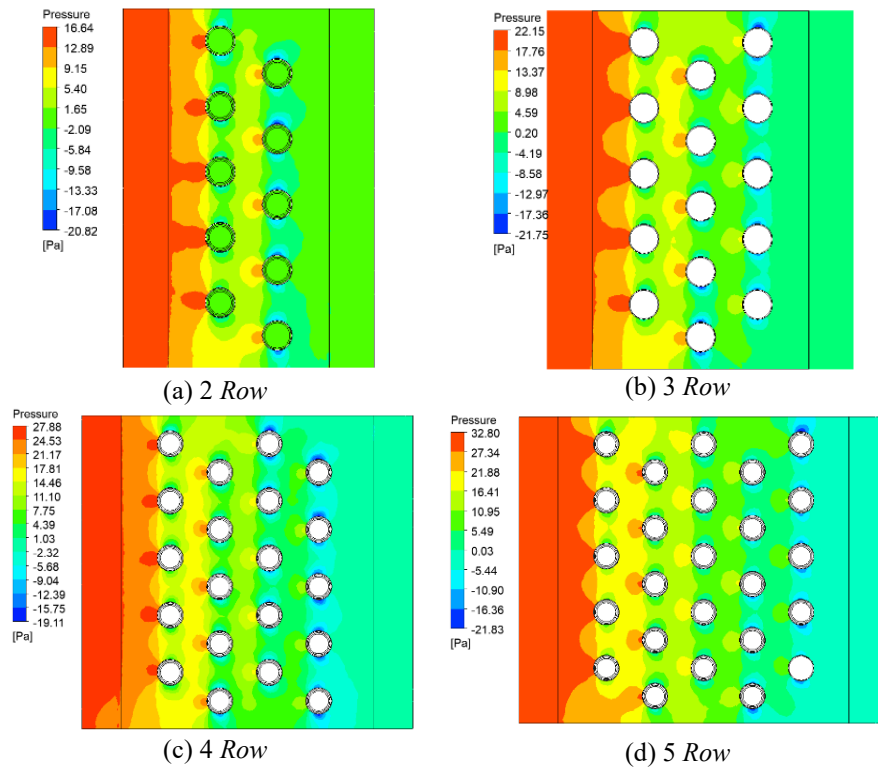
sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Raje dan Dhiman [13] melaporkan bahwa peningkatan jumlah *row* pada *heat exchanger* dapat meningkatkan performa perpindahan panas melalui peningkatan luas permukaan kontak dan intensifikasi pencampuran aliran.



Gambar 5. Temperatur udara: a) 2 Row, b) 3 Row, c) 4 Row, d) 5 Row

### 3.2. Pressure

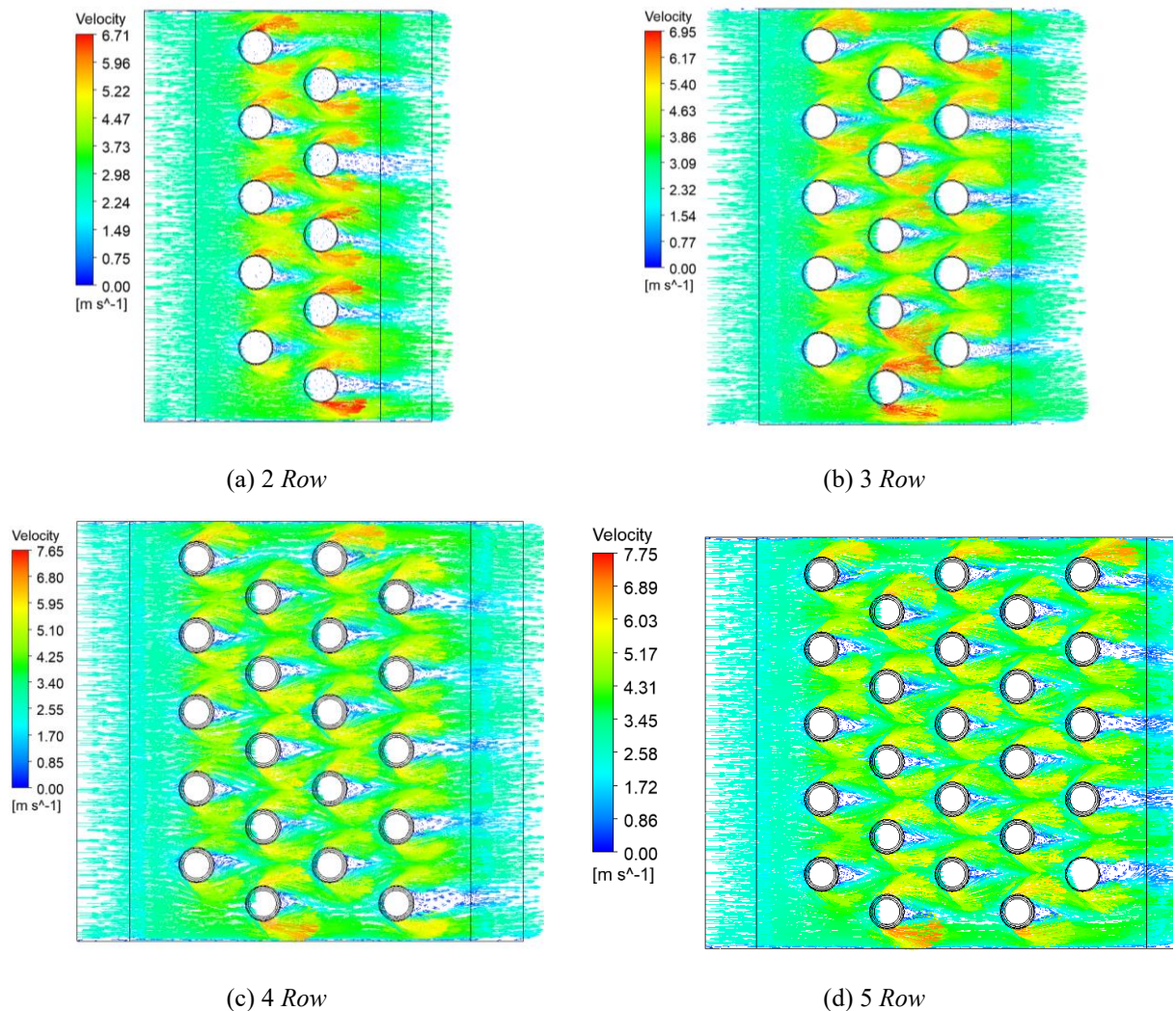
Gambar (6) hasil simulasi distribusi tekanan udara menunjukkan bahwa peningkatan jumlah *row* pada *fin tube heat exchanger* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik tekanan di sisi udara. Pada konfigurasi 2 *row*, tekanan maksimum tercatat sekitar 16,64 Pa, dengan distribusi tekanan yang masih relatif merata dari sisi masuk menuju sisi keluar. Gradien tekanan masih menunjukkan gradien yang rendah, menunjukkan bahwa hambatan aliran relatif kecil sehingga *pressure drop* yang terjadi belum signifikan. Ketika jumlah *tube* meningkat menjadi 3 *row*, tekanan maksimum naik menjadi sekitar 22,15 Pa, dan distribusi tekanan mulai menunjukkan perbedaan yang lebih jelas antara sisi hulu dan hilir akibat meningkatnya interaksi antara aliran udara dengan permukaan *tube*. Pada konfigurasi 4 *row*, tekanan maksimum meningkat menjadi sekitar 27,88 Pa, dengan tekanan minimum mencapai sekitar -19,11 Pa, yang mengindikasikan terbentuknya gradien tekanan yang semakin besar serta munculnya zona tekanan rendah di belakang *tube* akibat fenomena *wake formation* dan *flow separation*. Selanjutnya, pada konfigurasi 5 *row*, tekanan maksimum meningkat hingga sekitar 32,80 Pa dengan tekanan minimum sekitar -21,83 Pa, menunjukkan bahwa distribusi tekanan semakin tidak seragam dan turbulensi aliran semakin berkembang seiring bertambahnya jumlah *row*. Temuan ini sejalan dengan penelitian Mujtaba *et al.* [12] yang melaporkan bahwa peningkatan jumlah *tube* dan *row* pada *tube fin heat exchanger* dapat meningkatkan *pressure drop* akibat bertambahnya hambatan aliran dan luas permukaan kontak antara fluida dengan elemen *tube*. Secara keseluruhan, peningkatan jumlah *row* dari 2 hingga 5 pada penelitian ini menyebabkan kenaikan tekanan maksimum serta memperbesar perbedaan tekanan antara sisi *inlet* dan *outlet*, yang secara langsung meningkatkan nilai *pressure drop* pada sisi udara. Fenomena ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah *row* dapat meningkatkan resistansi aliran udara.



Gambar 6. Pressure: a) 2 Row, b) 3 Row, c) 4 Row, d) 5 Row

### 3.3. Velocity

Gambar (7) memperlihatkan bahwa peningkatan jumlah *row tube* secara signifikan karakteristik distribusi kecepatan aliran udara pada *fin-tube heat exchanger*. Pada konfigurasi 2 row, aliran masih relatif stabil dengan kecepatan maksimum sekitar 6,71 m/s dan distribusi yang cukup seragam di area *inlet*. Percepatan lokal terjadi pada celah antar *tube* akibat efek kontraksi aliran, sementara *wake* berkecepatan rendah mulai terbentuk di belakang *tube* sebagai konsekuensi *flow separation*. Penambahan menjadi 3 row meningkatkan kecepatan maksimum hingga 6,95 m/s serta memicu interaksi antar *wake* yang menghasilkan *zona recirculation* di daerah *downstream*. Interaksi ini meningkatkan variasi kecepatan lokal dan memperkuat pencampuran aliran. Pada konfigurasi 4 dan 5 row, efek *jet flow* antar *tube* bank semakin dominan sehingga kecepatan maksimum meningkat hingga 7,65 m/s dan 7,75 m/s. Namun, ekspansi *wake* dan interaksi vorteks antar *row* menyebabkan distribusi kecepatan semakin tidak seragam, menandakan peningkatan intensitas turbulensi dan *disipasi* energi aliran. Secara keseluruhan, peningkatan jumlah *row* memperkuat akselerasi aliran lokal sekaligus meningkatkan resistansi aerodinamis dan potensi *pressure drop* di sisi udara. Meskipun demikian, intensifikasi turbulensi dan *flow mixing* yang terjadi berpotensi meningkatkan performa perpindahan panas. Hasil ini konsisten dengan temuan Barquín dan Valencia [15] yang melaporkan bahwa penambahan elemen seperti *longitudinal vortex generator* dapat meningkatkan intensitas turbulensi dan mengubah pola aliran secara signifikan..



Gambar 7. Velocity: a) 2 Row, b) 3 Row, c) 4 Row, d) 5 Row

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan jumlah *row* pada *fin-tube heat exchanger* memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik termal-hidraulik aliran udara. Penambahan jumlah *row* dari 2 hingga 5 meningkatkan luas permukaan perpindahan panas sehingga temperatur udara outlet menurun dari kisaran 24–25 °C pada konfigurasi 2 *row* menjadi sekitar 20–21 °C pada konfigurasi 5 *row*. Namun, peningkatan jumlah *row* juga menyebabkan bertambahnya hambatan aliran yang ditunjukkan oleh kenaikan tekanan maksimum dari sekitar 16,64 Pa (2 *row*) menjadi 32,80 Pa (5 *row*) serta munculnya tekanan minimum hingga sekitar -21,83 Pa, yang menandakan peningkatan *pressure drop* pada sisi udara. Selain itu, karakteristik aliran menunjukkan percepatan lokal di celah antar *tube* dengan peningkatan kecepatan maksimum dari sekitar 6,71 m/s pada 2 *row* menjadi 7,75 m/s pada 5 *row*, disertai terbentuknya zona *wake* dan *recirculation* yang semakin kompleks pada bagian *downstream*. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah *row* meningkatkan intensitas turbulensi dan pencampuran aliran yang dapat memperkuat perpindahan panas, namun juga meningkatkan resistansi aerodinamis sistem. Dengan demikian, peningkatan jumlah *row* memberikan dampak positif terhadap efektivitas perpindahan panas, tetapi perlu dipertimbangkan secara optimal karena secara bersamaan meningkatkan *pressure drop*, sehingga secara keseluruhan mempengaruhi kinerja termal-hidraulik *heat exchanger*.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada *fin-tube heat exchanger* dengan variasi jumlah *row*, diperoleh bahwa peningkatan jumlah *row* secara nyata memengaruhi kinerja termal-hidraulik pada sisi udara. Ketika jumlah *row* ditingkatkan dari 2 menjadi 5, temperatur udara *outlet* mengalami penurunan yang semakin signifikan dari kisaran sekitar 24–25 °C pada konfigurasi 2 *row*, menjadi 21–23 °C pada 3 *row*, kemudian 20,5–21,5 °C pada 4 *row*, hingga mencapai sekitar 20–21 °C pada 5 *row*, yang menunjukkan bahwa peningkatan luas permukaan perpindahan panas dan waktu kontak aliran udara mampu meningkatkan efektivitas proses pendinginan. Namun demikian, peningkatan jumlah *row* juga menyebabkan kenaikan hambatan aliran yang ditunjukkan oleh meningkatnya tekanan maksimum dari sekitar 16,64 Pa pada 2 *row*, menjadi 22,15 Pa pada 3 *row*, 27,88 Pa pada 4 *row*, dan mencapai sekitar 32,80 Pa pada 5 *row*, sehingga nilai *pressure drop* pada sisi udara semakin besar. Selain itu, karakteristik aliran juga mengalami perubahan yang ditunjukkan oleh peningkatan kecepatan maksimum dari sekitar 6,71 m/s pada konfigurasi 2 *row* menjadi 7,75 m/s pada konfigurasi 5 *row* akibat percepatan aliran pada celah antar *tube* serta terbentuknya fenomena *wake* dan *recirculation* yang semakin kompleks. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah *row* mampu meningkatkan intensitas turbulensi dan pencampuran aliran yang mendukung peningkatan perpindahan panas, tetapi di sisi lain juga meningkatkan resistansi aerodinamis sistem. Berdasarkan peningkatan performa perpindahan panas dan efisiensi aliran udara, konfigurasi 4 *row* dapat dianggap sebagai konfigurasi yang paling optimal dalam penelitian ini. Pada konfigurasi tersebut, penurunan temperatur udara *outlet* telah terjadi secara signifikan sehingga menunjukkan peningkatan efektivitas perpindahan panas, sementara kenaikan *pressure drop* masih berada pada tingkat yang relatif moderat dibandingkan konfigurasi 5 *row*. Dengan demikian, konfigurasi 4 *row* memberikan hasil yang lebih seimbang antara peningkatan performa termal dan efisiensi hidraulik aliran udara pada *fin-tube heat exchanger*. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan adanya *trade-off* antara peningkatan performa perpindahan panas dan kenaikan *pressure drop* pada sisi udara. Penambahan jumlah *row* mampu meningkatkan efektivitas pendinginan, namun juga meningkatkan resistansi aerodinamis sistem. Oleh karena itu, pemilihan jumlah *row* pada *fin coil* perlu dipertimbangkan secara optimal untuk memperoleh keseimbangan antara peningkatan performa perpindahan panas dan kenaikan *pressure drop*, sehingga kinerja keseluruhan *heat exchanger* dapat beroperasi secara lebih efisien.

Berdasarkan hasil dan temuan yang diperoleh, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan sehingga masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, disampaikan beberapa saran yang dapat dipertimbangkan untuk pengembangan penelitian selanjutnya, di antaranya adalah:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan variasi jenis *fin* seperti *louvered fin*, *wavy fin*, atau *helical segmented fin* untuk mengkaji pengaruh bentuk geometri *fin* terhadap karakteristik termal hidraulik secara lebih mendalam. Mengingat setiap jenis *fin* memiliki karakteristik aliran dan mekanisme perpindahan panas yang unik sehingga dapat memberikan wawasan baru dalam optimalisasi desain *fin coil*.
2. Mengeksplorasi penggunaan material alternatif dalam simulasi, seperti tembaga, aluminium alloy, atau material komposit dengan konduktivitas termal yang berbeda-beda, mengingat pengaruh variasi sifat termal material terhadap efisiensi perpindahan panas dan distribusi temperatur pada *fin coil*.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Asim, M. Badiei, M. Mohammad, H. Razali, A. Rajabi, L. C. Haw, and M. J. Ghazali, "Sustainability of Heating, Ventilation and Air-Conditioning (HVAC) Systems in Buildings—An Overview," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 2, p. 1016, 2022, doi: 10.3390/ijerph19021016.
- [2] F. Baharudin, N. F. M. Adlan, J. Kassim, and N. Hamzah, "Effect of Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) System on Indoor Air Quality in a Medical Facility," *J. Sustain. Civ. Eng. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 80–90, 2023, doi: 10.24191/jscet.v2i2.80-90.
- [3] A. Mastrucci, B. van Ruijven, E. Byers, M. Poblete-Cazenave, and S. Pachauri, "Global Scenarios of Residential Heating and Cooling Energy Demand and CO<sub>2</sub> Emissions," *Clim. Change*, vol. 168, no. 3–4, pp. 1–26, 2021, doi: 10.1007/s10584-021-03229-3.
- [4] B. M. Ali and M. Akkas, "The Green Cooling Factor: Eco-Innovative Heating, Ventilation, and Air Conditioning Solutions in Building Design," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 1, p. 195, 2024, doi: 10.3390/app14010195.
- [5] A. Patel, "Heat Exchangers in Industrial Applications: Efficiency and Optimization Strategies," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 12, no. 9, pp. 1–11, 2023, doi: 10.17577/IJERTV12IS090003.
- [6] A. M. Elsaid, A. M. Abdelhady, G. B. Abdelaziz, and M. A. Halim, "Performance Improvement for Chilled Water Air Conditioning Cooling Coils with Various Dimple Fin Geometries," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 193,

- p. 108441, 2023, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2023.108441.
- [7] A. Saleem and M. H. Kim, "Airside Thermal Performance of Louvered Fin Flat-Tube Heat Exchangers with Different Redirection Louvers," *Energies*, vol. 15, no. 16, p. 5904, 2022, doi: 10.3390/en15165904.
- [8] H. Jiang, T. Jiang, H. Tian, Q. Wu, C. Deng, and R. Zhang, "Heat Transfer Simulation and Structural Optimization of Spiral Fin-and-Tube Heat Exchanger," *Electron.*, vol. 13, no. 23, p. 4639, 2024, doi: 10.3390/electronics13234639.
- [9] M. Marcinkowski, D. Taler, J. Sacharczuk, K. Węglarz, and J. Taler, "Innovative Analysis of Local and Average Air-Side Heat Transfer Coefficients in Fin-and-Tube Heat Exchangers Using CFD and Experimental Method," *Energy*, vol. 309, p. 133084, 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.133084.
- [10] G. Bozkula and H. Demir, "Experimental Investigation of Heat Transfer and Pressure Drop of Fin and Tube Heat Exchanger Under Dry and Wet Conditions," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 177, p. 107580, 2022, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107580.
- [11] N. Jing, Y. Xia, Q. Ding, Y. Chen, Z. Wang, and X. Zhang, "Simulation and Optimization Study on the Performance of Fin-and-Tube Heat Exchanger," *Sustain.*, vol. 15, no. 15, p. 11587, 2023, doi: 10.3390/su151511587.
- [12] H. S. Mujtaba, T. Feroze, A. Hanan, and H. A. Shams, "A CFD Investigation of the Design Variables Affecting the Performance of Finned-Tube Heat Exchangers," *J. Therm. Eng.*, vol. 9, no. 4, pp. 1041–1052, 2023, doi: 10.18186/thermal.1333937.
- [13] M. Raje and A. K. Dhiman, "Three-dimensional CFD study on thermo-hydraulic behaviour of finned tubes in a heat exchange system for heat transfer enhancement," vol. 18, no. 6, pp. 931–944, 2023, doi: 10.1515/cppm-2022-0064.
- [14] J. C. W. Huey, C. Tan, W. H. Yap, J. Y. Cheah, E. W. Y. Tien, D. H. Didane, B. Manshoor, and S. A. Elshayeb, "CFD Simulation and Analysis of a Fin and Tube Heat Exchanger: Impact of Air Mass Flow Rate on Thermal Performance," *JDSE J. Des. Sustain. Environ.*, vol. 6, no. 2, pp. 14–22, 2024, [Online]. Available: <http://www.fazpublishing.com/jdse>
- [15] K. Barquín and A. Valencia, "Comparison of Different Fin and Tube Compact Heat Exchanger with Longitudinal Vortex Generator In CFU-CFD Configurations," *Int. J. Heat Technol.*, vol. 39, no. 5, pp. 1523–1531, 2021, doi: 10.18280/IJHT.390514.
- [16] L. B. Erbay, B. Doğan, and M. M. Ozturk, "Numerical Analysis of Thermo-Hydraulic Performance of Flibe Flowing Through a Louvered-Fin Compact Heat Exchanger," *SSRN Electron. J.*, vol. 8300, pp. 1–29, 2022, doi: 10.2139/ssrn.4090280.