

BAB IV

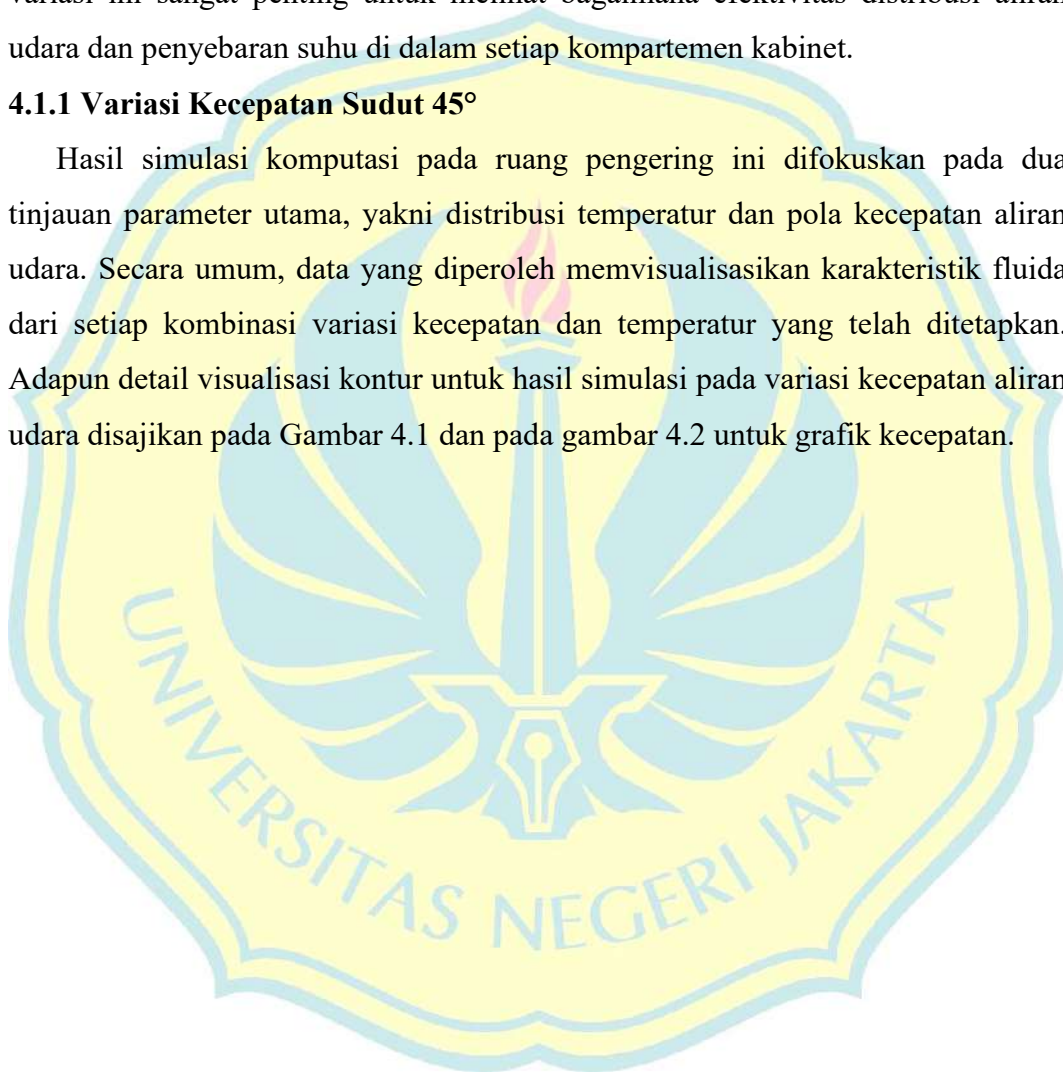
HASIL DAN PEMBAHASAN

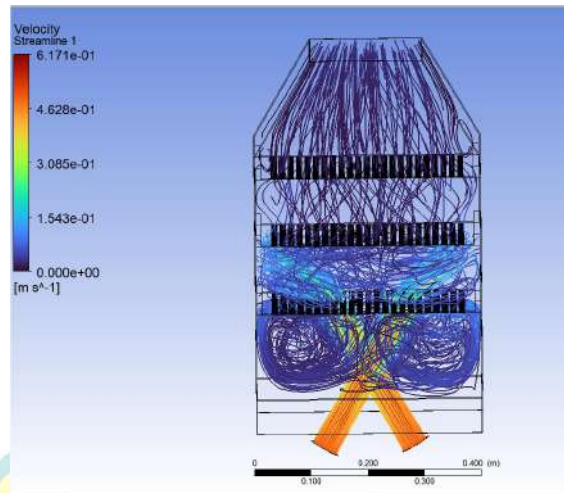
4.1 Hasil Simulasi Sudut 45°

Simulasi ini dilakukan menggunakan variasi sudut apit sebesar 45° dengan menguji tiga variasi kecepatan aliran udara, yaitu 0,5 m/s, 1 m/s, dan 1,5 m/s, yang masing-masing diterapkan pada kondisi suhu 50°C dan 60°C. Pengamatan terhadap variasi ini sangat penting untuk melihat bagaimana efektivitas distribusi aliran udara dan penyebaran suhu di dalam setiap kompartemen kabinet.

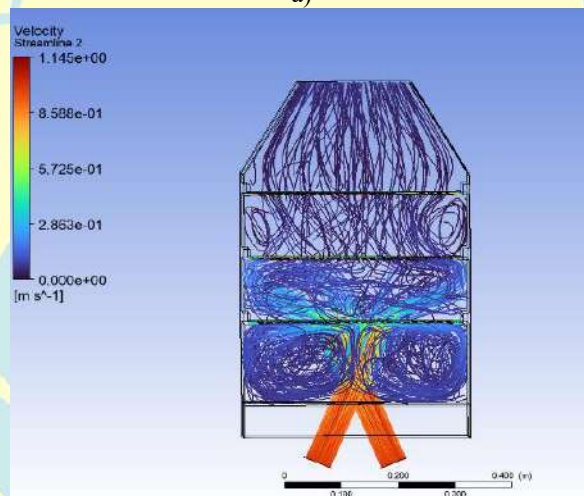
4.1.1 Variasi Kecepatan Sudut 45°

Hasil simulasi komputasi pada ruang pengering ini difokuskan pada dua tinjauan parameter utama, yakni distribusi temperatur dan pola kecepatan aliran udara. Secara umum, data yang diperoleh memvisualisasikan karakteristik fluida dari setiap kombinasi variasi kecepatan dan temperatur yang telah ditetapkan. Adapun detail visualisasi kontur untuk hasil simulasi pada variasi kecepatan aliran udara disajikan pada Gambar 4.1 dan pada gambar 4.2 untuk grafik kecepatan.

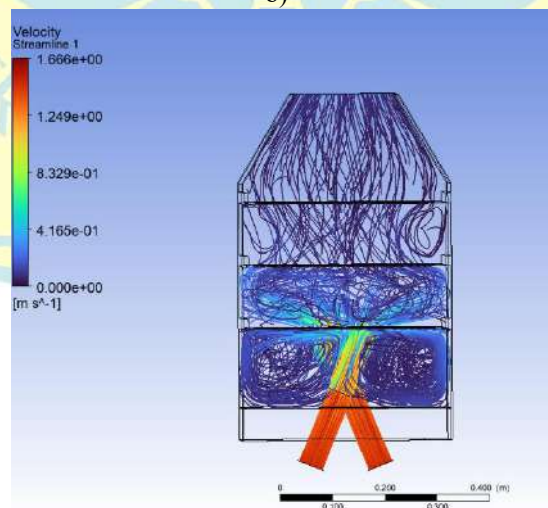




a)

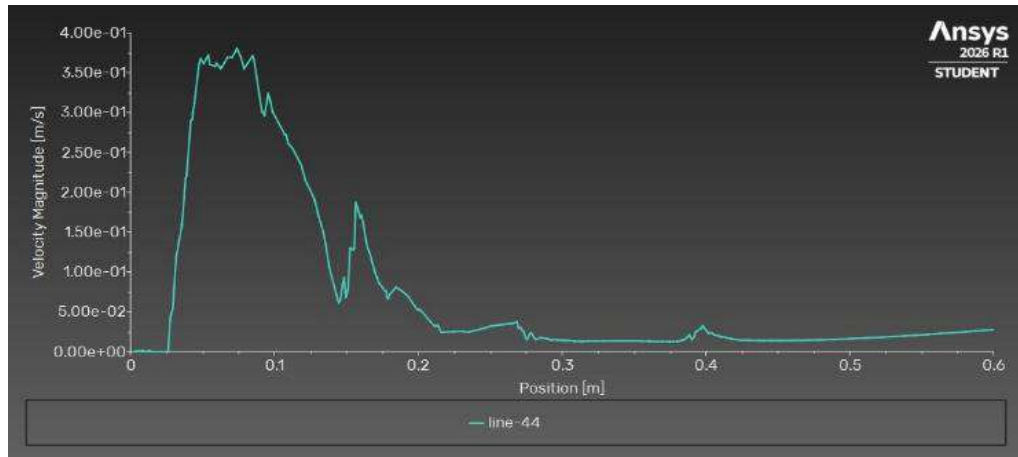


b)

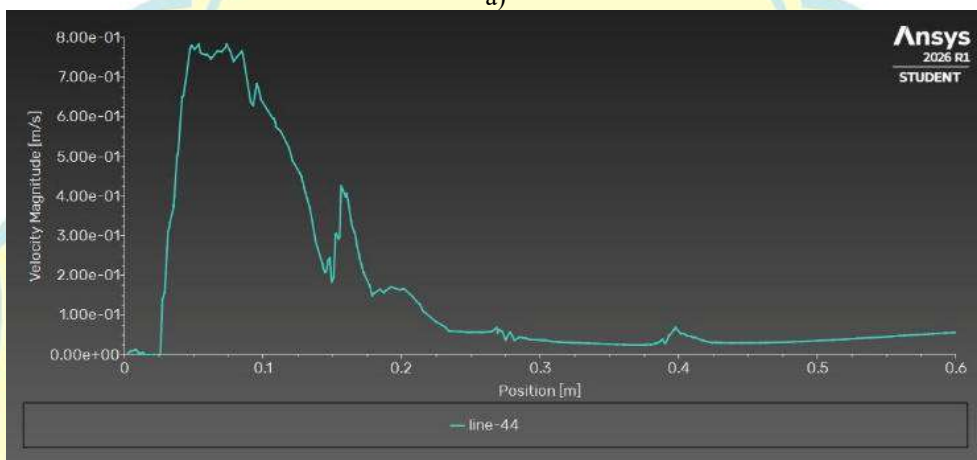


c)

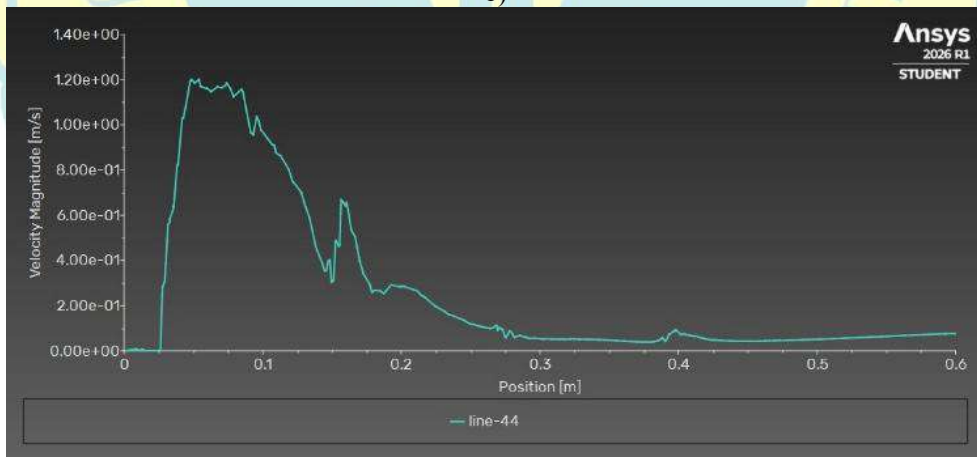
Gambar 4.1 Hasil Simulasi Kecepatan Aliran sudut 45°, kecepatan a) 0,5 m/s, b) 1 m/s, c) 1,5 m/s



a)



b)



c)

Gambar 4.2 Grafik Hasil *plot over line* Kecepatan Terhadap Sumbu XY pada Sudut 45°, kecepatan a) 0,5 m/s, b) 1 m/s, c) 1,5 m/s

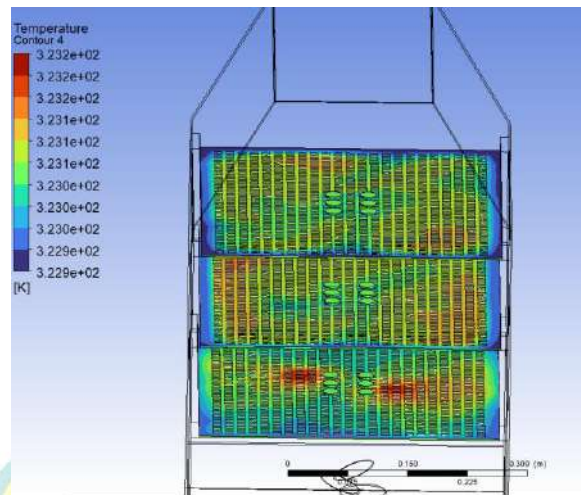
Berdasarkan visualisasi garis arus (*streamline*) pada gambar 4.1, aliran udara pada ketiga variasi kecepatan awal (0,5 m/s, 1 m/s, dan 1,5 m/s) terbukti mampu menembus susunan hambatan dan menyebar hingga mencapai kompartemen teratas. Hal ini menunjukkan bahwa desain *cabinet dryer* dengan *inlet* pipa silang

bersudut 45 derajat ini mampu mendistribusikan fluida secara menyeluruh tanpa menyisakan area hampa sirkulasi (*dead zone*) absolut di dalam ruang pengeringan. Akan tetapi, visualisasi warna pada garis arus menunjukkan adanya penurunan kecepatan yang signifikan seiring pergerakan udara ke atas. Pada variasi 0,5 m/s, kecepatan maksimal (warna merah) hanya terpusat pada celah sempit di antara pipa silang. Setelah melewati area tersebut dan membentuk pusaran di kompartemen bawah, aliran udara melambat secara drastis. Dominasi warna biru tua di kompartemen tengah dan atas merepresentasikan bahwa meskipun udara berhasil mengalir ke rak atas, kecepatannya telah menurun mendekati angka 0 m/s. Peningkatan kecepatan menjadi 1 m/s dan 1,5 m/s memberikan jangkauan daya dorong yang lebih baik di kompartemen bawah, namun secara umum tetap mengalami pola perlambatan serupa saat mencapai kompartemen teratas.

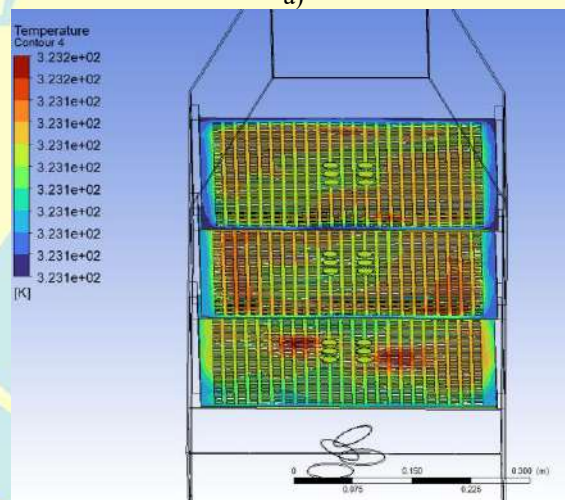
Pada gambar 4.2, fenomena visual tersebut terkonfirmasi secara kuantitatif melalui pembacaan grafik kecepatan pada garis pengamatan vertikal dari bawah ke atas kabinet. Pada rentang ketinggian 0,05 m hingga 0,2 m, hembusan udara mengalami akselerasi dan fluktuasi karena melewati pipa silang. Fluida harus mendesak masuk dan mengikuti celah-celah kecil pada susunan *tray* (rak) berlubang di setiap tingkatannya. Adanya luasan celah yang terbatas pada *tray* berlubang tersebut yang juga sebagian permukaannya tertutupi oleh objek irisan kunyit memberikan hambatan fisik yang berulang. Akibatnya, sebagian besar daya dorong hembusan kipas tertahan dan kurva grafik kecepatan menurun drastis menjadi sangat lambat seiring dengan semakin tingginya rak yang harus dilewati oleh udara.

4.1.2 Variasi Temperatur Sudut 45°

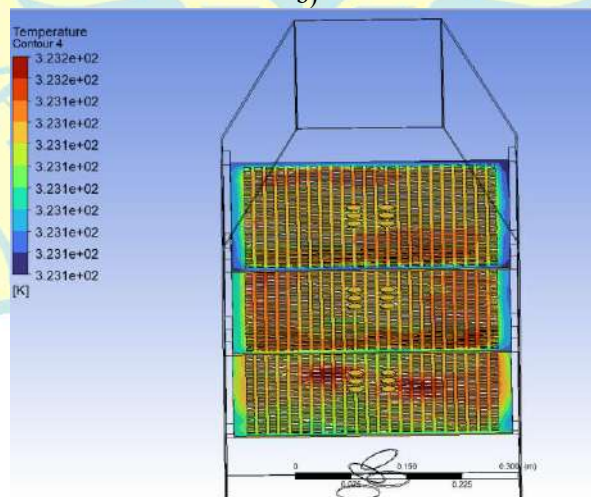
Selain menyajikan profil kecepatan, simulasi menggunakan Ansys Fluent juga mampu memvisualisasikan pola distribusi temperatur. Hasil pemodelan tersebut dapat diamati secara lebih jelas pada gambar 4.3 untuk suhu 50°C dan Gambar 4.5 untuk suhu 60°C. Untuk grafik temperatur berada pada gambar 4.4 untuk suhu 50°C dan Gambar 4.6 untuk suhu 60°C.



a)

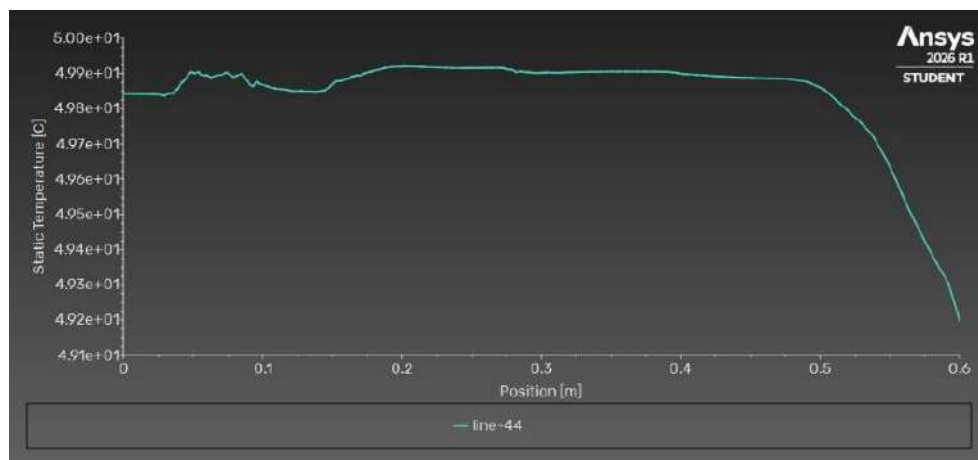


b)

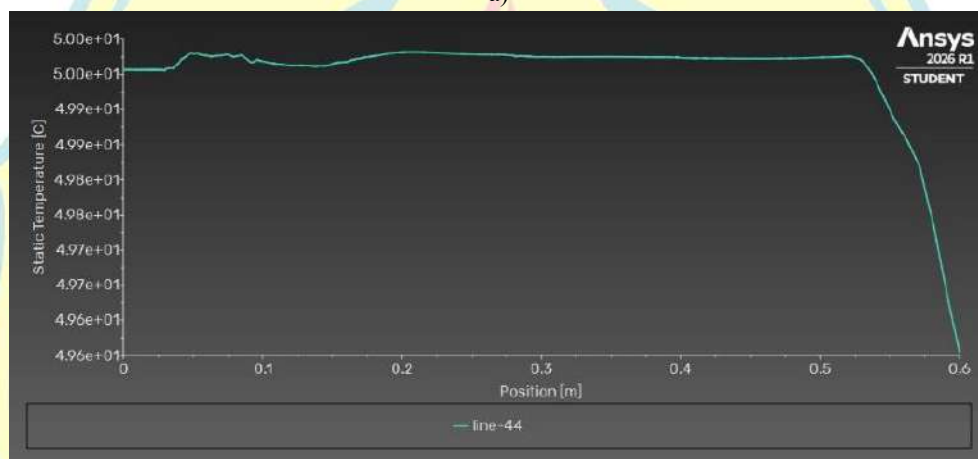


c)

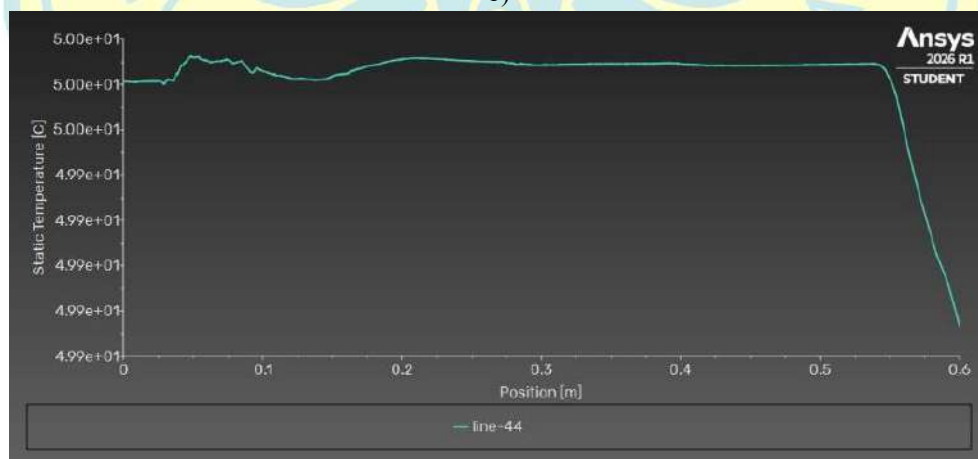
Gambar 4.3 Hasil Simulasi Temperatur sudut 45° Suhu 50°C Kecepatan a) 0,5 m/s, b) 1 m/s, c) 1,5 m/s



a)

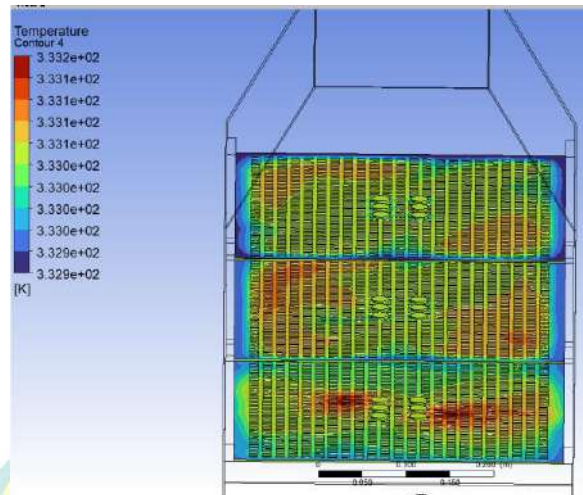


b)

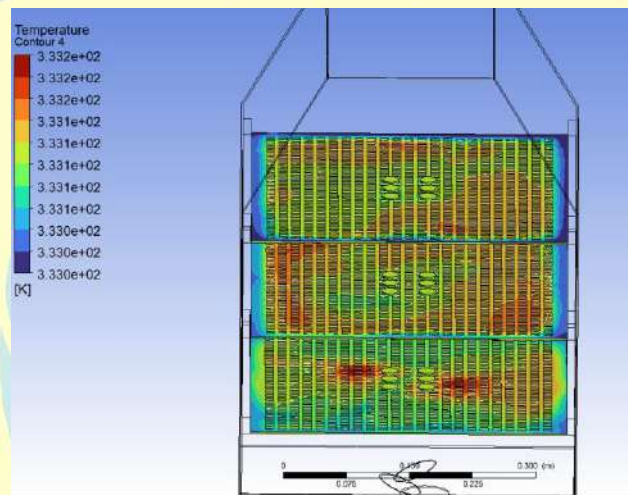


c)

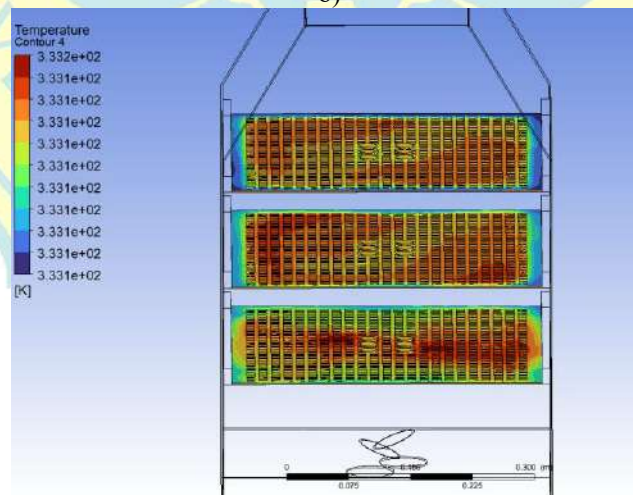
Gambar 4.4 Grafik Hasil *plot over line* Temperatur Terhadap Sumbu XY pada Sudut 45° , Suhu 50°C dan Kecepatan a) 0,5 m/s, b) 1 m/s, c) 1,5 m/s



a)

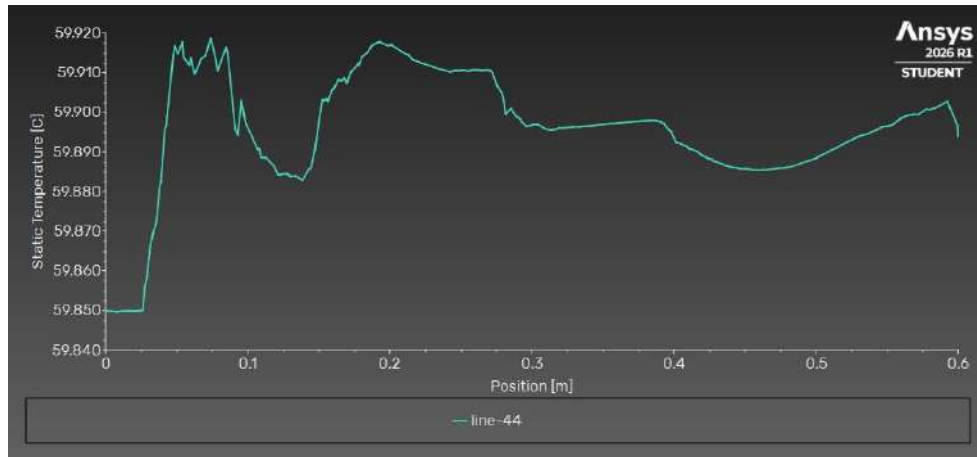


b)

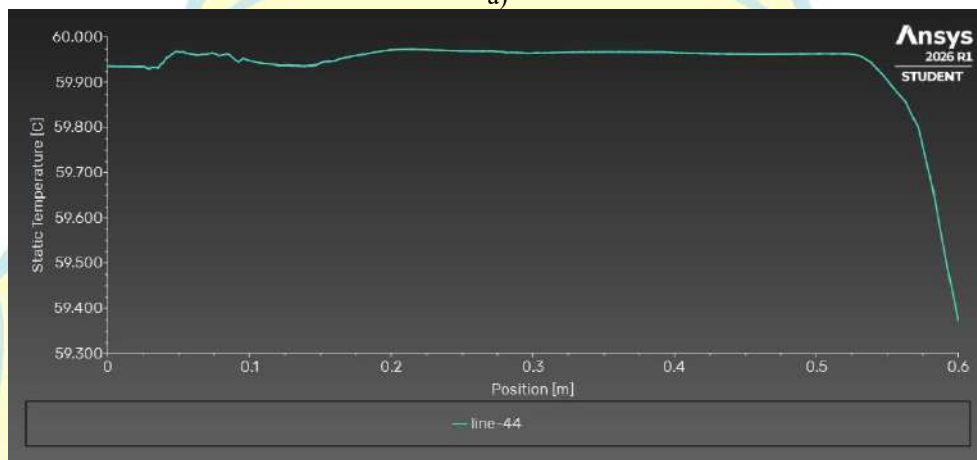


c)

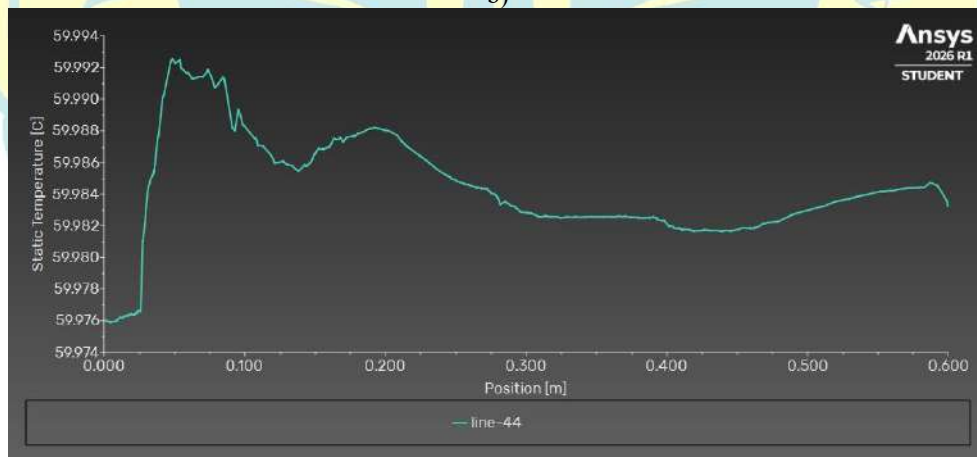
Gambar 4.5 Hasil Simulasi Temperatur sudut 45° Suhu 60°C Kecepatan a) $0,5\text{ m/s}$, b) 1 m/s , c) $1,5\text{ m/s}$



a)



b)



c)

Gambar 4.6 Grafik Hasil *plot over line* Temperatur Terhadap Sumbu XY pada Sudut 45°, Suhu 60°C dan Kecepatan a) 0,5 m/s, b) 1 m/s, c) 1,5 m/s

Simulasi termal pada suhu operasional 50°C (Gambar 4.3 dan 4.4) menunjukkan performa yang sangat stabil pada seluruh variasi kecepatan. Berdasarkan grafik *plot over line* pada gambar 4.4, kurva temperatur ketiga variasi kecepatan terlihat datar di kisaran 50°C dari rak bawah hingga atas, yang

membuktikan bahwa panas terdistribusi secara merata tanpa fluktuasi berarti akibat hambatan tray berlubang.

Sebaliknya, kondisi termal yang dinamis terlihat ketika suhu operasional dinaikkan menjadi 60°C (gambar 4.5 dan 4.6). Pada kecepatan ekstrem 0,5 m/s dan 1,5 m/s (gambar 4.6a dan 4.6c), grafik temperatur menunjukkan fluktuasi naik turun yang tajam di sepanjang jalur vertikal kabinet. Fluktuasi ini dipicu oleh lemahnya momentum dorong pada kecepatan 0,5 m/s yang menyebabkan penumpukan panas, serta tingginya turbulensi pada kecepatan 1,5 m/s yang membuat sebaran panas menjadi tidak teratur.

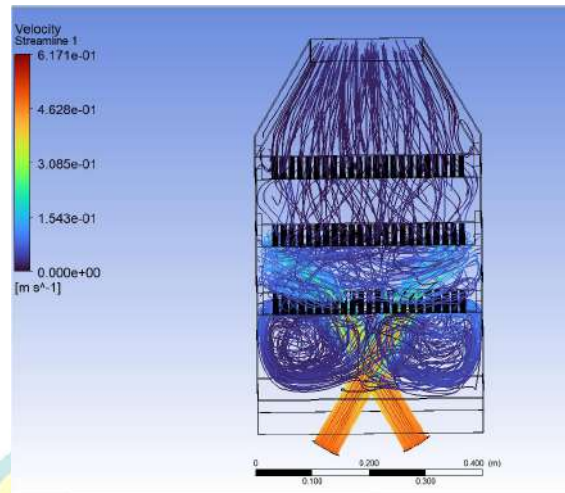
Namun, ketidakstabilan tersebut berhasil diredam pada variasi kecepatan 1 m/s (gambar 4.6b). Grafik temperatur pada kecepatan 1 m/s menunjukkan kurva yang paling stabil dan datar di seluruh tingkat rak. Hal ini mengonfirmasi bahwa kombinasi parameter operasional terbaik untuk desain cabinet dryer bersudut 45° tercapai pada suhu 60°C dengan kecepatan 1 m/s, di mana laju sirkulasi udara terbukti paling optimal dalam menyeimbangkan hambatan tray berlubang sekaligus mempertahankan kestabilan termal yang seragam untuk pengeringan kunyit.

4.2 Hasil Simulasi Sudut 60°

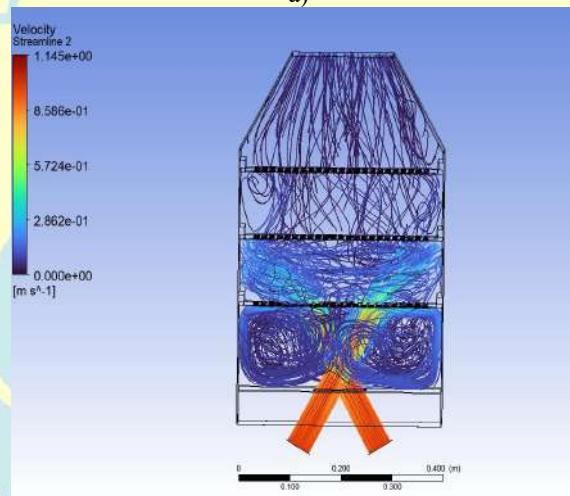
Simulasi ini dilakukan menggunakan variasi sudut apit sebesar 60° dengan menguji tiga variasi kecepatan aliran udara, yaitu 0,5 m/s, 1 m/s, dan 1,5 m/s, yang masing-masing diterapkan pada kondisi suhu 50°C dan 60°C . Pengamatan terhadap variasi ini sangat penting untuk melihat bagaimana efektivitas distribusi aliran udara dan penyebaran suhu di dalam setiap kompartemen kabinet.

4.2.1 Variasi Kecepatan Sudut 60°

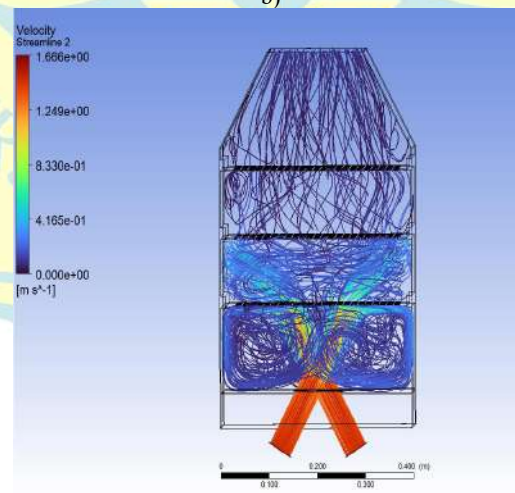
Visualisasi distribusi aliran udara di dalam ruang kabinet diperoleh melalui simulasi numerik menggunakan perangkat lunak Ansys. Karakteristik penyebaran udara pada variasi sudut apit 60° secara spesifik disajikan pada gambar 4.7 untuk visualisasi kontur untuk hasil simulasi pada variasi kecepatan dan gambar 4.8 untuk grafik kecepatan.



a)

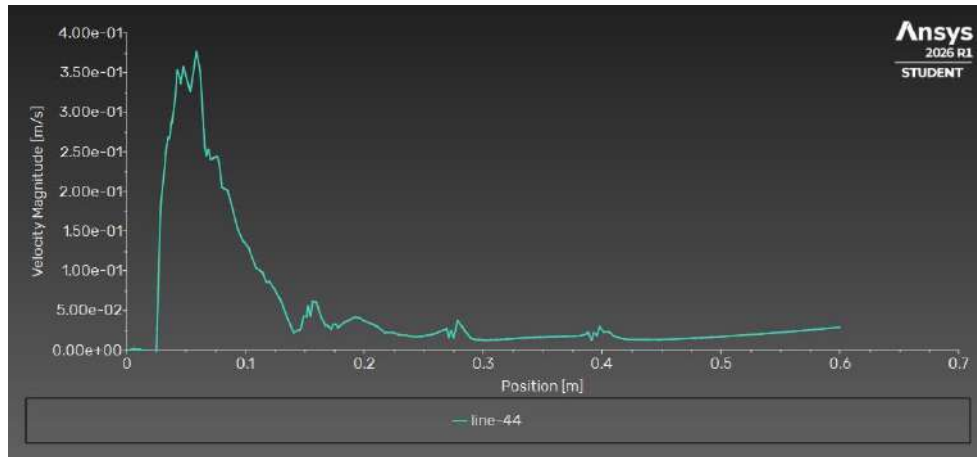


b)

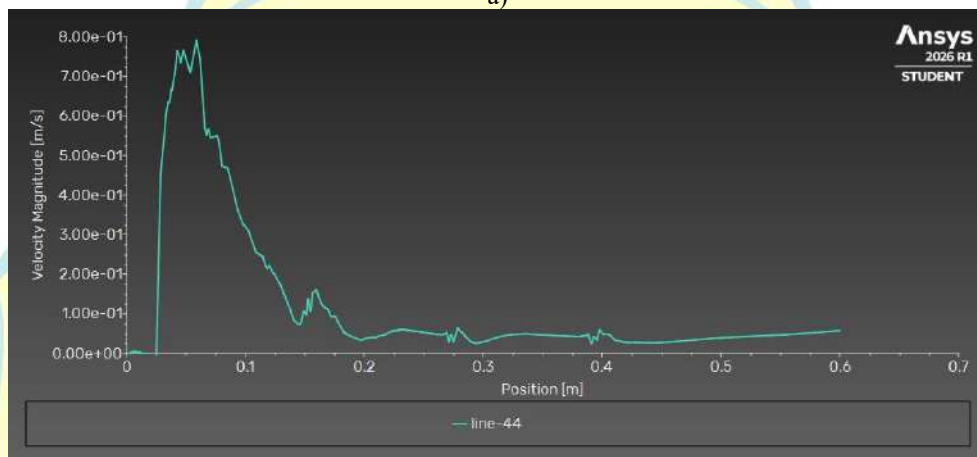


c)

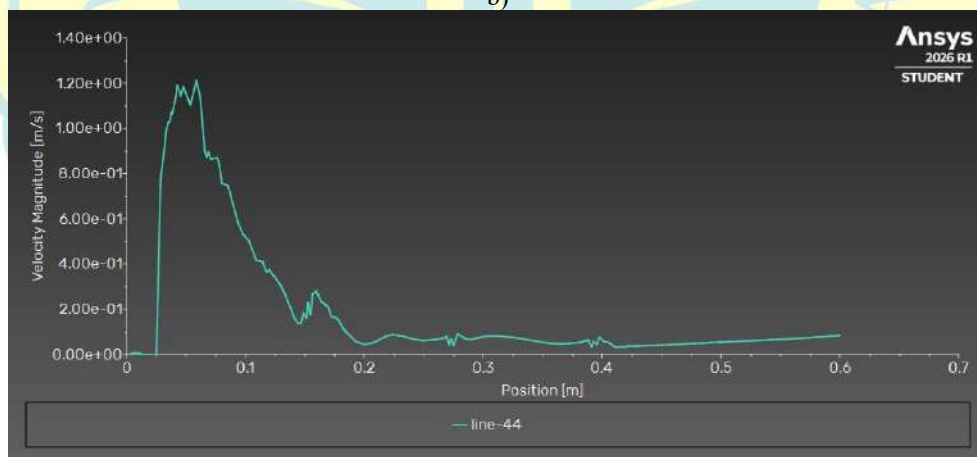
Gambar 4.7 Hasil Simulasi Kecepatan sudut 60° Suhu, kecepatan a) 0,5 m/s, b) 1 m/s, c) 1,5 m/s



a)



b)



c)

Gambar 4.8 Grafik Hasil *plot over line* Kecepatan Terhadap Sumbu XY pada Sudut 60° , kecepatan a) 0,5 m/s, b) 1 m/s, c) 1,5 m/s

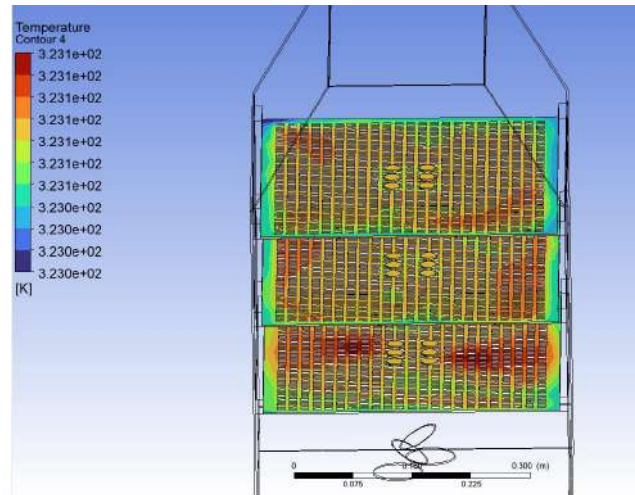
Visualisasi distribusi aliran udara pada gambar 4.7 menunjukkan bahwa konfigurasi pipa silang dengan sudut apit 60° menghasilkan karakteristik pola aliran yang konsisten melintasi ketiga variasi kecepatan *inlet*, yaitu 0,5 m/s, 1 m/s, dan 1,5 m/s. Aliran udara yang melewati pipa silang memicu terbentuknya zona resirkulasi

pada kompartemen dasar yang secara mekanis bermanifestasi sebagai *vortex*, namun tetap mengizinkan sebagian besar aliran utama untuk menembus naik ke rak-rak di atasnya. Peningkatan kecepatan *inlet* tidak merubah struktur dasar dari pola aliran tersebut secara mekanis, melainkan hanya meningkatkan magnitudo kecepatan distribusinya. Hal ini terlihat jelas dari perluasan area gradasi warna hijau dan kuning pada kecepatan 1,5 m/s, yang mengindikasikan bahwa aliran udara memiliki momentum yang lebih besar untuk menjangkau area atas ruang pengering dibandingkan pada variasi kecepatan 0,5 m/s yang lebih didominasi oleh warna biru tua.

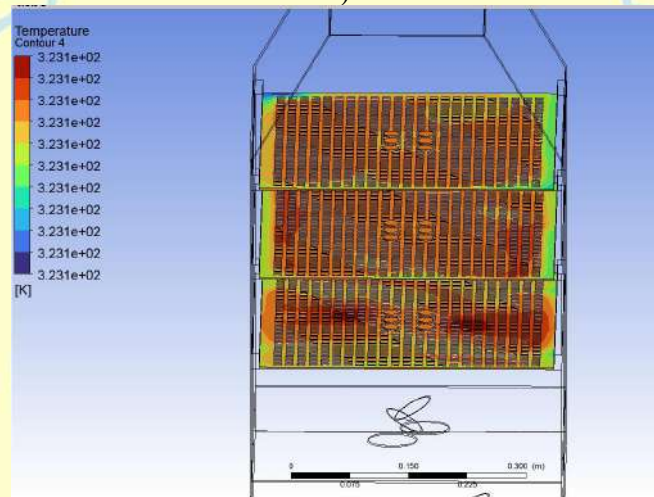
Karakteristik penyebaran udara ini divalidasi lebih lanjut secara numerik melalui grafik hasil *plot over line* pada gambar 4.8. Ketiga kurva kecepatan menunjukkan profil yang identik, ditandai dengan adanya lonjakan kecepatan awal yang sedikit melebar saat udara melewati area pipa silang dan zona *vortex* di bagian bawah kabinet. Setelah melewati titik puncak, kecepatan udara perlahan menurun namun tidak merosot secara drastis menjadi statis. Adanya fluktuasi kecil yang stabil di sepanjang sisa jarak pengukuran pada grafik membuktikan bahwa momentum dorong dari aliran udara tetap terjaga. Kondisi ini menegaskan bahwa sudut 60° mampu mencegah energi aliran terpecah dan terperangkap sepenuhnya di dalam pusaran *vortex* bawah, sehingga udara panas tetap dapat terdistribusi secara berkesinambungan menyapu seluruh luasan vertikal hingga mencapai rak teratas.

4.2.2 Variasi Temperatur Sudut 60°

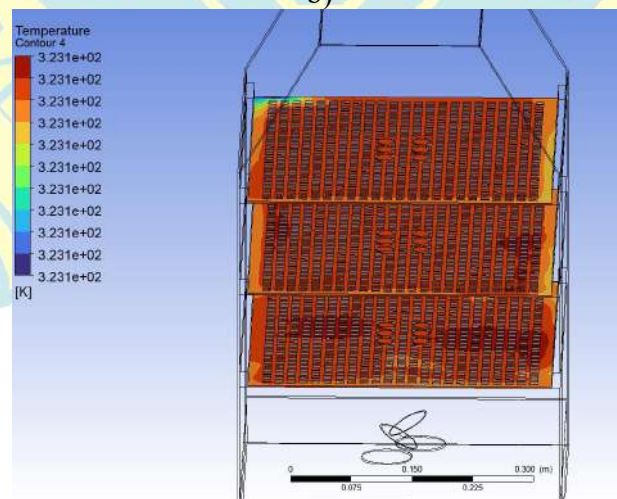
Selain menyajikan profil kecepatan, simulasi menggunakan Ansys Fluent juga mampu memvisualisasikan pola distribusi temperatur. Hasil pemodelan tersebut dapat diamati secara lebih jelas pada gambar 4.9 untuk suhu 50°C dan gambar 4.11 untuk suhu 60°C . Untuk grafik temperatur berada pada gambar 4.10 untuk suhu 50°C dan gambar 4.12 untuk suhu 60°C .



a)

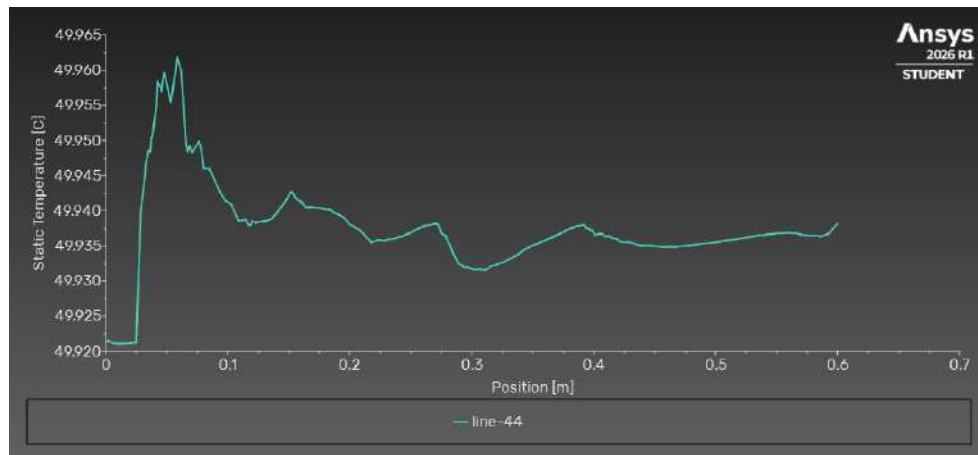


b)

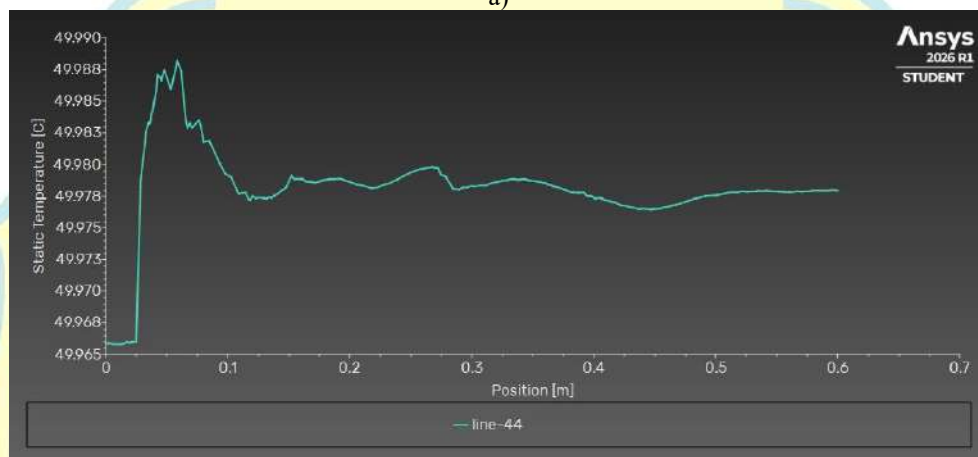


c)

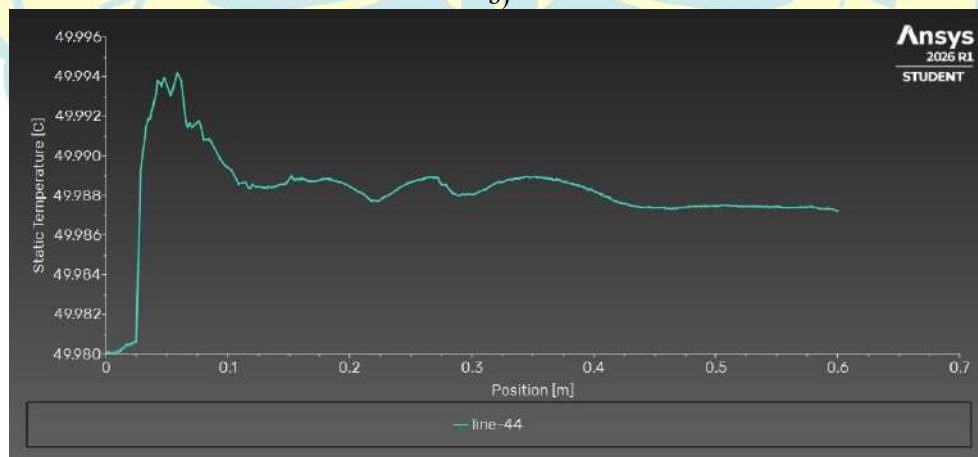
Gambar 4.9 Hasil Simulasi Temperatur sudut 60° Suhu 50°C Kecepatan a) $0,5 \text{ m/s}$, b) 1 m/s c) $1,5 \text{ m/s}$



a)

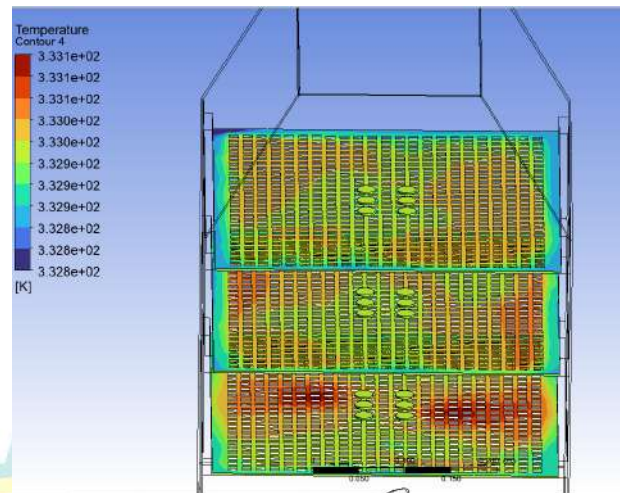


b)

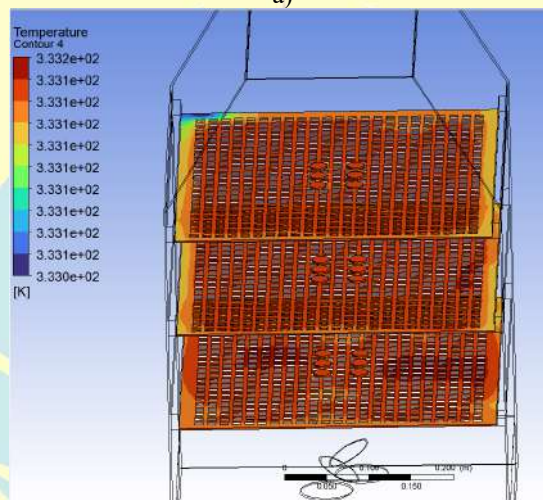


c)

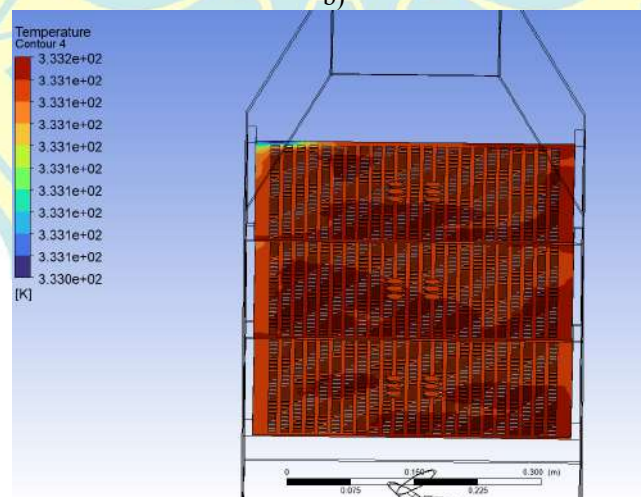
Gambar 4.10 Grafik Hasil *plot over line* Temperatur Terhadap Sumbu XY pada Sudut 60°, Suhu 50°C dan Kecepatan a) 0,5 m/s, b) 1 m/s, c) 1,5 m/s



a)

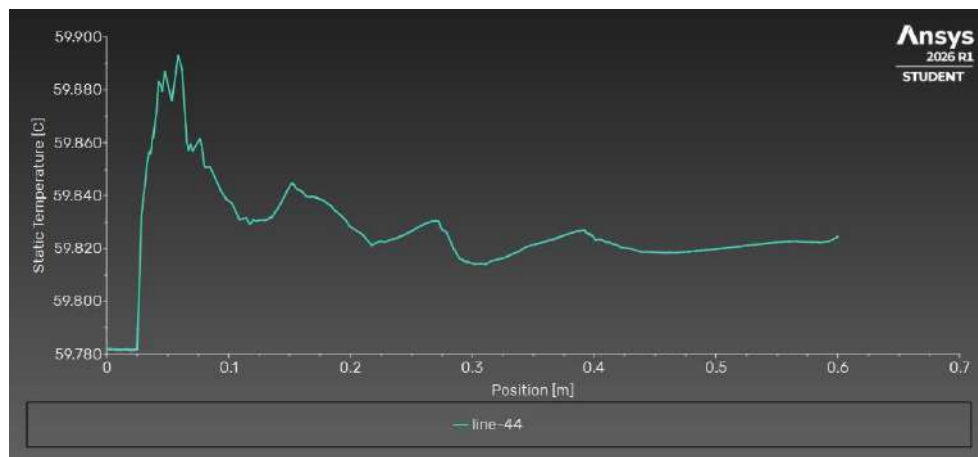


b)

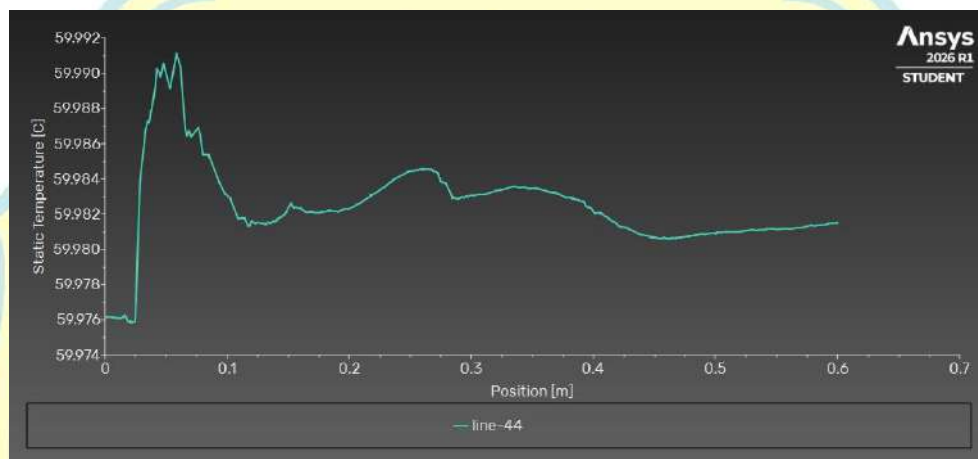


c)

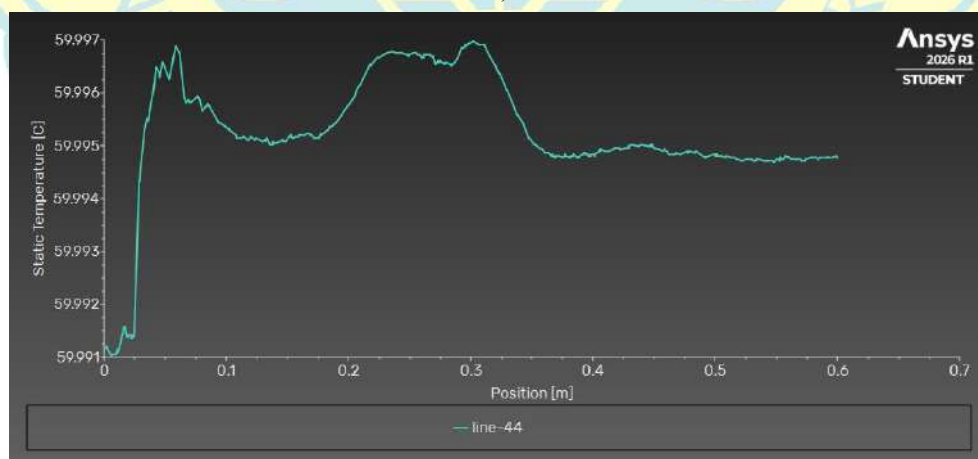
Gambar 4.11 Hasil Simulasi Temperatur sudut 60° Suhu 60°C Kecepatan a) $0,5\text{ m/s}$, b) 1 m/s , c) $1,5\text{ m/s}$



a)



b)



c)

Gambar 4.12 Grafik Hasil *plot over line* Temperatur Terhadap Sumbu XY pada Sudut 60°, Suhu 60°C dan Kecepatan a) 0,5 m/s, b) 1 m/s, c) 1,5 m/s

Visualisasi kontur temperatur pada suhu *inlet* 50°C (gambar 4.9) memperlihatkan bahwa peningkatan kecepatan aliran udara berbanding lurus dengan jangkauan pemerataan panas di dalam kabinet. Pada kecepatan 0,5 m/s

(gambar 4.9a), persebaran panas yang ditunjukkan oleh gradasi warna merah dan oranye masih cenderung terkonsentrasi pada kompartemen bagian bawah. Namun, ketika kecepatan ditingkatkan hingga 1,5 m/s (gambar 4.9c), energi termal mampu menembus dan terdistribusi jauh lebih merata hingga menyentuh area rak teratas. Karakteristik ini didukung oleh grafik *plot over line* pada gambar 4.10, di mana kurva profil suhu pada kecepatan tinggi mampu mempertahankan nilai temperatur yang lebih stabil melintasi luasan vertikal kabinet setelah melewati lonjakan awal di area zona resirkulasi bawah.

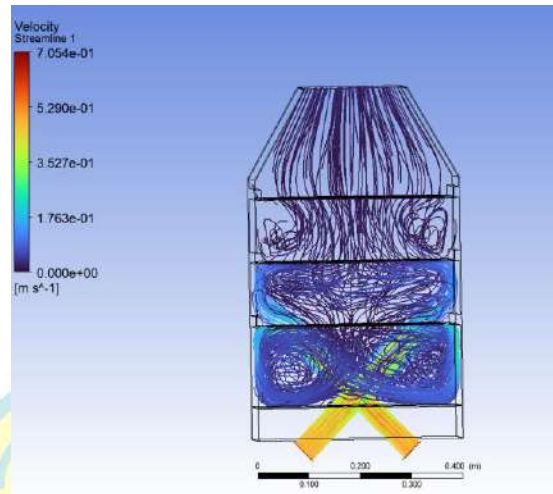
Tren distribusi termal yang identik juga teramati secara konsisten pada pengujian dengan suhu inlet 60°C (gambar 4.11). Peningkatan kecepatan udara masukan secara signifikan memperluas area penetrasi panas. Secara spesifik, kombinasi suhu masuk 60°C dengan kecepatan 1,5 m/s (gambar 4.11c) menghasilkan distribusi temperatur yang paling masif dan homogen. Hal ini ditandai secara visual oleh dominasi warna merah pekat yang menyelimuti hampir seluruh tingkatan rak di dalam ruang pengering. Validasi kuantitatif pada gambar 4.12 (grafik c) mengonfirmasi kondisi tersebut, di mana kurva temperatur menunjukkan kemampuan retensi panas yang sangat baik dengan menjaga fluktuasi nilai suhu tetap tinggi di sepanjang sumbu pengukuran jika dibandingkan dengan variasi kecepatan yang lebih rendah.

4.3 Hasil Simulasi Sudut 90°

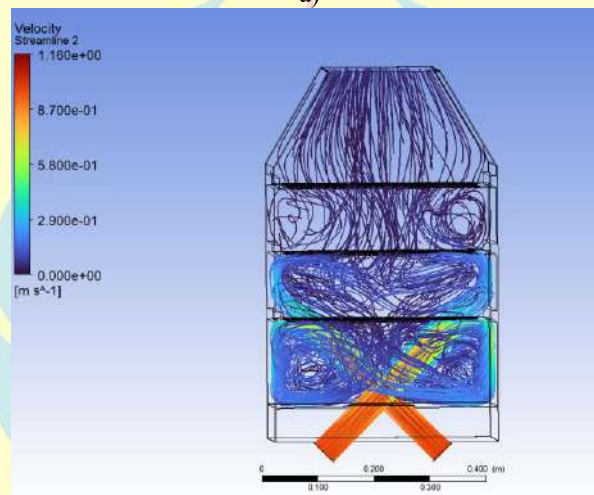
Simulasi ini dilakukan menggunakan variasi sudut apit sebesar 90° dengan menguji tiga variasi kecepatan aliran udara, yaitu 0,5 m/s, 1 m/s, dan 1,5 m/s, yang masing-masing diterapkan pada kondisi suhu 50°C dan 60°C. Pengamatan terhadap variasi ini sangat penting untuk melihat bagaimana efektivitas distribusi aliran udara dan penyebaran suhu di dalam setiap kompartemen kabinet.

4.3.1 Variasi Kecepatan Sudut 90°

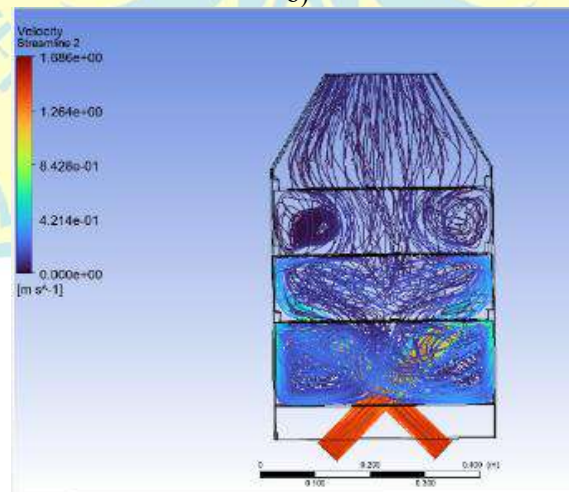
Visualisasi distribusi aliran udara di dalam ruang kabinet diperoleh melalui simulasi numerik menggunakan perangkat lunak Ansys. Karakteristik penyebaran udara pada variasi sudut apit sebesar 90° secara spesifik disajikan pada Gambar 4.13 untuk suhu 50°C dan Gambar 4.14 untuk suhu 60°C.



a)

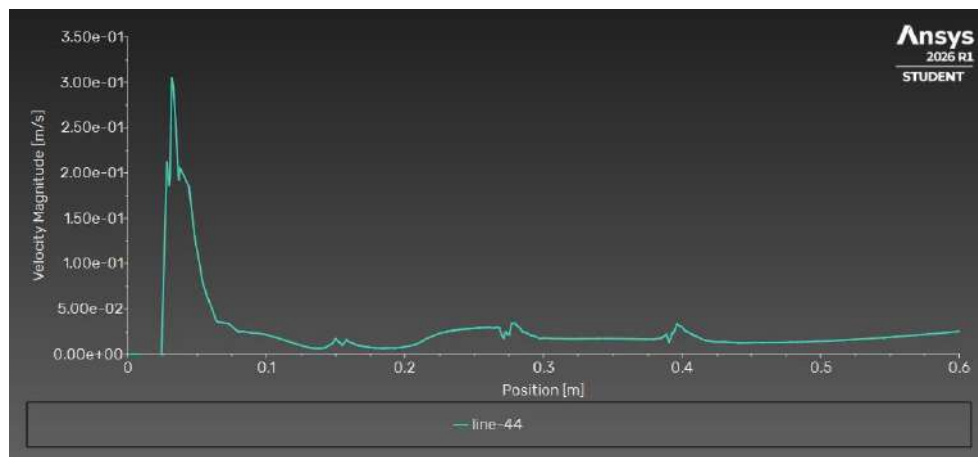


b)

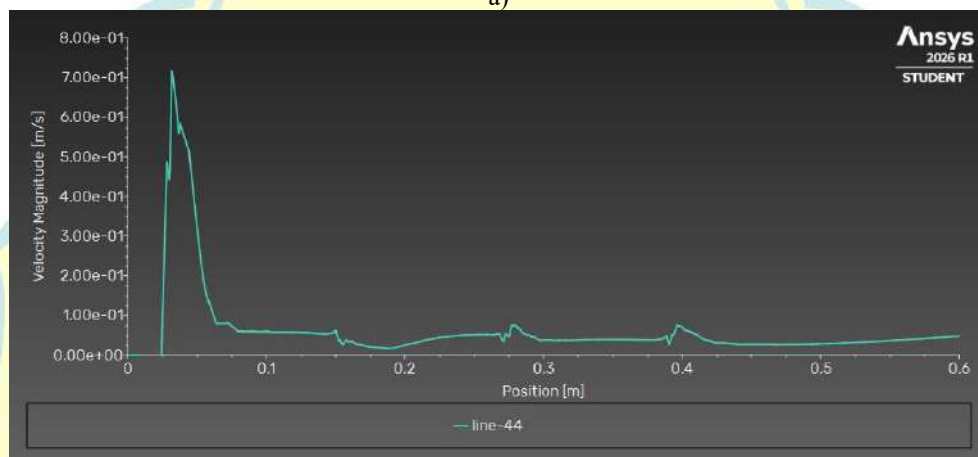


c)

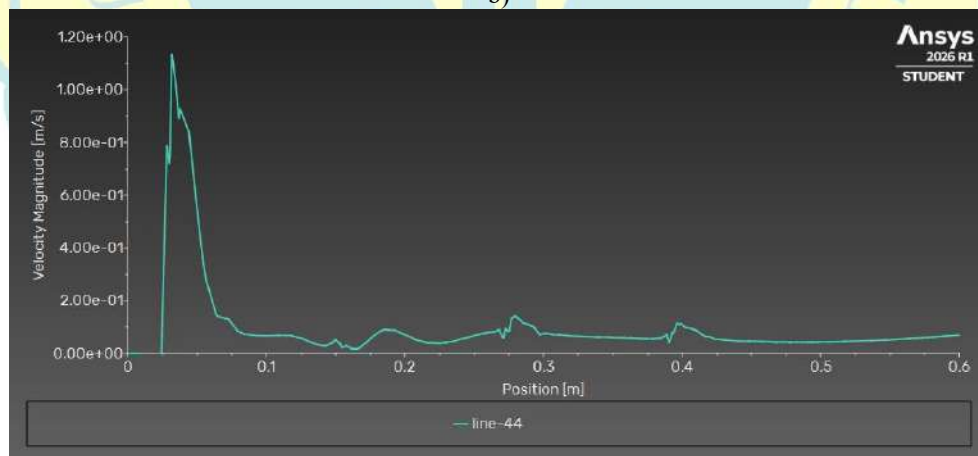
Gambar 4.13 Hasil Simulasi Kecepatan sudut 90°, kecepatan a) 0,5 m/s, b) 1 m/s, c) 1,5 m/s



a)



b)



c)

Gambar 4.14 Grafik Hasil *plot over line* Kecepatan Terhadap Sumbu XY pada Sudut 90°, kecepatan a) 0,5 m/s, b) 1 m/s, c) 1,5 m/s

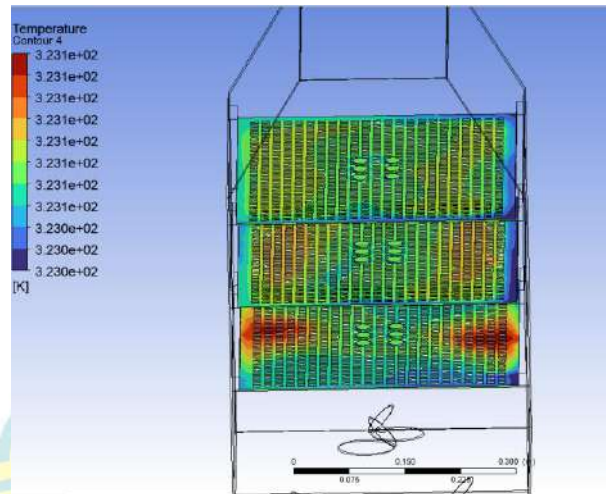
Visualisasi distribusi aliran udara pada gambar 4.13 mengilustrasikan secara jelas interaksi aliran fluida terhadap konfigurasi pipa silang dengan sudut apit 90°. Pada ketiga variasi kecepatan masukan, yaitu 0,5 m/s, 1 m/s, dan 1,5 m/s 0,5 m/s, terlihat formasi zona resirkulasi atau *vortex* berskala masif yang mendominasi

kompartemen bagian bawah dan tengah kabinet. Geometri hambatan yang menyudut tajam ini berfungsi secara efektif memecah aliran udara, memaksa sebagian besar fluida untuk berputar secara agresif dan menciptakan pola aliran berliku yang sangat terdefinisi. Peningkatan kecepatan masukan hingga 1,5 m/s (gambar 4.13c) tidak merubah bentuk dasar pusaran ini, melainkan secara signifikan meningkatkan intensitas turbulensi di dalam *vortex* tersebut, yang secara visual ditandai dengan peningkatan sebaran warna biru muda hingga kuning di area resirkulasi.

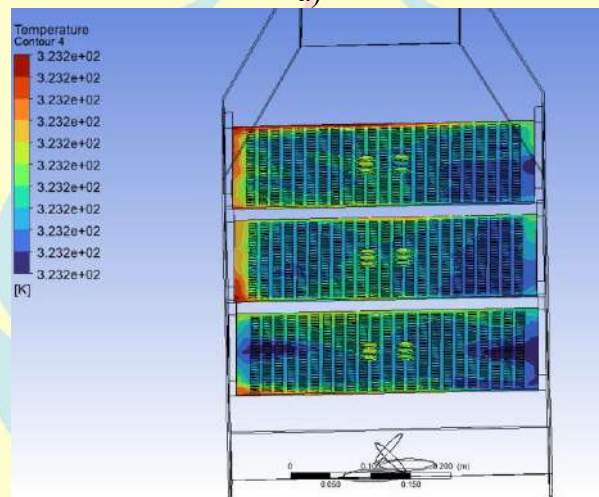
Perilaku aliran ini dikonfirmasi secara kuantitatif melalui grafik hasil *plot over line* kecepatan pada Gambar 4.14. Ketiga kurva menampilkan profil yang khas saat aliran fluida dipecah oleh pipa silang dengan sudut apit 90° , di mana terjadi lonjakan kecepatan vertikal yang sangat tajam di titik awal (tepat saat udara melewati pipa). Namun, sesaat setelah melewati titik puncak tersebut, kecepatan udara mengalami penurunan yang sangat drastis dan garis grafik cenderung menjadi datar pada sisa jarak pengukuran di sumbu X. Penurunan ekstrem ini membuktikan bahwa momentum dorong vertikal dari aliran utama telah terkonsumsi secara masif dan terkonversi menjadi energi kinetik turbulen yang membentuk *vortex* di kompartemen bawah.

4.3.2 Variasi Temperatur Sudut 90°

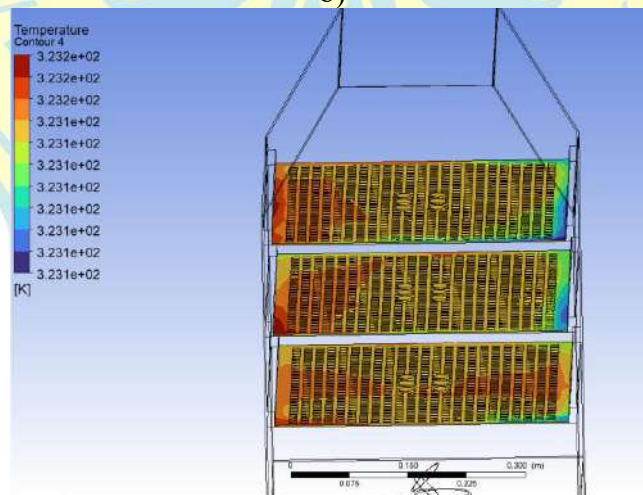
Di samping memetakan profil kecepatan aliran, simulasi dengan Ansys Fluent juga memfasilitasi visualisasi terhadap pola sebaran temperatur di dalam ruang pengering. Hasil pemodelan tersebut dapat diamati secara lebih jelas pada gambar 4.15 untuk suhu 50°C dan gambar 4.17 untuk suhu 60°C . Untuk grafik temperatur berada pada gambar 4.16 untuk suhu 50°C dan gambar 4.18 untuk suhu 60°C .



a)

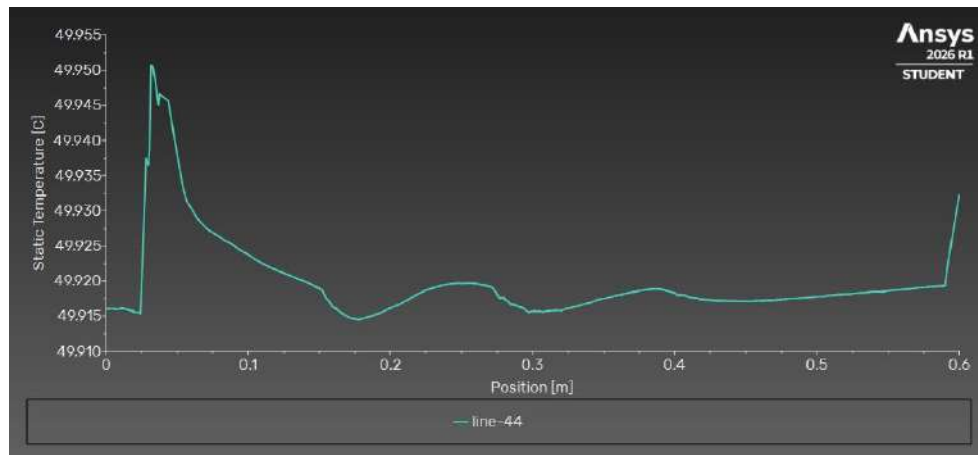


b)

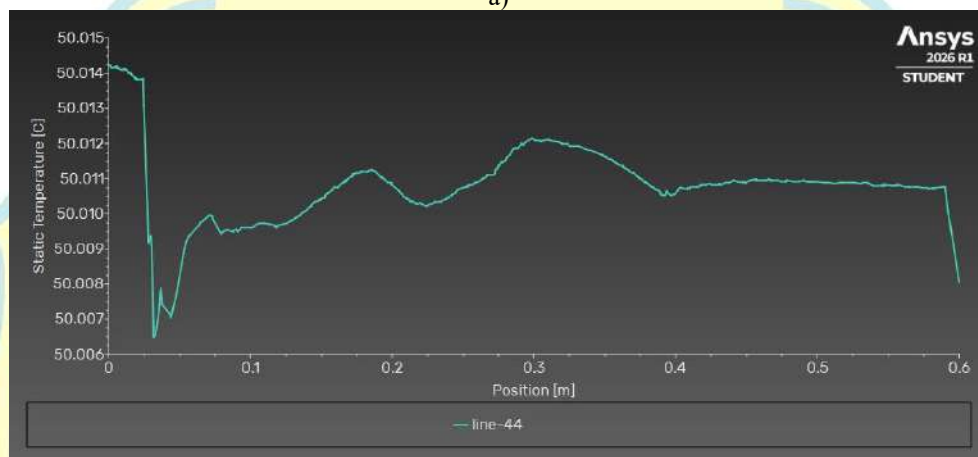


c)

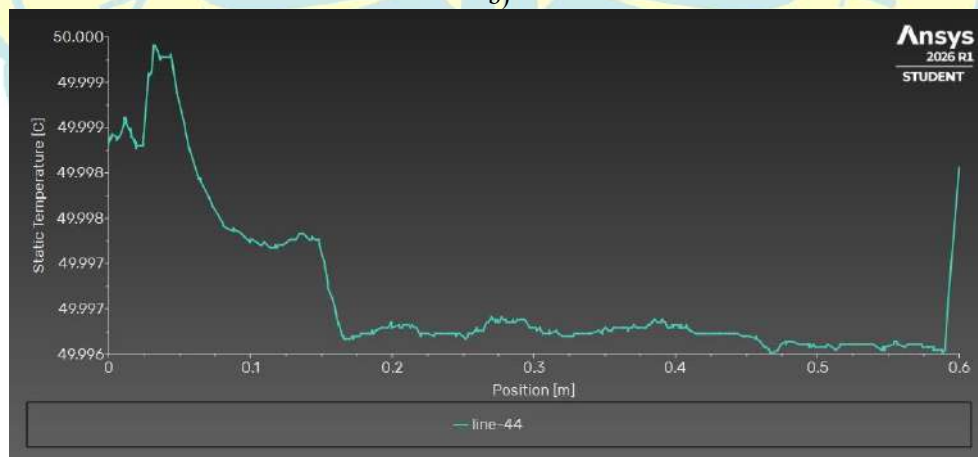
Gambar 4.15 Hasil Simulasi Temperatur sudut 90° Suhu 50°C Kecepatan a) 0,5 m/s, b) 1 m/s, c) 1,5 m/s



a)

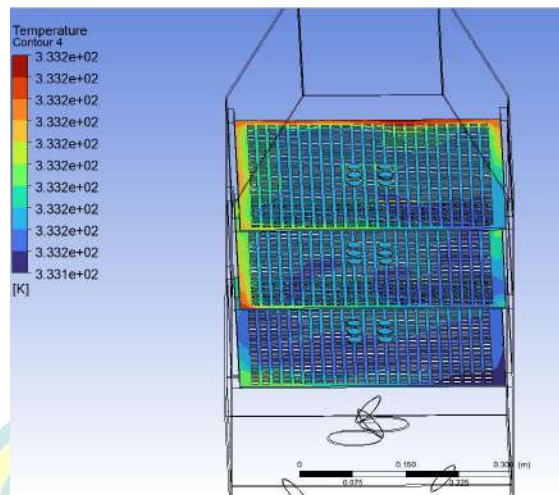


b)

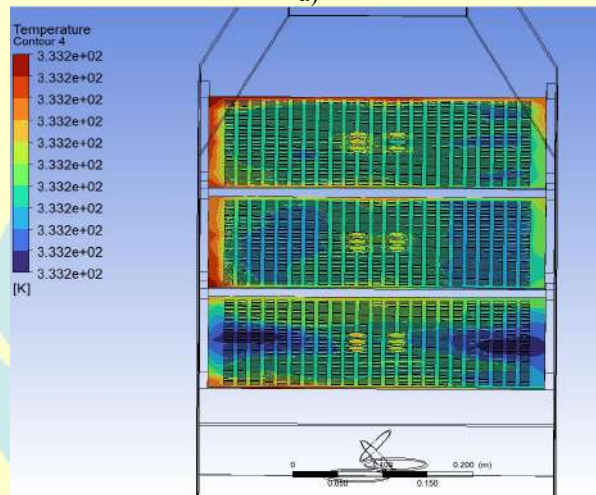


c)

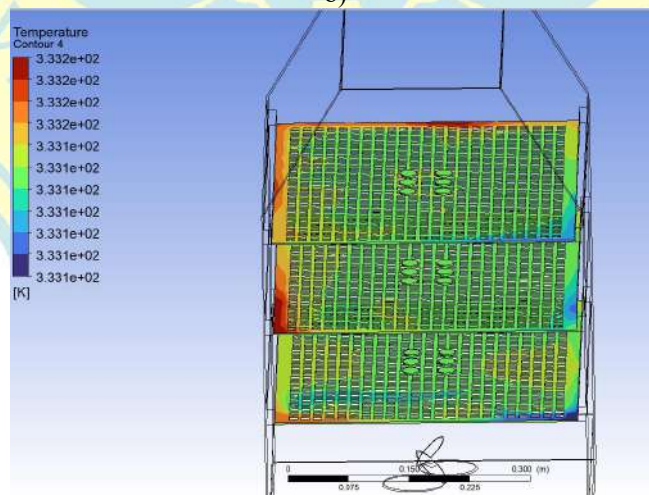
Gambar 4.16 Grafik Hasil *plot over line* Temperatur Terhadap Sumbu XY pada Sudut 90°, Suhu 50°C dan Kecepatan a) 0,5 m/s, b) 1 m/s, c) 1,5 m/s



a)

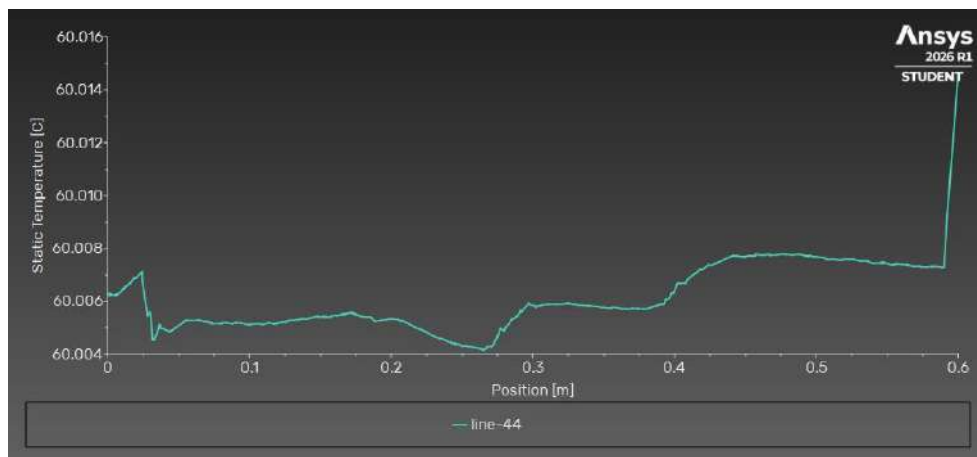


b)

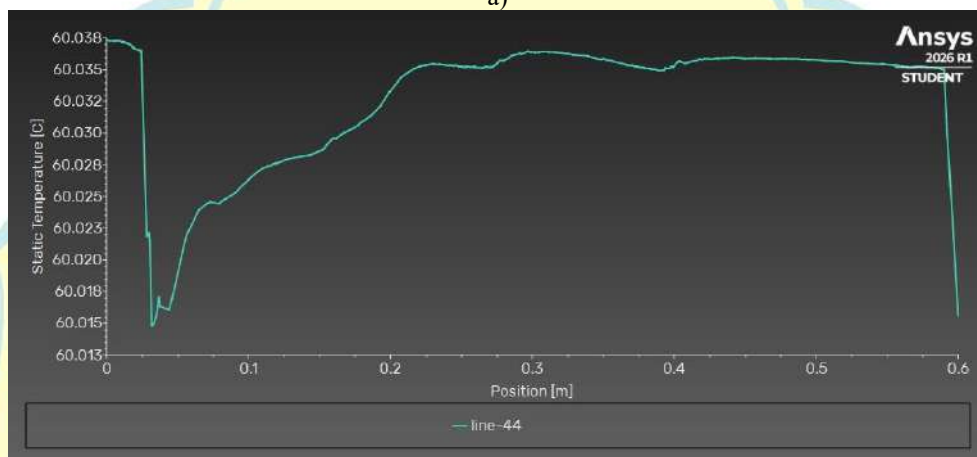


c)

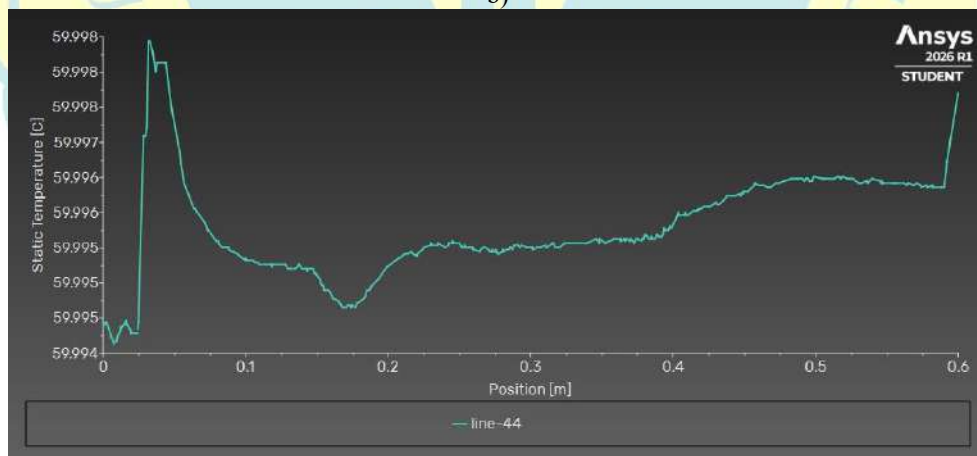
Gambar 4.17 Hasil Simulasi Temperatur sudut 90° Suhu 60°C Kecepatan a) 0,5 m/s, b) 1 m/s, c) 1,5 m/s



a)



b)



c)

Gambar 4.18 Grafik Hasil *plot over line* Temperatur Terhadap Sumbu XY pada Sudut 90°, Suhu 60°C dan Kecepatan a) 0,5 m/s, b) 1 m/s, c) 1,5 m/s

Visualisasi distribusi temperatur memberikan gambaran komprehensif mengenai profil termal dari interaksi aliran terhadap hambatan pipa silang dengan sudut apit 90°. Berdasarkan kontur temperatur pada suhu masukan 50°C (gambar 4.15) dan 60°C (gambar 4.17), terlihat bahwa variasi kecepatan aliran udara sangat

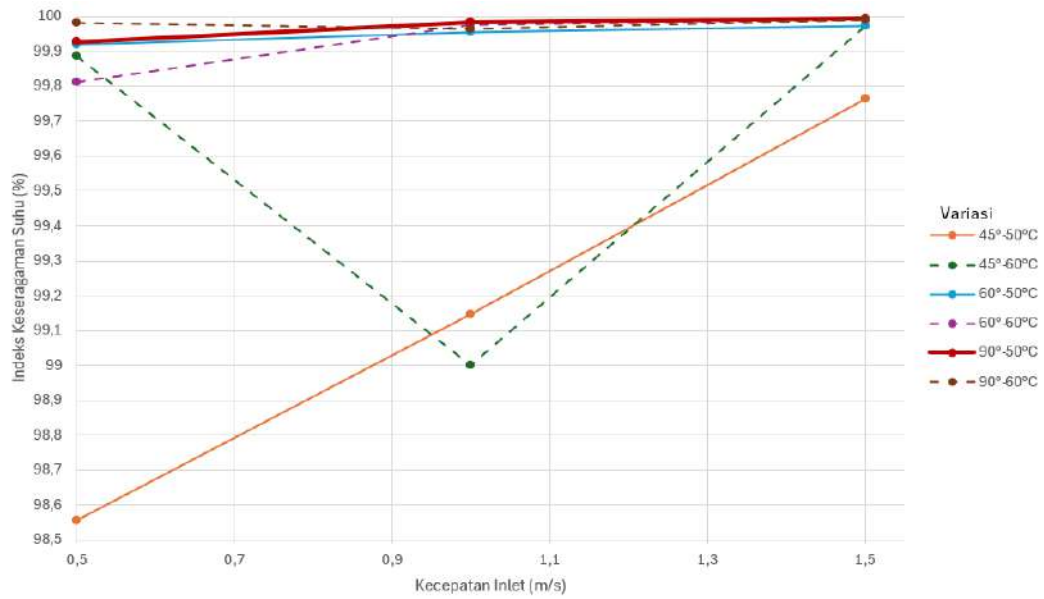
mempengaruhi pemerataan energi panas. Pada variasi kecepatan terendah (0,5 m/s), persebaran panas tampak tidak merata dan banyak menyisakan zona bersuhu rendah—yang secara visual ditandai dengan dominasi warna biru pada kompartemen bagian tengah hingga atas. Distribusi mulai membaik saat kecepatan dinaikkan.

Analisis visual ini divalidasi secara kuat oleh pembacaan kuantitatif pada grafik *plot over line* temperatur (Gambar 4.16 dan 4.18). Titik performa termal paling optimal justru dicapai pada variasi kecepatan tengah, yaitu 1 m/s. Pada kecepatan ini (grafik b), meskipun sempat terjadi penurunan suhu kejut di zona awal akibat pemecahan aliran oleh sudut 90°, kurva mampu kembali naik secara terjal dan fluktuasinya bertahan stabil di angka yang tinggi pada sisa luasan vertikal. Energi termal tertahan secara efektif oleh pusaran *vortex* yang proporsional.

Sebaliknya, ketika kecepatan dipaksa naik hingga 1,5 m/s (grafik c), kurva justru menunjukkan penurunan performa pemerataan suhu di sepanjang garis ukur. Kecepatan 1,5 m/s memicu turbulensi benturan yang terlalu ekstrem pada sudut apit 90°, sehingga meskipun udara sangat panas di area tertentu, panas tersebut tidak terdistribusi secara stabil melintasi area tengah kompartemen. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa kombinasi suhu masuk 60°C dan kecepatan 1 m/s merupakan konfigurasi paling optimal untuk sudut 90°, karena mampu menyeimbangkan waktu tinggal udara panas dengan stabilitas distribusi temperatur di dalam ruang pengering

4.4 Hasil Indeks Keceragaman Suhu

Setelah mengetahui distribusi aliran dan temperatur di dalam ruang pengering, tahap selanjutnya adalah menentukan nilai efisiensi keceragaman suhunya. Semakin tinggi nilai persentase indeks keceragaman suhu (U_T), maka semakin seragam pula distribusi suhu di dalam ruang pengering. Berikut hasilnya yang disajikan dalam bentuk grafik dan tabel:



Gambar 4.19 Grafik Indeks Keseragaman Suhu

Tabel 4.1 Hasil Indeks Keseragaman Suhu

Sudut Pipa Silang	Kecepatan Inlet (m/s)	Suhu Inlet (°C)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	ΔT (°C)	Indeks Keseragaman Suhu (%)
45°	0,5	50	49,199	49,92	0,721	98,556
		60	59,85	59,919	0,069	99,885
	1	50	49,555	49,982	0,427	99,146
		60	59,373	59,973	0,6	99,000
	1,5	50	49,874	49,992	0,118	99,764
		60	59,976	59,993	0,017	99,972
60°	0,5	50	49,921	49,962	0,041	99,918
		60	59,781	59,893	0,112	99,813
	1	50	49,966	49,988	0,022	99,956
		60	59,976	59,991	0,015	99,975
	1,5	50	49,98	49,994	0,014	99,972
		60	59,991	59,997	0,006	99,990
90°	0,5	50	49,915	49,951	0,036	99,928
		60	59,989	60	0,011	99,982
	1	50	49,992	50	0,008	99,984
		60	59,979	60	0,021	99,965

	1,5	50	49,997	50	0,003	99,994
		60	59,994	59,999	0,005	99,992

Tabel dan grafik diatas menyajikan rekapitulasi data kuantitatif dari hasil simulasi CFD yang mengevaluasi parameter termal di dalam ruang pengering. Parameter yang diamati mencakup suhu tertinggi (T_{max}), suhu minimum (T_{min}), selisih suhu (ΔT), serta persentase efisiensi keseragaman suhu. Pengujian ini didasarkan pada variasi tiga variabel independen, yaitu sudut pipa silang (45° , 60° , dan 90°), kecepatan aliran udara *inlet* (0,5 m/s, 1 m/s, dan 1,5 m/s), serta suhu udara *inlet* (50°C dan 60°C).

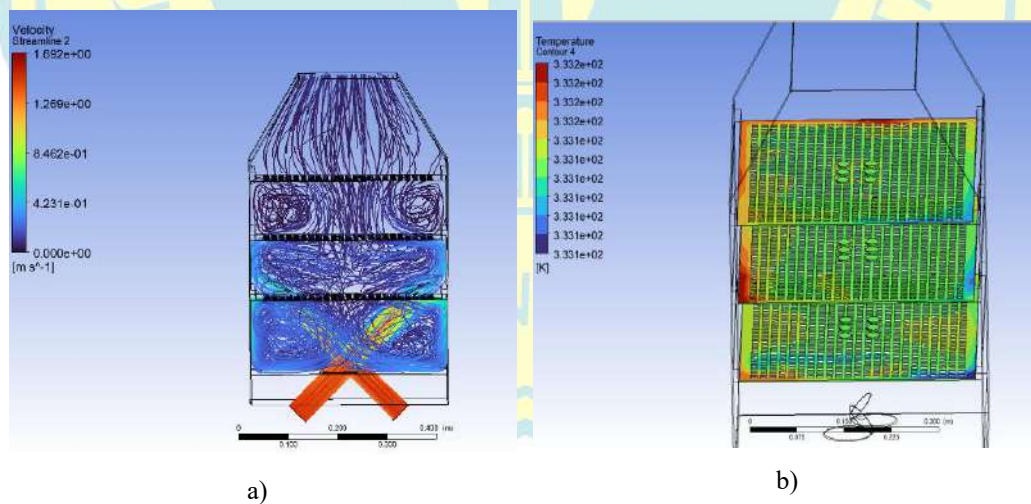
Konfigurasi sudut 45° menghasilkan keseragaman suhu yang paling rendah. Pada sudut apit yang sempit ini, aliran udara panas dari kedua pipa cenderung langsung melesat lurus ke arah tengah atas ruang pengering. Pergerakan udara yang terpusat ini mengakibatkan kurangnya efek turbulensi untuk menyebarkan panas ke sisi samping ruangan. Hal ini dibuktikan dengan nilai selisih suhu (ΔT) yang masih cukup tinggi, mencapai $0,721^\circ\text{C}$ pada kecepatan 0,5 m/s dan suhu 50°C . Sebaliknya, semakin lebar bukaan pipa silang, seperti pada sudut 60° dan 90° , efisiensi keseragamannya semakin meningkat. Sudut 90° secara khusus menghasilkan pusaran udara dan turbulensi termal yang sangat intensif, sehingga pencampuran panas ke seluruh volume ruang pengering terjadi secara optimal.

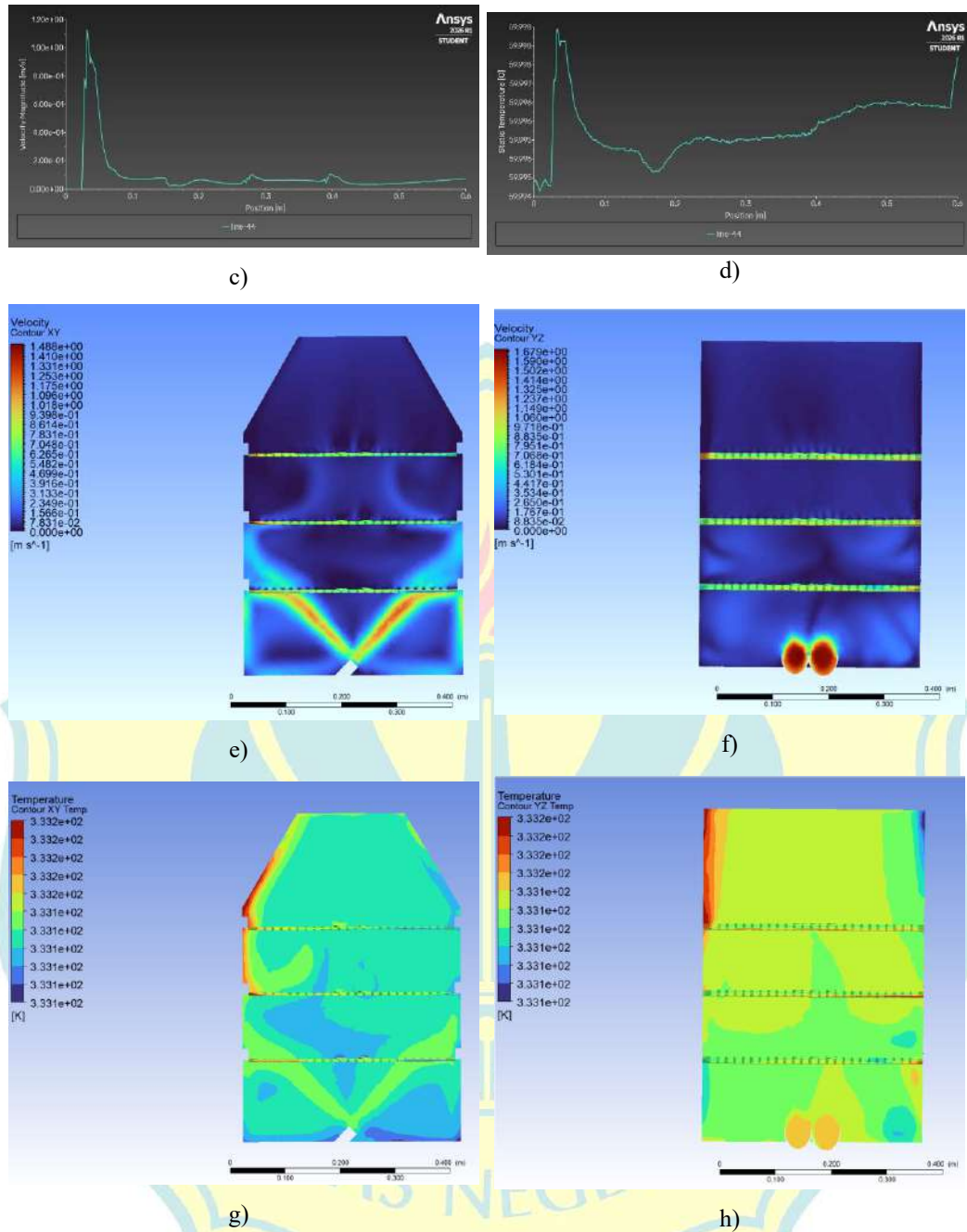
Evaluasi profil temperatur melalui grafik sentral (1-Dimensi) dan persentase volumetrik (Tabel 4.1) mengungkap dinamika termal yang spesifik pada setiap variasi geometri. Pada sudut 45° , pembacaan grafik 1-D seolah menunjukkan kestabilan pada kecepatan 1 m/s. Namun, kalkulasi volumetrik (3-D) membuktikan bahwa kecepatan maksimal 1,5 m/s justru lebih krusial untuk memecah area stagnan (*dead zone*) di tepi kabinet, sehingga keseragamannya meningkat menjadi 99,972%. Sementara itu, sudut 60° menunjukkan konsistensi yang baik, kedua metode evaluasi sama-sama memvalidasi kecepatan 1,5 m/s sebagai parameter optimal (99,990%). Karakteristik aliran yang unik namun terjadi pada sudut 90° . Penurunan drastis suhu di jalur sentral pada kecepatan 1,5 m/s ternyata merupakan efek dari pusaran *vortex* agresif. Turbulensi ini menciptakan pengadukan termal (*thermal mixing*) ekstrem yang menyebarkan panas ke seluruh volume ruang pengering, menjadikannya geometri dengan tingkat homogenitas terbaik.

Berdasarkan Tabel 4.1, nilai Indeks Keseragaman Suhu tertinggi absolut pada sudut 90° (kecepatan 1,5 m/s) sebenarnya dicapai pada suhu masukan 50°C (99,994%). Namun, parameter operasional yang paling direkomendasikan secara keseluruhan adalah pada suhu 60°C dengan kecepatan yang sama. Pemilihan ini didasarkan pada selisih indeks keseragaman yang sangat tidak signifikan (hanya 0,002%), sementara suhu 60°C mampu menyuplai energi termal yang jauh lebih tinggi. Konfigurasi sudut 90° pada 60°C dan 1,5 m/s dinilai paling optimal karena sukses menyeimbangkan kebutuhan laju evaporasi yang cepat untuk pengeringan material, dengan tetap mempertahankan homogenitas ruang yang nyaris sempurna (99,992%).

4.5 Rekomendasi Variasi

Berdasarkan evaluasi menyeluruh terhadap pola aliran udara, distribusi panas pada *tray*, distribusi panas pada ruang pengeringan dan efisiensi keseragaman suhu dari seluruh parameter pengujian, penelitian ini menetapkan bahwa geometri sudut *inlet* 90° dengan suhu 60°C dan kecepatan 1,5 m/s merupakan desain mekanis paling superior karena efektivitasnya dalam menyebarkan udara dan distribusi panas secara merata dan meminimalisir area dengan sirkulasi udara mati (*dead zone*).





Gambar 4.20 Hasil Simulasi Sudut 90° pada Suhu Operasi 60°C dengan Variasi Kecepatan 1,5 m/s
a) Aliran Udara b) Penyebaran Suhu pada Tray c) Grafik Hasil *plot over line* Kecepatan Terhadap Sumbu XY d) Grafik Hasil *plot over line* Temperatur Terhadap Sumbu XY e) Penyebaran Udara pada Bidang XY f) Penyebaran Udara pada Bidang YZ g) Penyebaran Temperatur pada Bidang XY h) Penyebaran Temperatur pada Bidang YZ

4.7 Validasi Data

Suhu Inlet (°C)	Udara (m/s)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	ΔT (°C)	η _t (%)
60	10	25	57.85	32.85	43.25
	11	32.29	53.95	21.66	59.84
70	10	35.61	52.81	17.20	67.45
	11	34.19	62.35	28.16	54.87
80	10	25	74.77	49.77	33.43
	11	27.03	72.23	45.20	37.40

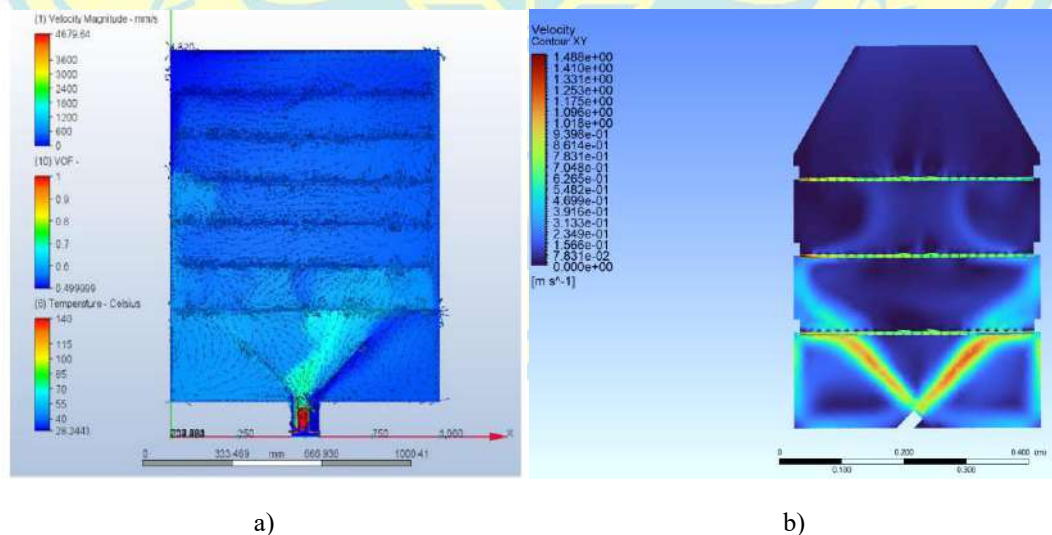
a)

Sudut Pipa Silang	Kecepatan Inlet (m/s)	Suhu Inlet (°C)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	ΔT (°C)	Indeks Keseragaman Suhu (%)
45°	0,5	50	49,199	49,92	0,721	98,556
		60	59,85	59,919	0,069	99,885
	1	50	49,555	49,982	0,427	99,146
		60	59,373	59,973	0,6	99,000
	1,5	50	49,874	49,992	0,118	99,764
		60	59,976	59,993	0,017	99,972
60°	0,5	50	49,921	49,962	0,041	99,918
		60	59,781	59,893	0,112	99,813
	1	50	49,966	49,988	0,022	99,956
		60	59,976	59,991	0,015	99,975
	1,5	50	49,98	49,994	0,014	99,972
		60	59,991	59,997	0,006	99,990
90°	0,5	50	49,915	49,951	0,036	99,928
		60	59,989	60	0,011	99,982
	1	50	49,992	50	0,008	99,984
		60	59,979	60	0,021	99,965
	1,5	50	49,997	50	0,003	99,994
		60	59,994	59,999	0,005	99,992

b)

Gambar 4.21 Hasil Penelitian a) Literatur (Yusfiansyah & Zainuri, 2026) b) Hasil Penelitian Penulis

Validasi data pada penelitian ini dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) terhadap literatur terkait, guna memastikan bahwa perilaku aliran fluida dan perpindahan panas di dalam ruang pengering (*cabinet dryer*) telah berkesesuaian dengan prinsip termodinamika. Berdasarkan data hasil simulasi indeks keseragaman suhu, diamati bahwa peningkatan suhu dan kecepatan aliran udara pada *inlet* tidak secara mutlak berbanding lurus dengan peningkatan persentase efisiensi keseragaman suhu. Fenomena fisik ini tervalidasi secara komprehensif oleh penelitian Yusfiansyah dan Zainuri (2026), yang menyimpulkan bahwa peningkatan suhu *inlet* tidak selalu menghasilkan pemerataan suhu yang lebih baik. Pada konfigurasi tertentu (seperti 45° di 1 m/s, 60° di 0,5 m/s, 90° di 1 m/s, dan 90° di 1,5 m/s), penambahan panas pada inlet terbukti secara jelas menurunkan pemerataan suhu akhir. Pada kondisi temperatur yang tinggi, indeks keseragaman suhu dapat mengalami penurunan akibat terjadinya fenomena *thermal stratification* (stratifikasi termal) yang didominasi oleh gaya apung, serta akumulasi panas di area tertentu. Kesesuaian tren ini mengonfirmasi bahwa distribusi suhu yang merata sangat bergantung pada titik keseimbangan yang optimal antara energi termal dan energi kinetik aliran udara di dalam sistem. Namun modifikasi *inlet* pada *cabinet dryer* mampu mengeliminasi fenomena *thermal stratification* yang signifikan.



Gambar 4.22 Hasil Simulasi Distribusi Udara a) Modifikasi oleh (Sulistiono, 2021)
b) Modifikasi oleh Penulis

Hasil simulasi dalam penelitian ini menunjukkan bahwa variasi sudut *inlet pipa* sangat berpengaruh terhadap pola aliran udara dan distribusi panas. Hasil simulasi pada penelitian ini menunjukkan bahwa sudut pipa dengan konfigurasi sudut apit 90° terbukti efektif dalam mendistribusikan aliran udara secara menyamping (*lateral*) maupun secara vertikal dan memecah area sirkulasi udara mati (*dead zone*) yang ada pada bagian tepi rak dan juga pada bagian tengah rak. Fenomena ini tervalidasi secara kuat oleh penelitian yang dilakukan Sulistiono (2021) mengenai modifikasi geometri *inlet* aliran udara pada *cabinet dryer* berperan efektif untuk memperbaiki distribusi aliran udara.

