

BAB IV

HASIL DAN ANALISIS

4.1 Parameter *input* pada *Boiler Laundry*

Parameter *input* pada simulasi *boiler laundry* sangat krusial untuk merepresentasikan perpindahan panas yang akurat dan fenomena *pool boiling* yang terjadi. Pengaturan ini memastikan bahwa model simulasi mendekati kondisi operasional nyata.

4.1.1 *Temperature Pipa Air Boiler Laundry*

Suhu ini didapat dari hasil uji coba boiler kondisi eksisting sebanyak 3 kali yang diukur menggunakan flir *thermoimager* di bagian pemanasan dari 0.5 bar sampai 2.6 bar di setiap 0.5 bar pada titik T5 (titik dan posisi pengukuran bisa dilihat pada Gambar 3.5), sehingga didapat rata-rata suhu pemanasan di angka $524.68\text{ }^{\circ}\text{K} \approx 525^{\circ}\text{K}$. Data lengkap pengukuran bisa dilihat pada Tabel 4.11, 4.12, dan 4.13.

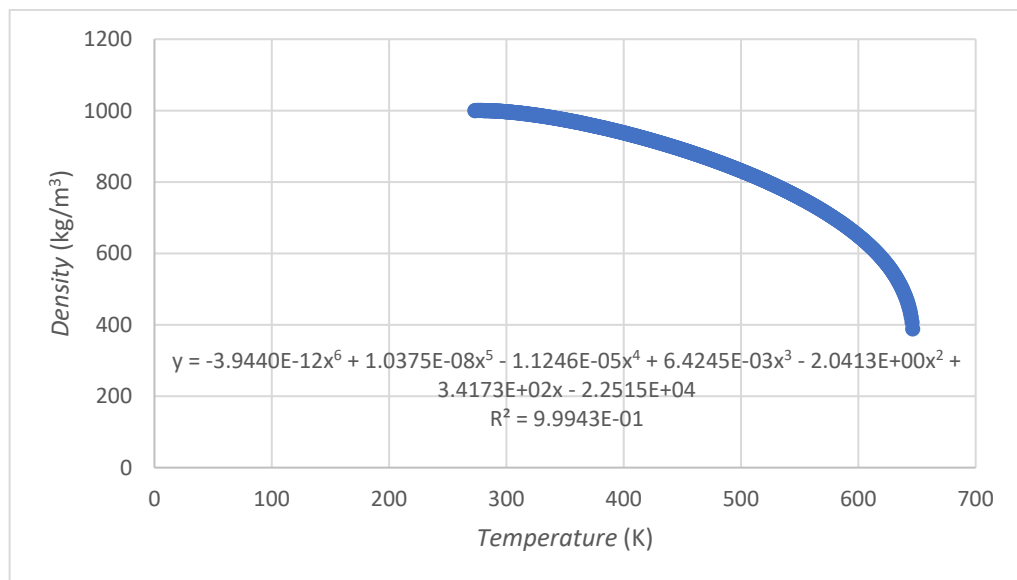
4.1.2 *Properti Air dari Boiler Laundry*

Sifat termofisika air, seperti densitas, kalor jenis, konduktivitas termal, dan viskositas, dapat berubah secara signifikan seiring dengan perubahan temperatur. Untuk merepresentasikan perubahan yang bersifat non-linear ini secara akurat di dalam simulasi, properti material didefinisikan menggunakan metode *piecewise-polynomial* di ANSYS Fluent.

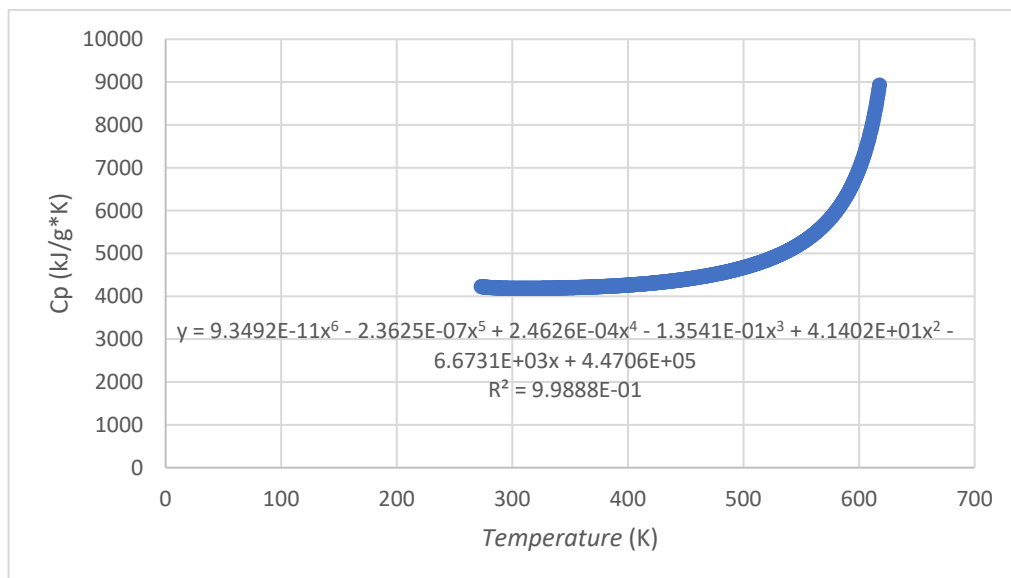
Metode *piecewise-polynomial* adalah cara untuk merepresentasikan bagaimana properti material berubah secara non-linear terhadap suatu variabel, biasanya suhu atau tekanan. Properti material didefinisikan oleh beberapa segmen polinomial, di mana setiap segmen berlaku untuk rentang suhu atau tekanan tertentu. ANSYS kemudian akan secara otomatis menginterpolasi nilai properti material berdasarkan

fungsi polinomial yang relevan untuk setiap titik dalam simulasi dengan persamaan yang diberi.

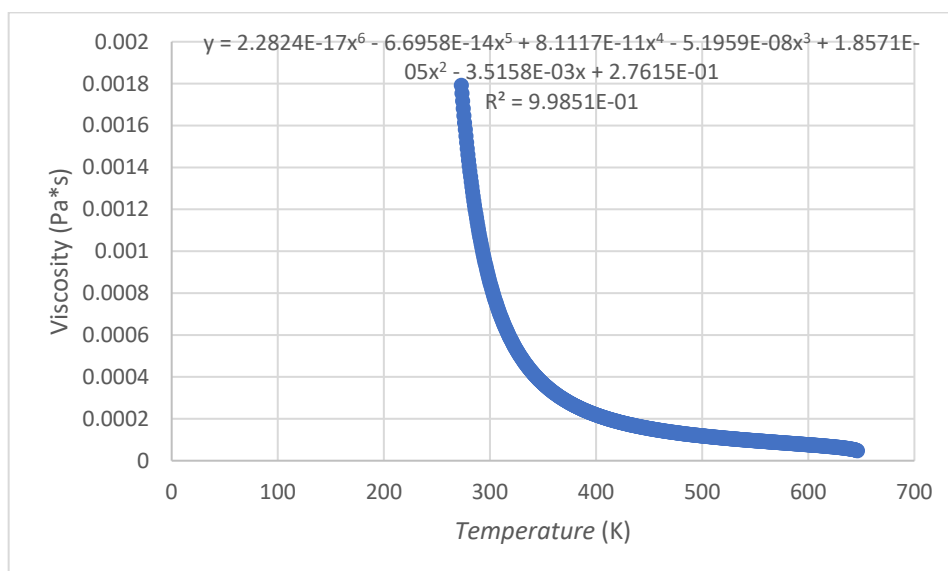
Pendefinisian fungsi polinomial dalam penelitian ini dilakukan dengan mengumpulkan data material di setiap titik suhu menggunakan Microsoft Excel, kemudian mem-plot data tersebut ke dalam grafik untuk mendapatkan fungsi polinomialnya. Jumlah koefisien yang paling sesuai ditentukan dengan melihat nilai R^2 yang paling mendekati 1. Grafik dan Fungsi yang dipakai bisa dilihat pada Gambar 4.1, 4.2, 4.3, dan 4.4.



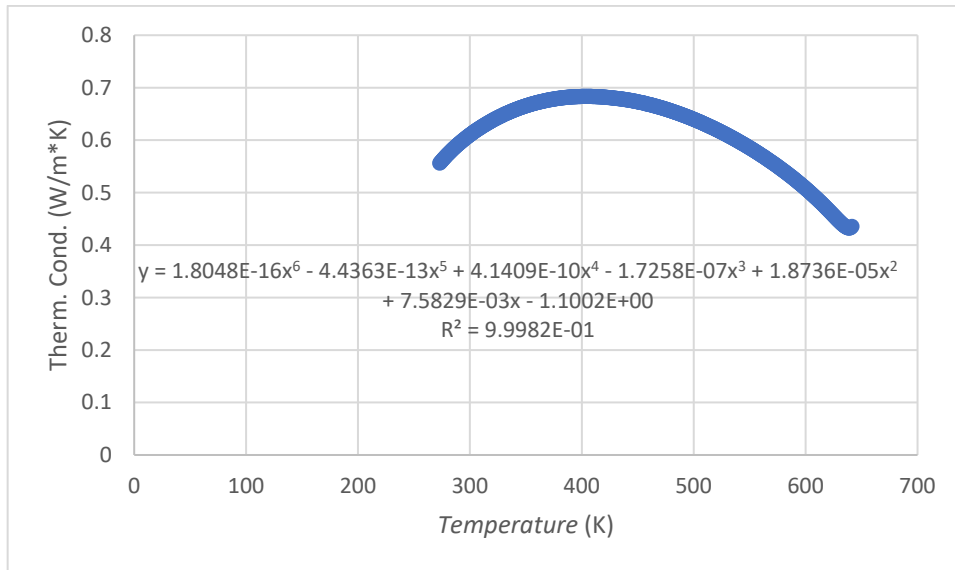
Gambar 4.1 Grafik massa jenis air (cair) terhadap *temperature*.



Gambar 4.2 Grafik kalor jenis air (cair) terhadap *temperature*.



Gambar 4.3 Grafik viskositas air (cair) terhadap *temperature*.



Gambar 4.4 Grafik konduktivitas termal air (cair) terhadap *temperature*.

4.2 Penampilan Data Hasil Simulasi

Cara menampilkan data hasil simulasi pada tugas akhir ini berdasar pada beberapa jurnal yang diacu. Studi dari (Kouzegar Ghiyasi and Hossainpour, 2025) menyajikan data dari hasil simulasi berupa *heat flux* dan *heat transfer coefficient* dalam bentuk grafik dan *vapor volume fraction* dalam bentuk kontur, yang membahas tentang perubahan permukaan sisi pemanasan pada studi *pool boiling* di permukaan dengan berbagai varian bentuk permukaan. Studi yang dilakukan oleh (Hrnjak *et al.*, 2011) juga menunjukkan *heat transfer coefficient* lokal tentang pipa dengan diameter antara 0.5-3.0 mm terdapat dampak substansial pada *heat transfer coefficient* lokal pada saat tekanan jenuh tinggi. Hasil studi oleh (Howlader, Moharana and Das, 2023a) menyajikan data distribusi kecepatan fluida dan volume fraction dalam bentuk kontur dan *heat flux* dan *heat transfer coefficient* dalam bentuk grafik, mereka menyatakan ada perubahan *heat transfer coefficient* dalam variasi kemiringan pada suatu pipa tetapi tidak terlalu signifikan.

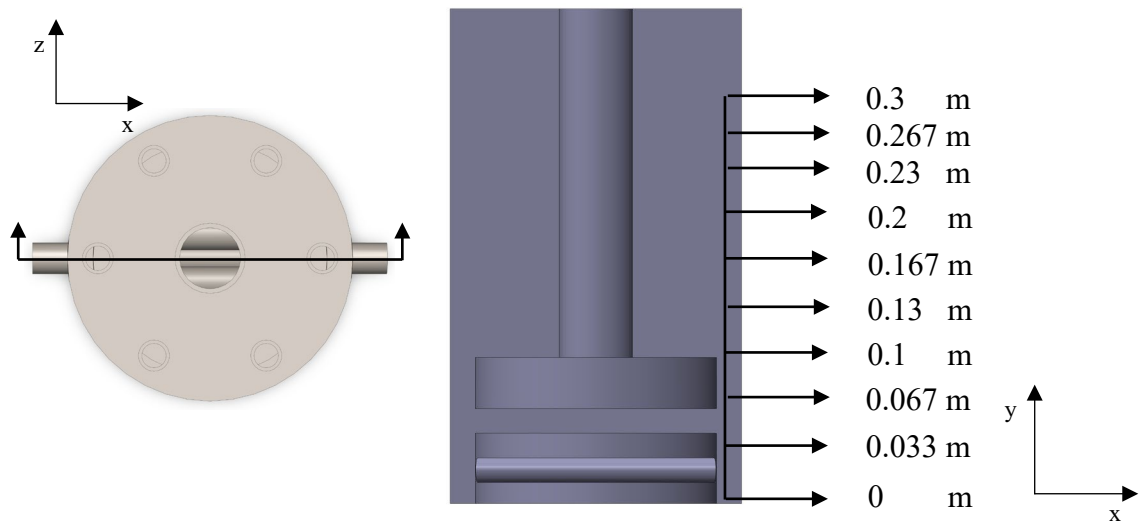
Berdasarkan studi yang sudah disebutkan tentang pengambilan data, tugas akhir ini akan membahas data hasil simulasi dengan menampilkan *heat flux*, *heat transfer coefficient*, dan distribusi kecepatan fluida dalam bentuk grafik dan distribusi kecepatan fluida dan *vapor volume fraction* dalam bentuk kontur. Grafik *Heat Flux* menjadi indikator utama dari kapasitas pemanasan boiler, yang mengukur seberapa besar kuantitas energi kalor yang berhasil diserap oleh fluida per unit area. Sementara itu, grafik *Heat Transfer Coefficient* (HTC) menilai efisiensi dari proses perpindahan kalor tersebut, di mana nilai yang tinggi menandakan panas dapat berpindah dengan mudah dari dinding ke fluida. Keduanya sangat dipengaruhi oleh distribusi kecepatan fluida, yang ditampilkan dalam bentuk grafik dan kontur untuk menganalisis sirkulasi fluida di dalam boiler. Terakhir, kontur *vapor volume fraction* memberikan visualisasi paling krusial mengenai hasil akhir dari kinerja boiler, yaitu di mana dan seberapa efektif uap diproduksi, sekaligus membantu mengidentifikasi potensi masalah operasional.

4.3 Analisis Hasil Simulasi Kondisi Eksisting

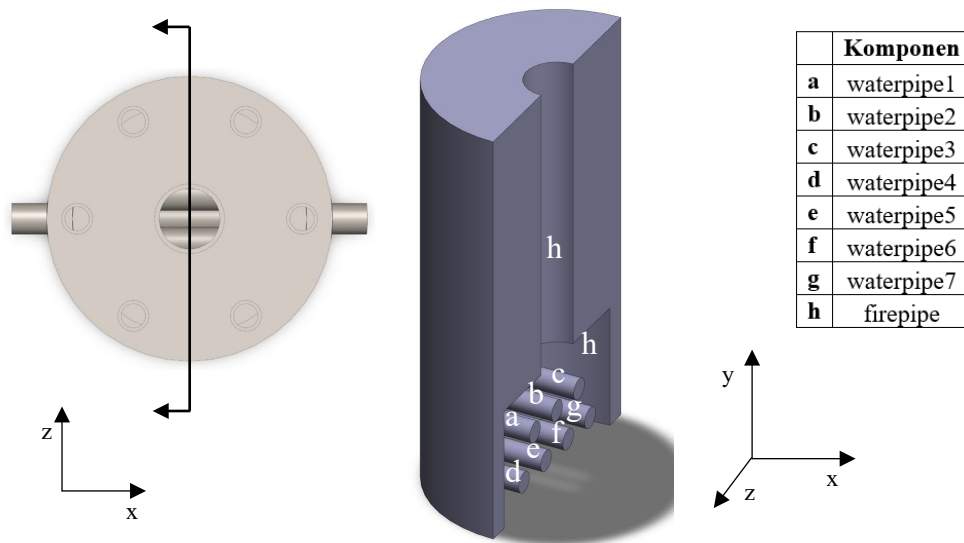
Sub-bab ini menganalisis secara komprehensif hasil simulasi CFD *boiler laundry* kondisi eksisting dengan 7 pipa dan sudut kemiringan pipa air 0°, fokus pada hidrodinamika dan termal fluida. Evaluasi mencakup visualisasi profil kecepatan fluida untuk mengidentifikasi pola sirkulasi dan zona stagnasi. Analisis distribusi *vapor volume fraction* mengkarakterisasi dinamika *pool boiling* dan evolusi gelembung uap. Selain itu, peta *heat flux* permukaan pipa diidentifikasi untuk memahami distribusi intensitas perpindahan panas lokal. Terakhir, koefisien perpindahan panas (*heat transfer coefficient*) keseluruhan dari permukaan *firepipe*

dan *waterpipe* dikuantifikasi untuk menilai efisiensi termal total sistem. Temuan ini akan menjadi fondasi analisis untuk pengembangan desain modifikasi.

Untuk mempermudah dalam analisis hasil simulasi ini, pengambilan data permukaan kontur dilakukan pada sumbu XY untuk melihat distribusi kecepatan fluida dan *volume vapor fraction*. Lalu, data berupa grafik diperoleh dari line section dengan titik koordinat seperti di Gambar 4.5 untuk melihat distribusi kecepatan fluida. Sedangkan, pengambilan data *heat flux* dan *heat transfer coefficient* melihat pada wall yang dinotasikan (a) hingga (h) seperti di Gambar 4.6.



Gambar 4.5 Titik pengambilan hasil simulasi untuk data grafik distribusi kecepatan fluida.



Gambar 4.6 Titik pengambilan *surface* hasil simulasi untuk data *heat flux* dan *heat transfer coefficient*.

4.3.1 Heat Flux

Nilai *heat flux* ditampilkan untuk melihat seberapa besar laju perpindahan energi panas melalui suatu permukaan per satuan luas pada *boiler laundry*. Data diambil dari nilai rata-rata di setiap komponen pada CFD-Post. Besaran *heat flux* pada *boiler laundry* ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 *Heat flux* kondisi eksisting.

Komponen	Heat Flux (kW/m ²)
firepipe	155.25
waterpipe1	85.28
waterpipe2	89
waterpipe3	89.78
waterpipe4	149.59
waterpipe5	137.94
waterpipe6	139.29
waterpipe7	149.24
Rata-rata	124.42
Total	995.38

Berdasarkan data Tabel 4.1, terlihat adanya variasi nilai *heat flux* yang signifikan di antara komponen yang berbeda, dengan jumlah nilai tercatat sebesar 995.38kW/m². Komponen pipa api menunjukkan nilai *heat flux* tertinggi, yaitu

155.25 kW/m². Nilai yang tinggi ini dapat dijelaskan karena pipa api memiliki luas permukaan yang paling besar. Hal ini sesuai dengan prinsip yang dikemukakan oleh (Howlader, Moharana and Das, 2023b; Hossainpour and Kouzegar Ghiyasi, 2025b), yang menyatakan bahwa permukaan panas yang lebih luas akan menghasilkan *heat flux* yang lebih tinggi.

Perbedaan yang paling mencolok terlihat antara kelompok pipa air bagian atas (pipa 1, 2, 3) dan kelompok pipa air bagian bawah (pipa 4, 5, 6, 7). Pipa-pipa di bagian atas memiliki *heat flux* yang jauh lebih rendah (berkisar antara 85.28 - 89.78 kW/m²) dibandingkan dengan pipa-pipa air di bagian bawah yang nilainya jauh lebih tinggi (berkisar antara 137.94 - 149.59 kW/m²). Fenomena ini merupakan dampak langsung dari aktifnya gravitasi dalam simulasi. Gravitasi menyebabkan terjadinya stratifikasi fasa fluida, di mana fasa cair yang lebih padat cenderung berkumpul di bagian bawah sistem, sementara fasa uap yang lebih ringan akan naik ke atas. Akibatnya, pipa-pipa air bagian bawah (4, 5, 6, 7) memiliki kontak yang lebih baik dengan fasa cair, yang memungkinkan perpindahan panas lebih efisien dan menghasilkan *heat flux* yang tinggi. Sebaliknya, pipa-pipa bagian atas (1, 2, 3) lebih banyak terpapar oleh fasa uap yang memiliki konduktivitas termal lebih rendah, sehingga perpindahan panas menjadi terhambat dan nilai *heat flux*nya menjadi rendah. Pengaruh gravitasi terhadap dinamika aliran ini sejalan dengan pengamatan (Howlader, Moharana and Das, 2023b) mengenai dampak gravitasi pada fluida..

4.3.2 Heat Transfer Coefficient

Nilai *heat transfer coefficient* ditampilkan untuk melihat seberapa baik laju perpindahan energi panas antar permukaan padat dan fluida pada *boiler laundry*.

Data diambil dari nilai rata-rata di setiap komponen pada CFD-Post. Besaran *Heat Transfer Coefficient* (HTC) pada geometri pemanasan ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 *Heat transfer coefficient* kondisi eksisting.

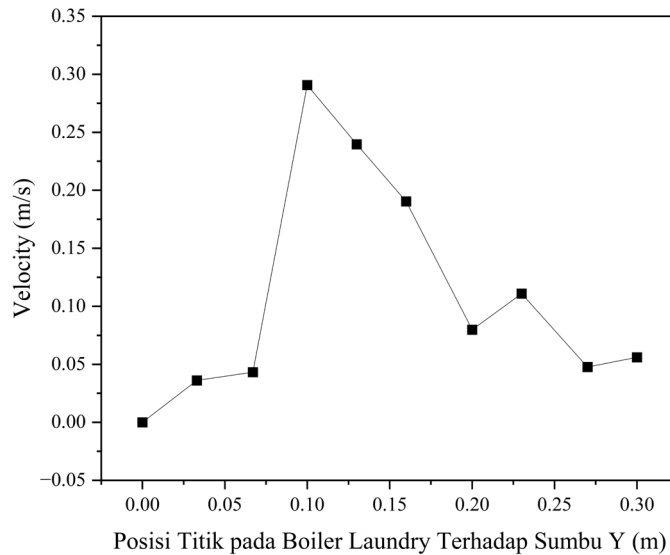
Komponen	HTC (kW/m ² K)
firepipe	11.79
waterpipe1	15.90
waterpipe2	15.90
waterpipe3	15.90
waterpipe4	15.90
waterpipe5	15.90
waterpipe6	15.90
waterpipe7	15.90
Rata-rata	15.39
Total	123.09

Analisis pada Tabel 4.2 menunjukkan hasil yang menarik dan berbeda secara fundamental dibandingkan dengan data *heat flux* sebelumnya. Hal yang paling menonjol adalah ketujuh pipa, terlepas dari posisinya (atas maupun bawah), memiliki nilai HTC yang seragam dan konstan sebesar 15.90 kW/m²K. Keseragaman ini, terutama mengingat adanya pengaruh gravitasi yang seharusnya menyebabkan perbedaan fasa fluida di bagian atas dan bawah, mengindikasikan bahwa nilai HTC untuk pipa kemungkinan besar ditetapkan sebagai nilai input atau kondisi batas (boundary condition) yang konstan dalam penyiapan simulasi, bukan sebagai hasil yang dihitung secara dinamis dari interaksi fluida.

Selanjutnya, komponen heater tercatat memiliki nilai HTC paling rendah, yaitu 11.79 kW/m²K. Fakta ini menarik karena heater memiliki luas permukaan yang paling besar. Hasil ini secara langsung sejalan dengan prinsip yang dikemukakan oleh (Howlader, Moharana and Das, 2023b), yang menyatakan bahwa permukaan yang lebih luas akan stagnan atau cenderung menurun terhadap HTC yang dihasilkan.

4.3.3 Distribusi Kecepatan Fluida

Distribusi kecepatan fluida memperlihatkan laju fluida yang bergerak pada *boiler laundry* dalam bentuk grafik, yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 dengan koordinat yang sudah didefinisikan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.7 Grafik kecepatan fluida kondisi eksisting.

Data profil kecepatan fluida pada Gambar 4.7 menunjukkan dinamika aliran yang bervariasi sepanjang sumbu Y. Terlihat bahwa profil kecepatan sangat tidak simetris, yang merupakan karakteristik khas dari aliran dua fasa di bawah pengaruh gravitasi. Pada posisi $Y=0$ m, kecepatan adalah nol, mengindikasikan adanya kondisi "no-slip" pada dinding bawah saluran. Dari titik ini, kecepatan meningkat secara drastis hingga mencapai puncaknya sekitar 0.29 m/s pada posisi $Y=0.10$ m. Setelah mencapai puncak, kecepatan menurun secara signifikan dan berfluktuasi pada nilai yang jauh lebih rendah di sisa domain.

Asimetri yang tajam ini dapat dijelaskan oleh pemisahan fasa akibat gravitasi. Gaya apung (*buoyancy*) menyebabkan fasa gas atau uap yang lebih ringan dan memiliki densitas lebih rendah untuk bergerak ke atas dengan kecepatan yang

lebih tinggi, sementara fasa cair yang lebih padat dan berat cenderung bergerak lebih lambat di bagian bawah. Oleh karena itu, puncak kecepatan yang teramati pada $Y=0.10$ m kemungkinan besar merepresentasikan inti dari aliran fasa uap. Wilayah dengan kecepatan yang jauh lebih rendah, terutama di area setelah puncak, sesuai dengan lokasi fasa cair yang bergerak lebih lambat. Fenomena ini sejalan dengan konteks yang diberikan oleh (Howlader, Moharana and Das, 2023b), yang menekankan pentingnya pengaruh gravitasi serta keberadaan *Vapor Volume Fraction* (VVF) dalam domain fluida, di mana gravitasi mengatur bagaimana kedua fasa tersebut terdistribusi dan bergerak dengan kecepatan yang berbeda. Visualisasi didukung pada Gambar 4.8.

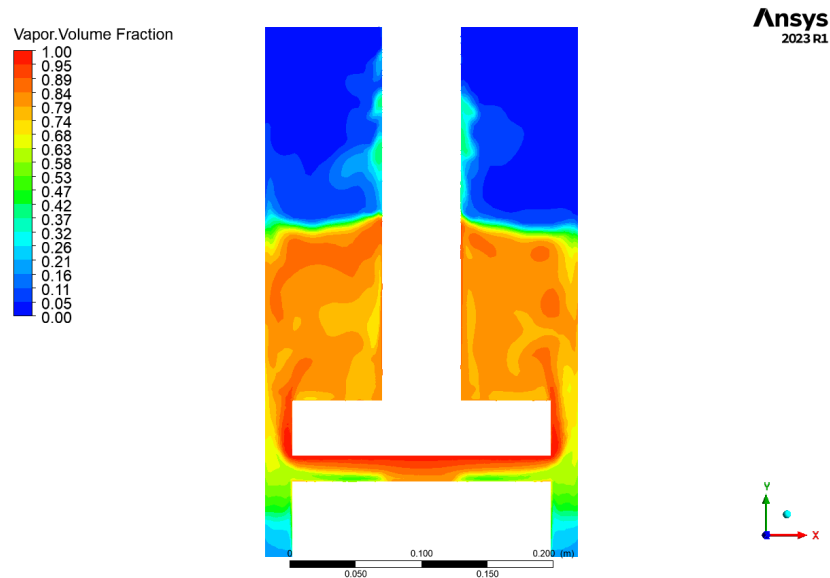


Gambar 4.8 Kontur distribusi kecepatan fluida kondisi eksisting.

4.3.4 *Vapor Volume Fraction*

Kontur permukaan *vapor volume fraction* memperlihatkan visualisasi uap yang tercipta pada *boiler laundry*. Data diambil pada *plane XY* yang ditunjukkan dengan Gambar 4.9. Gambar akan memvisualisasikan pembentukan uap yang notasikan dengan warna, warna biru (0) diartikan belum terbentuk uap sama sekali

atau di bagian bawah geometri terisi air dan di bagian atas geometri terisi udara, warna merah (1) diartikan uap sudah terbentuk sepenuhnya.



Gambar 4.9 Kontur vapor volume fraction kondisi eksisting.

Berdasarkan kontur *Vapor Volume Fraction* yang disajikan pada Gambar 4.9, terlihat bahwa uap terbentuk dan cenderung terakumulasi di sepanjang bagian atas pipa air *boiler*, selanjutnya uap bergerak mengisi ruang yang lebih tinggi melalui sisi kanan dan kiri pipa air dan bagian geometri vertikal yang terisi air, uap akan langsung mengisi ruang udara di atas.

Ketika dikorelasikan dengan kontur distribusi kecepatan fluida, di mana area pipa horizontal menunjukkan kecepatan yang sangat rendah (warna biru gelap, mendekati stagnasi), dapat dianalisis adanya stagnasi pembuatan uap pada pipa horizontal yang tertahan karena geometrinya. Uap yang terbentuk di dalam pipa horizontal dan di dasar *boiler* tampaknya kesulitan untuk bergerak naik dengan lancar akibat kecepatan aliran fluida yang rendah dan kemungkinan hambatan oleh desain geometri horizontal itu sendiri.

4.4 Pembuatan Geometri Modifikasi *Boiler Laundry*

Berdasarkan analisis komprehensif hasil simulasi kondisi eksisting, teridentifikasi adanya stagnasi fluida dan uap, khususnya pada area pipa horizontal. Fenomena ini secara signifikan menghambat efisiensi perpindahan panas dan proses pendidihan dalam *boiler* eksisting. Untuk mengatasi permasalahan ini dan meningkatkan kinerja termal sistem, dilakukan perancangan geometri modifikasi *boiler laundry*.

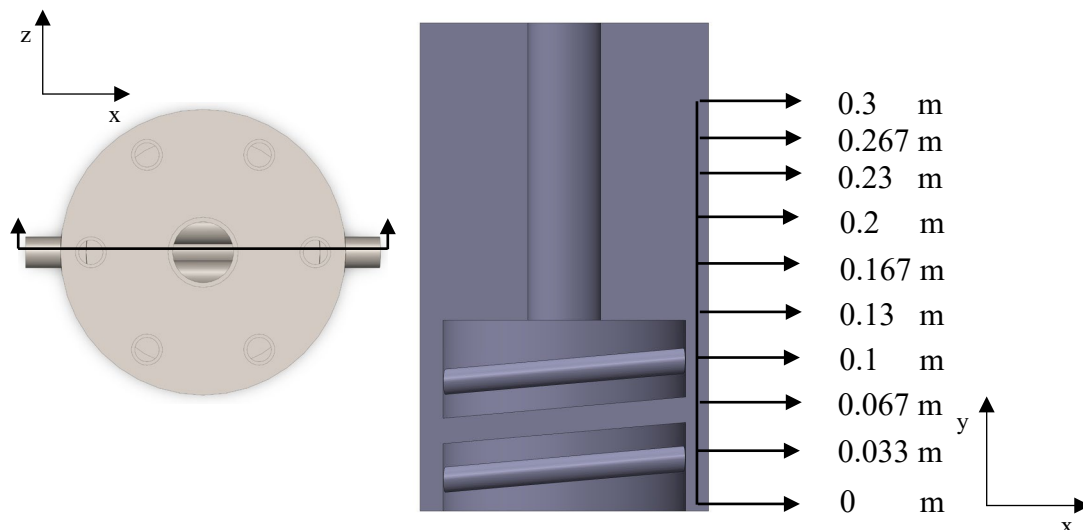
Pendekatan modifikasi didasarkan pada studi literatur yang menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi *boiler* dapat dicapai melalui penambahan kemiringan pada pipa dan peningkatan luas permukaan pemanasan pipa. Oleh karena itu, diputuskan untuk menambah jumlah pipa internal dari 7 pipa menjadi 11 pipa, mengikuti pola penataan pipa yang sudah ada, dengan penambahan 4 pipa baru untuk memperluas area kontak pemanasan. Selain itu, untuk mengetahui konfigurasi yang paling efektif, dibuat variasi kemiringan pipa yang berbeda, yaitu 0, 1, 2, 3, 4, dan 5 derajat. Variasi sudut kemiringan pipa ini diharapkan dapat memfasilitasi pergerakan uap yang lebih baik dan mengurangi stagnasi, sehingga mengoptimalkan perpindahan panas secara keseluruhan.

4.5 Analisis Hasil Simulasi Kondisi Modifikasi

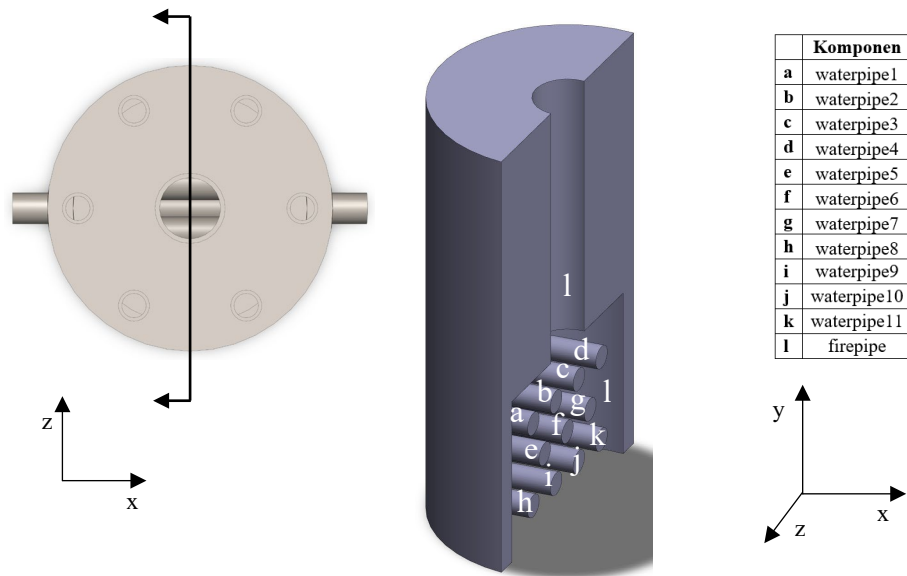
Sub-bab ini menganalisis secara komprehensif hasil simulasi CFD *boiler laundry* kondisi modifikasi, fokus pada hidrodinamika dan termal fluida. Evaluasi mencakup visualisasi profil kecepatan fluida untuk mengidentifikasi pola sirkulasi dan zona stagnasi. Analisis distribusi *vapor volume fraction* mengkarakterisasi dinamika *pool boiling* dan evolusi gelembung uap. Selain itu, peta *heat flux* permukaan pipa diidentifikasi untuk memahami distribusi intensitas perpindahan

panas lokal. Terakhir, koefisien perpindahan panas (*heat transfer coefficient*) keseluruhan dari permukaan *firepipe* dan *waterpipe* dikuantifikasi untuk menilai efisiensi termal total sistem.

Untuk mempermudah dalam analisis hasil simulasi ini, pengambilan data permukaan kontur dilakukan pada sumbu XY untuk melihat distribusi kecepatan fluida dan *volume vapor fraction*. Lalu, data berupa grafik diperoleh dari line section dengan titik koordinat seperti di Gambar 4.10 untuk melihat distribusi kecepatan fluida. Sedangkan, pengambilan data *heat flux* dan *heat transfer coefficient* melihat pada wall yang dinotasikan (a) hingga (l) seperti di Gambar 4.11.



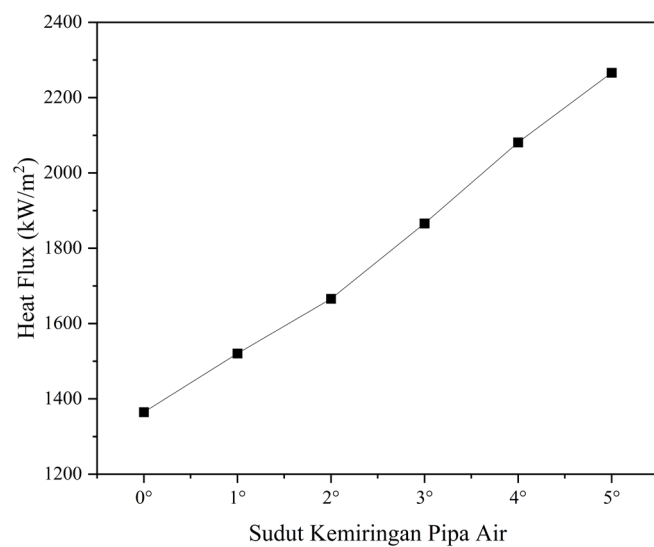
Gambar 4.10 Titik pengambilan hasil simulasi untuk data grafik distribusi kecepatan fluida.



Gambar 4.11 Titik pengambilan *surface* hasil simulasi untuk data *heat flux* dan *heat transfer coefficient*.

4.5.1 Heat Flux

Nilai *heat flux* ditampilkan untuk melihat seberapa besar laju perpindahan energi panas melalui suatu permukaan per satuan luas pada *boiler laundry*. Data diambil dari nilai rata-rata di setiap komponen pada CFD-Post, lalu dijumlahkan keseluruhan komponennya. Besaran *heat flux* pada geometri pemanasan ditunjukkan pada Gambar 4.12.

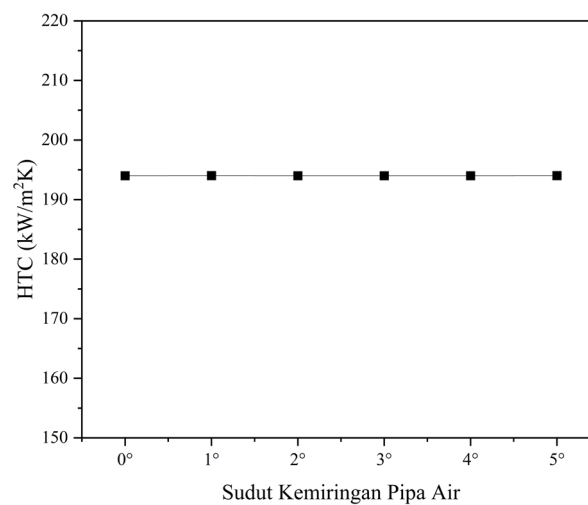


Gambar 4.12 Nilai *heat flux* terhadap variasi sudut kemiringan pipa air.

Grafik menunjukkan hubungan yang sangat jelas, di mana nilai fluks panas (*heat flux*) meningkat secara signifikan seiring dengan bertambahnya sudut kemiringan pipa air. Terlihat dari data, saat kemiringan pipa dinaikkan dari 0° ke 5° , fluks panas terus menanjak secara konsisten. Secara spesifik, nilai *heat flux* naik secara signifikan dari 1364.6 kW/m^2 pada sudut kemiringan pipa air terendah (0°) hingga mencapai 2266.1 kW/m^2 pada sudut kemiringan pipa air tertinggi (5°), yang menunjukkan bahwa laju perpindahan panas per unit area meningkat seiring dengan naiknya sudut kemiringan pipa air yang diterapkan, mendukung studi dari (Howlader, Moharana and Das, 2023a) bahwa semakin tinggi sudut kemiringan suatu permukaan semakin besar pula *heat flux* yang dihasilkan.

4.5.2 *Heat Transfer Coefficient*

Nilai *heat transfer coefficient* ditampilkan untuk melihat seberapa baik laju perpindahan energi panas antar permukaan padat dan fluida pada *boiler laundry*. Data diambil dari nilai rata-rata di setiap komponen pada CFD-Post, lalu dijumlahkan keseluruhan komponennya. Besaran *Heat Transfer Coefficient* (HTC) pada geometri pemanasan ditunjukkan pada Gambar 4.13.

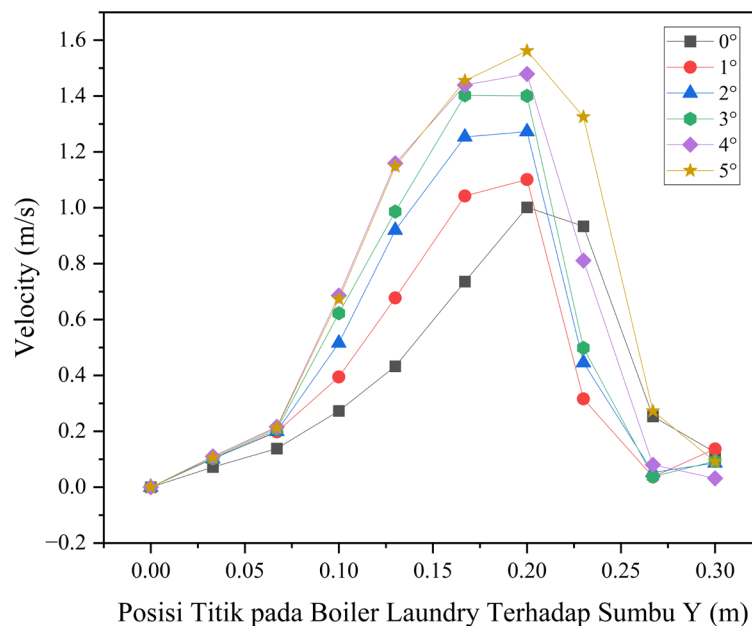


Gambar 4.13 Nilai *heat transfer coefficient* terhadap variasi sudut kemiringan pipa air.

Grafik menampilkan hubungan antara kemiringan pipa air terhadap Koefisien Perpindahan Panas (HTC). Hal yang paling jelas dari grafik ini adalah nilai HTC yang tetap konstan secara absolut pada angka $194 \text{ kW/m}^2\text{K}$ di seluruh rentang sudut kemiringan pipa air yang disimulasikan, dari 0° hingga 5° . Tidak ada perubahan atau fluktuasi sedikit pun pada nilai HTC meskipun sudut kemiringan pipa diubah. Hal ini sejalan dengan studi dari (Howlader, Moharana and Das, 2023a), perubahan sudut kemiringan pipa terhadap nilai HTC tidak terlalu signifikan perubahannya.

4.5.3 Distribusi Kecepatan Fluida

Distribusi kecepatan fluida memperlihatkan laju fluida yang bergerak pada *boiler laundry* dalam bentuk grafik, yang ditunjukkan pada Gambar 4.14 dengan koordinat yang sudah didefinisikan pada Gambar 4.10.

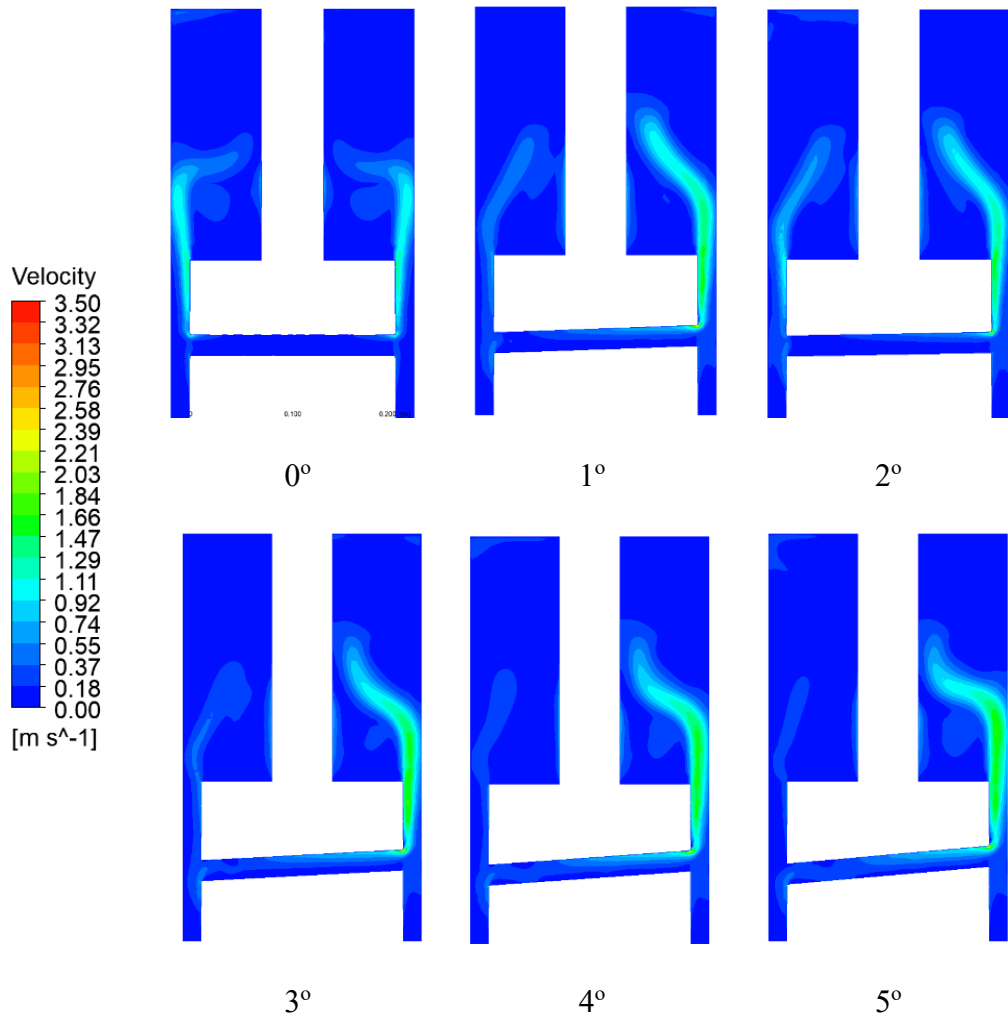


Gambar 4.14 Nilai kecepatan fluida terhadap variasi sudut kemiringan pipa air.

Gambar 4.14 menyajikan perbandingan profil kecepatan fluida pada enam sudut kemiringan pipa air yang berbeda, yaitu dari 0° hingga 5° . Secara umum,

semua kurva menunjukkan profil kecepatan yang sangat asimetris, sebuah ciri khas dari aliran dua fasa yang dipengaruhi oleh gravitasi, di mana kecepatan berawal dari nol di dasar boiler ($Y=0$ m) dan mencapai puncaknya di dalam saluran. Tren yang paling signifikan dan jelas dari perbandingan ini adalah bahwa kecepatan fluida meningkat seiring dengan bertambahnya sudut kemiringan pipa. Hal ini terlihat dari posisi kurva yang secara umum berurutan dari bawah ke atas seiring dengan kenaikan sudut dari 0° ke 5° . Secara spesifik, kecepatan puncak aliran meningkat dari 1.00141 m/s pada sudut kemiringan 0° menjadi 1.56164 m/s pada sudut kemiringan 5° .

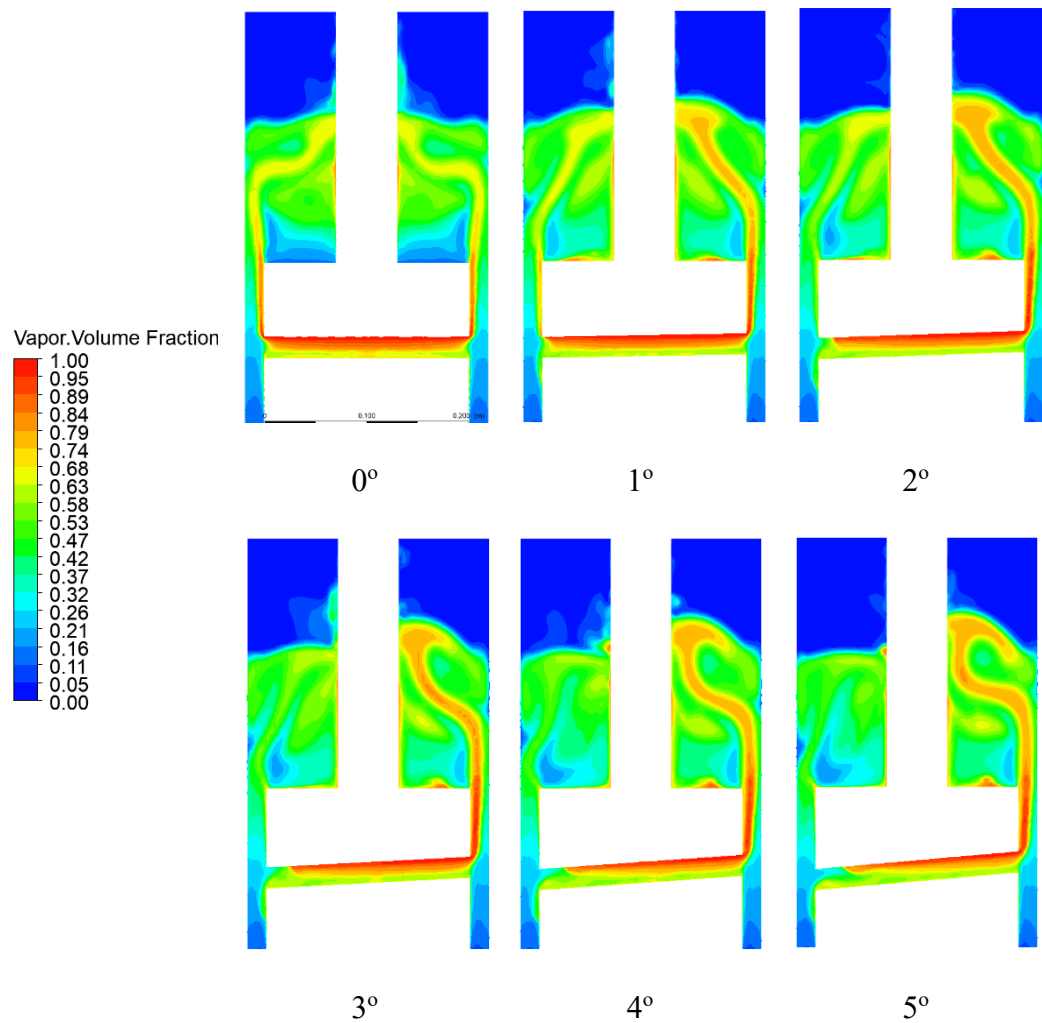
Peningkatan kecepatan ini dapat dijelaskan oleh meningkatnya pengaruh komponen gaya gravitasi yang bekerja searah dengan sumbu pipa pada sudut yang lebih curam. Gaya gravitasi ini memberikan percepatan tambahan pada massa fluida, mendorongnya untuk mengalir lebih cepat. Distribusi variasi kecepatan fluida dalam bentuk kontur bisa dilihat pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Kontur kecepatan fluida terhadap variasi sudut kemiringan pipa air.

4.4.5 *Vapor Volume Fraction*

Kontur permukaan *vapor volume fraction* memperlihatkan visualisasi uap yang tercipta pada *boiler laundry*. Data diambil pada plane XY yang ditunjukkan dengan Gambar 4.16. Gambar akan memvisualisasikan pembentukan uap yang notasikan dengan warna, warna biru (0) diartikan belum terbentuk uap sama sekali atau di bagian bawah geometri terisi air dan di bagian atas geometri terisi udara, warna merah (1) diartikan uap sudah terbentuk sepenuhnya.



Gambar 4.16 Kontur *vapor volume fraction* terhadap variasi sudut kemiringan pipa air.

Rangkaian Gambar 4.16 tersebut menampilkan visualisasi kontur dari *vapor volume fraction* (fraksi volume uap) pada lima kondisi variasi derajat yang berbeda, dari 0 hingga 5 derajat. Saat membandingkan keenam variasi tersebut, ada perbedaan yang signifikan dalam pola distribusi uap, terlihat dari pola kenaikan uap pada ketinggian boiler laundry di mana variasi 5 derajat mencapai ketinggian paling tinggi sedangkan variasi 0 derajat paling rendah dikarenakan tidak ada kemiringan. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan variasi derajat dari 0 hingga 5 memiliki pengaruh terhadap perilaku pembentukan dan distribusi fraksi volume uap di dalam

geometri tersebut. Fenomena ini sangat relevan dalam aliran dua fasa, di mana peningkatan kemiringan membantu mengevakuasi fasa uap yang lebih ringan dengan lebih efektif dan mencegah terjadinya stagnasi. Hal ini sejalan dengan pengamatan dari (Howlader, Moharana and Das, 2023b) yang mencatat bahwa peningkatan kemiringan menyebabkan aliran VVF (*Vapor Volume Fraction*) lebih cepat menuju lubang keluar dan uap berlangsung lebih singkat pada geometri pipa air.

Berdasarkan analisis komprehensif terhadap variabel-variabel kunci performa termal dan dinamika fluida, ditetapkan bahwa kondisi modifikasi yang paling optimal adalah penerapan sudut kemiringan pipa air sebesar 5° dengan konfigurasi sistem sebanyak 11 pipa. Keputusan ini didasarkan pada bukti kuantitatif yang menunjukkan bahwa variasi ini secara konsisten memberikan hasil yang paling unggul dibandingkan dengan kondisi lainnya.

4.6 Perbandingan Hasil Kondisi Eksisting dan Modifikasi

4.6.1 *Heat Flux*

Nilai *heat flux* ditampilkan untuk melihat seberapa besar laju perpindahan energi panas melalui suatu permukaan per satuan luas pada *boiler laundry*. Data diambil dari nilai rata-rata di setiap komponen pada CFD-Post, lalu dijumlahkan keseluruhan komponennya. Besaran *heat flux* pada geometri pemanasan ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Perbandingan *heat flux* kondisi eksisting dan modifikasi.

Kondisi	<i>Heat Flux</i> (kW/m ²)	Persentase Kenaikan
Eksisting (7 Pipa air dan sudut kemiringan 0°)	995.38	128%
Modifikasi (11 Pipa air dan sudut kemiringan 5°)	2266.101	

Tabel 4.3 secara ringkas menyajikan hasil akhir yang menunjukkan dampak dari modifikasi yang diterapkan pada sistem. Terlihat bahwa fluks panas (heat flux) meningkat secara dramatis dari 995.38 kW/m² pada kondisi eksisting (7 pipa dengan sudut kemiringan 0°) menjadi 2266.101 kW/m² pada kondisi modifikasi (11 pipa dengan sudut kemiringan 5°). Peningkatan absolut ini merepresentasikan kenaikan performa perpindahan panas sebesar 128%, sebuah lompatan yang sangat signifikan.

Kenaikan yang masif ini dapat diatribusikan pada kombinasi dua faktor utama yang telah dianalisis sebelumnya. Pertama, penambahan jumlah pipa dari 7 menjadi 11 secara langsung memperluas total area permukaan perpindahan panas. Kedua, perubahan sudut kemiringan pipa air dari 0° menjadi 5° yang mempengaruhi laju aliran fluida. Hasil ini sesuai dengan studi dari (Howlader, Moharana and Das, 2023a; Kouzegar Ghiyasi and Hossainpour, 2025).

4.6.2 *Heat Transfer Coefficient*

Nilai *heat transfer coefficient* ditampilkan untuk melihat seberapa baik laju perpindahan energi panas antar permukaan padat dan fluida pada *boiler laundry*. Data diambil dari nilai rata-rata di setiap komponen pada CFD-Post, lalu dijumlahkan keseluruhan komponennya. Besaran *Heat Transfer Coefficient* (HTC) pada geometri pemanasan ditunjukkan pada Tabel 4.4.

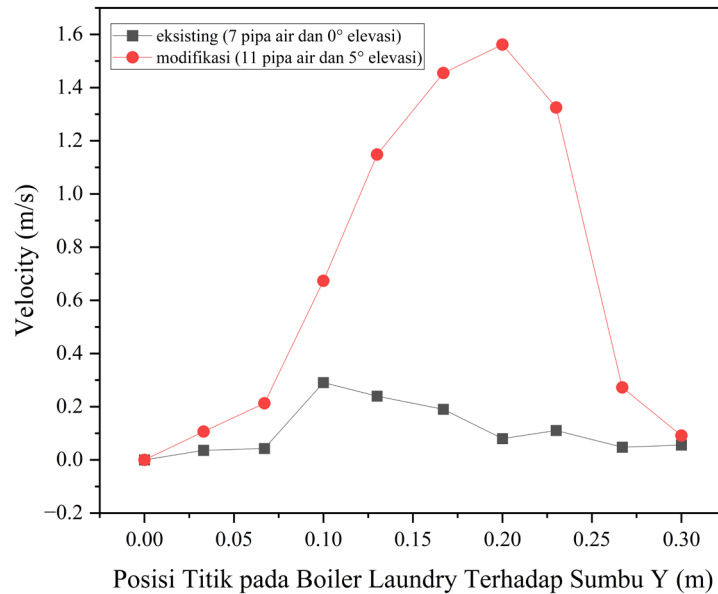
Tabel 4.4 Perbandingan *Heat Transfer Coefficient* kondisi eksisting dan modifikasi.

Kondisi	HTC	Persentase Kenaikan
Eksisting (7 Pipa air dan sudut kemiringan 0°)	123.09	58%
Modifikasi (11 Pipa air dan sudut kemiringan 5°)	194.02	

Tabel 4.4 menyajikan perbandingan nilai Koefisien Perpindahan Kalor (*Heat Transfer Coefficient* atau HTC) antara kondisi eksisting (awal) dengan kondisi setelah dilakukan modifikasi. Pada kondisi eksisting, tercatat nilai HTC sebesar 123.09 kW/m²K. Setelah modifikasi diterapkan, nilai HTC meningkat secara signifikan menjadi 194.02 kW/m²K, yang menandai adanya kenaikan persentase sebesar 58%. Informasi ini melengkapi data sebelumnya, di mana terungkap bahwa meskipun nilai HTC 194.02 kW/m²K tetap konstan selama variasi modifikasi dari 0 hingga 5 derajat, nilai tersebut sebenarnya merupakan sebuah peningkatan substansial sebesar 58% jika dibandingkan dengan performa kondisi eksisting dikarenakan penambahan luas pemanasan dari boiler. Hal ini membuktikan bahwa modifikasi yang dilakukan secara fundamental sangat efektif dalam memperbaiki efisiensi perpindahan kalor.

4.6.3 Distribusi Kecepatan Fluida

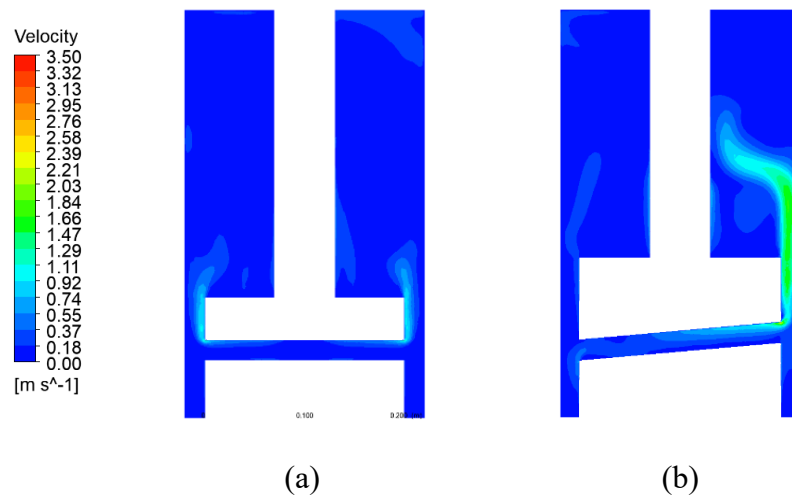
Grafik perbandingan distribusi kecepatan fluida pada *boiler laundry* kondisi eksisting dan modifikasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.17, dengan koordinat yang sudah didefinisikan pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.10.



Gambar 4.17 Perbandingan grafik kecepatan fluida kondisi eksisting dan modifikasi.

Gambar 4.17 menampilkan perbandingan profil kecepatan fluida antara kondisi eksisting (7 pipa air dan 0° kemiringan) dan kondisi setelah modifikasi (11 pipa air dan 5° kemiringan), yang diukur pada posisi melintang (sumbu Y). Terdapat perbedaan yang sangat drastis antara kedua kurva. Pada kondisi eksisting (garis hitam), aliran fluida cenderung lambat dan memiliki profil yang relatif datar, dengan kecepatan puncak yang sangat rendah, hanya sebesar 0.291 m/s. Sebaliknya, setelah modifikasi (garis merah), terjadi peningkatan kecepatan yang masif di hampir seluruh penampang. Profil alirannya berubah menjadi kurva berbentuk puncak yang tajam, dengan kecepatan maksimum meroket hingga sebesar 1.56 m/s, atau hampir lima kali lebih tinggi dibandingkan kondisi awal. Selain peningkatan magnitudo kecepatan, lokasi titik puncak kecepatan juga bergeser dari $Y=0.10$ m pada kondisi eksisting menjadi $Y=0.20$ m pada kondisi modifikasi, hal ini dikarenakan kecepatan fluida mengalir lebih cepat pada kondisi yang sama menyebabkan titik tertinggi terletak di titik yang lebih tinggi dari kondisi

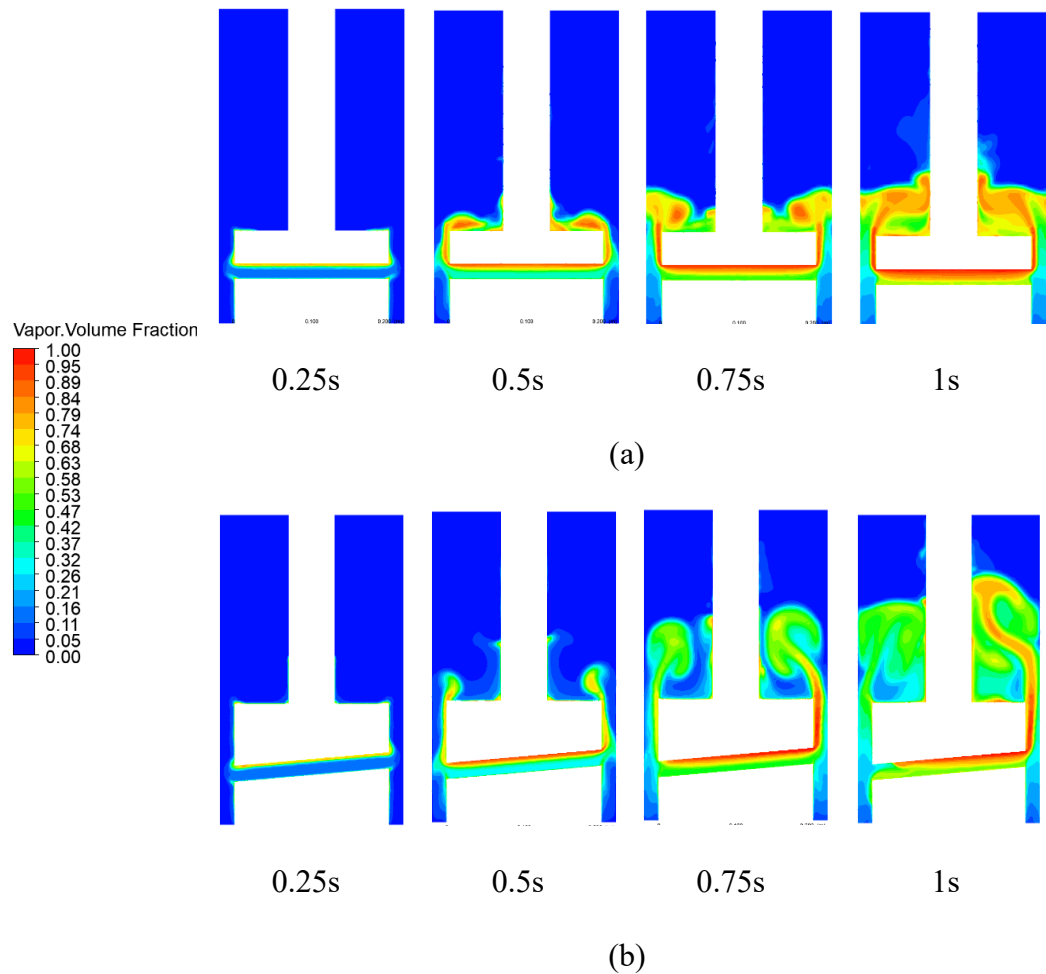
sebelumnya. Secara keseluruhan, grafik ini dengan jelas menunjukkan bahwa modifikasi yang diterapkan sangat berhasil dalam mempercepat laju aliran fluida secara signifikan. Visualisasi distribusi kecepatan fluida perbandingan bisa dilihat pada Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Perbandingan kontur kecepatan fluida kondisi (a) eksisting (7 pipa air dan sudut kemiringan 0°) dan (b) modifikasi (11 pipa air dan sudut kemiringan 5°).

4.6.4 *Vapor Volume Fraction*

Kontur permukaan *vapor volume fraction* memperlihatkan visualisasi uap yang tercipta pada *boiler laundry*. Data diambil pada plane XY yang ditunjukkan dengan Gambar 4.19. Gambar akan memvisualisasikan pembentukan uap yang notasikan dengan warna, warna biru (0) diartikan belum terbentuk uap sama sekali atau di bagian bawah geometri terisi air dan di bagian atas geometri terisi udara, warna merah (1) diartikan uap sudah terbentuk sepenuhnya.



Gambar 4.19 Perbandingan kontur *vapor volume fraction* kondisi (a) eksisting (7 pipa air dan sudut kemiringan 0°) dan (b) modifikasi (11 pipa air dan sudut kemiringan 5°) terhadap waktu.

Rangkaian gambar tersebut menampilkan perbandingan evolusi *vapor volume fraction* (fraksi volume uap) dari waktu 0.25 detik hingga 1 detik antara desain eksisting (7 pipa air dan sudut kemiringan 0°) dan modifikasi (11 pipa air dan sudut kemiringan 5°). Pada desain eksisting, pembentukan uap berlangsung lebih lambat dan cenderung simetris; uap terkumpul di bagian pipa air dan mulai naik sebagai gelembung besar yang teratur setelah waktu 0.5 detik. Sebaliknya, pada desain modifikasi, proses pembentukan dan distribusi uap terjadi secara signifikan lebih cepat dan lebih dinamis. Perbedaan paling mencolok terlihat pada waktu 0.75 detik dan 1 detik, di mana volume sistem yang terisi oleh fasa uap pada desain modifikasi

jauh lebih luas dan telah mencapai ketinggian yang lebih tinggi di saluran vertikal dibandingkan desain eksisting. Hal ini menunjukkan bahwa geometri yang dimodifikasi mampu mempercepat laju pembentukan dan distribusi uap secara lebih efektif dalam rentang waktu yang sama. Hal ini sejalan dengan pengamatan dari (Howlader, Moharana and Das, 2023b) yang mencatat bahwa peningkatan kemiringan menyebabkan aliran VVF (*Vapor Volume Fraction*) lebih cepat menuju lubang keluar dan stagnasi berlangsung lebih singkat.

4.7 Perbandingan Kinerja Kondisi Eksisting dan Modifikasi

4.7.1 Data Uji Kondisi Eksisting (7 pipa air dan sudut kemiringan 0°)

Notasi T1, T2, T3, T4 dan T5 menunjukkan titik yang diukur pada *boiler* dengan flir *thermoimager*, koordinat dari titik tersebut sudah dijelaskan pada Gambar 3.5.

Tabel 4.5 Data uji percobaan 1 kondisi eksisting.

No	Kondisi Tekanan	Temperature					Berat Gas	Waktu
		T1	T2	T3	T4	T5		
1	0 bar	31,2	31,2	31,2	31,2	31,2	26,585	0
2	0.5 bar	119,4	108,8	78,7	188,1	248,2		12:31.57
3	1 bar	137,1	136,8	109	189,3	250,5		13:48.43
4	1.5 bar	149,6	131,3	132,8	198,6	265,5		14:50.69
5	2 bar	151,8	149,6	147,4	202,2	233,3		16:29.41
6	2.5 bar	163,5	163,1	164,3	215,7	297,3		17:59.10
7	2.6 bar	172,8	173,8	172,7	195,1	243	26,395	18:30.78
Massa air (kg)								1,19

No	Kondisi Tekanan	Temperature					Berat Gas	Waktu
		T1	T2	T3	T4	T5		
Massa LPG (kg)								0.616

Tabel 4.6 Data uji percobaan 2 kondisi eksisting.

No	Kondisi Tekanan	Temperature					Berat Gas	Waktu
		T1	T2	T3	T4	T5		
1	0 bar	30,7	33	34,8	33	33	26,89	0
2	0.5 bar	103	61,1	62,7	172,5	198,2		11:15.67
3	1 bar	137,4	103,5	105,9	184,3	257,2		12:35.20
4	1.5 bar	147,3	126,1	133,6	211,1	270,8		13:41.39
5	2 bar	154,8	146,5	146,6	218,7	306,2		15:37.06
6	2.5 bar	163,5	159,3	161,6	210,8	299,2		16:37.65
7	2.6 bar	173,8	174,2	175,5	201,1	202,5	26,75	17:15.22
Massa air (kg)								1,19
Massa LPG (kg)								0.454

Tabel 4.7 Data uji percobaan 3 kondisi eksisting.

No	Kondisi Tekanan	Temperature					Berat Gas	Waktu
		T1	T2	T3	T4	T5		
1	0 bar	34,5	34,2	34,5	34,2	34,2	26,63	0
2	0.5 bar	115,4	70,6	77,2	184,1	280		14:15.75
3	1 bar	138,5	104,1	107,4	195,7	275,1		15:34.82
4	1.5 bar	143	130,4	132,7	213,1	267,6		16:41.32

No	Kondisi Tekanan	Temperature					Berat Gas	Waktu
		T1	T2	T3	T4	T5		
5	2 bar	151,9	149,3	148,8	220,6	274,7		17:51.52
6	2.5 bar	158,8	160,7	159,9	223,6	291,6		19:10.76
7	2.6 bar	175,8	172,7	170,5	208,2	212	26,47	19:12.14
Massa air (kg)								1,19
Massa LPG (kg)								0.518

Perhitungan Kapasitas Uap

$$m_{Uap} = m_{Air}$$

$$m_{Uap} = 1,19 \text{ kg}$$

$$Q_{Uap} = m_{Uap} \times (h_g - h_l)$$

$$Q_{Uap} = 1,19 \text{ kg} \times (2733,25 - 125,73) \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{Uap} = 3100,57 \text{ kJ}$$

Perhitungan Kebutuhan Energi Boiler

$$Q_{Boiler} = G_{LPG} \times NCV$$

$$Q_{Boiler} = G_{LPG (avg)} \times NCV$$

$$Q_{Boiler} = 0,53 \text{ kg} \times 46000 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{Boiler} = 23480 \text{ kJ}$$

Perhitungan Kebutuhan Energi Boiler

$$\eta = \frac{Q_{uap}}{Q_{boiler}} \times 100$$

$$\eta = \frac{3100,57 \text{ kJ}}{23480 \text{ kJ}} \times 100$$

$$\eta = 13,2\%$$

Diketahui efisiensi boiler eksisting sebesar 13,2 %, dan mencapai tekanan 3,6 bar (abs) dengan waktu rata rata 18 menit.

4.7.2 Data Uji Kondisi Modifikasi (11 pipa air dan sudut kemiringan 5°)

Notasi T1, T2, T3, T4 dan T5 menunjukkan titik yang diukur pada *boiler* dengan flir *thermoimager*, koordinat dari titik tersebut sudah dijelaskan pada Gambar 3.5.

Tabel 4.8 Data uji percobaan 1 kondisi modifikasi.

No	Kondisi Tekanan	Temperature					Berat Gas	Waktu
		T1	T2	T3	T4	T5		
1	0 bar	34,9	36,8	37,5	38,4	35,5	22,175	0
2	0.5 bar	93,9	65,2	53,2	126	201,4		04:37,6
3	1 bar	112,5	74,7	63,9	144,9	202		06:22,7
4	1.5 bar	138,7	97,6	95,4	166,4	237,7		08:27,0
5	2 bar	152,1	119,2	114,4	170,6	245,6		09:29,9
6	2.5 bar	154,1	132,1	131,4	168,6	239,9		10:25,2
7	2.6 bar	163,8	150	146	175,8	227,5	22,075	10:42,4
Massa air (kg)								1,95
Massa LPG (kg)								0,6

Tabel 4.9 Data uji percobaan 2 kondisi modifikasi.

No	Kondisi Tekanan	Temperature					Berat Gas	Waktu
		T1	T2	T3	T4	T5		
1	0 bar	34,9	36,8	37,5	38,4	35,5	22,175	0
2	0.5 bar	93,9	65,2	53,2	126	201,4		04:37,6

No	Kondisi Tekanan	Temperature					Berat Gas	Waktu
		T1	T2	T3	T4	T5		
3	1 bar	112,5	74,7	63,9	144,9	202		06:22,7
4	1.5 bar	138,7	97,6	95,4	166,4	237,7		08:27,0
5	2 bar	152,1	119,2	114,4	170,6	245,6		09:29,9
6	2.5 bar	154,1	132,1	131,4	168,6	239,9		10:25,2
7	2.6 bar	163,8	150	146	175,8	227,5	22,075	10:42,4
Massa air (kg)								1,95
Massa LPG (kg)								0,6

Tabel 4.10 Data uji percobaan 3 kondisi modifikasi.

No	Kondisi Tekanan	Temperature					Berat Gas	Waktu
		T1	T2	T3	T4	T5		
1	0 bar	34,9	36,8	37,5	38,4	35,5	21,98	0
2	0.5 bar	77,3	58,1	51,5	120,5	161,1		04:05,5
3	1 bar	107	70,7	64,6	129,4	178,4		05:52,5
4	1.5 bar	138,4	97,8	95	163,6	225,8		08:01,9
5	2 bar	149,5	116,1	113,7	165,3	215,8		09:03,9
6	2.5 bar	158,1	131,1	127	158,2	210,9		09:54,3
7	2.6 bar	161	141,6	137,3	174,1	247	21,835	10:09,7
Massa air (kg)								4,13
Massa LPG (kg)								0,87

Perhitungan Kapasitas Uap

$$m_{Uap}(avg) = m_{Air}(Avg)$$

$$m_{Uap} = 2,12 \text{ kg}$$

$$Q_{Uap} = m_{Uap} \times (h_g - h_l)$$

$$Q_{Uap} = 2,12 \text{ kg} \times (2733,25 - 125,73) \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{Uap} = 5527,94 \text{ kJ}$$

Perhitungan Kebutuhan Energi Boiler

$$Q_{Boiler} = G_{LPG} \times NCV$$

$$Q_{Boiler} = G_{LPG} (avg) \times NCV$$

$$Q_{Boiler} = 0,67 \text{ kg} \times 46000 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{Boiler} = 30820 \text{ kJ}$$

Perhitungan Kebutuhan Energi Boiler

$$\eta = \frac{Q_{uap}}{Q_{boiler}} \times 100$$

$$\eta = \frac{5527,94 \text{ kJ}}{30820 \text{ kJ}} \times 100$$

$$\eta = 18 \%$$

Diketahui efisiensi boiler hasil modifikasi sebesar 18 %, dan dengan waktu mencapai tekanan 3,6 bar (abs) dengan waktu rata rata 10 menit.

Tabel 4.11 Perbandingan performa *boiler laundry* antara kondisi eksisting dan mofikasi

Kondisi	Efisiensi Boiler	Persentase Kenaikan	Waktu Pemanasan	Persentase Penurunan
Eksisting (7 Pipa air dan sudut kemiringan 0°)	13,2 %	36 %	18 menit	44 %

Kondisi	Efisiensi Boiler	Persentase Kenaikan	Waktu Pemanasan	Persentase Penurunan
Modifikasi (11 Pipa air dan sudut kemiringan 5°)	18 %		10 menit	

Tabel 4.11 menyajikan perbandingan performa kunci antara kondisi *boiler* eksisting dengan kondisi setelah dilakukan modifikasi. Terdapat dua aspek utama yang ditampilkan: efisiensi dan waktu pemanasan. Dari segi efisiensi, modifikasi berhasil meningkatkan Efisiensi Boiler secara signifikan dari 13,2% menjadi 18%, yang setara dengan persentase kenaikan sebesar 36%. Sejalan dengan peningkatan efisiensi tersebut, Waktu Pemanasan yang dibutuhkan untuk mencapai tekanan 3,6 bar (abs) juga menjadi jauh lebih cepat, berkurang drastis dari 18 menit pada kondisi awal menjadi hanya 10 menit setelah modifikasi. Penghematan waktu ini merepresentasikan persentase penurunan sebesar 44%. Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa modifikasi yang diterapkan sangat berhasil, menghasilkan boiler yang tidak hanya lebih efisien dalam penggunaan energi, tetapi juga secara signifikan lebih cepat dalam mencapai kondisi operasionalnya.

4.8 Tekno Ekonomi pada *boiler laundry* kondisi modifikasi

Dalam pembuatan *boiler laundry* menghabiskan dana sebesar Rp. 3.023.000,00 dengan rincian pada Tabel 4.12

Tabel 4.12 Rincian biaya pembuatan *boiler laundry* kondisi modifikasi.

No	Jenis	Qty	Harga
1.	Plat ST 37	1.3 m ²	Rp. 520.000,00
2.	Pipa Astm A53	1.5 m (3/4 inch)	Rp. 350.000,00
3.	Utilitas (valve dll)		Rp. 900.000,00

4.	Jasa		Rp. 600.000,00
6.	PLC (dll.)		Rp. 653.000,00
Jumlah			Rp. 3.023.000,00

Dengan Harga Pasar kompetitor ukuran 15 liter sebesar Rp. 4.000.000,00 dengan mengunakan perbandingan lurus 13 liter didapat harga pasar Rp 3.500.000,00. Dan dari biaya pembuatan kita ambil margin keuntungan sebesar 10% di dapat hasil akhir pasar boiler team kami sebesar Rp. 3.300.000,00 dapat disimpulkan boiler kami memiliki harga yang lebih murah di banding boiler yang ada di pasaran. Sehingga dapat bersaing di pasar sekarang.

Dari segi keunggulan ekonomis didapatkan keunggulan dalam penggunaan pemakaian sebagai berikut

$$\frac{efesiensi\ modifikasi - Efesiensi\ eks}{Efesiesnsi\ mosifikasi} \times Harga\ LPG\ 3\ kg$$

$$\frac{18 - 13,8}{18} \times Rp\ 22.000$$

$$Rp\ 5.200,00$$

Dengan menggunakan boiler kami dapat menghemat Setiap biaya isi ulang Lpg 3 kg sebesar Rp. 5.200,00.