

Simulasi Perpindahan Panas pada Pipa *Secondary Super Heater* (SSH) PLTU 600 MW dengan CFD

Gugum Gumilar¹ dan Tarsisius Kristiyadi¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional, Bandung, Indonesia

go3m_gumilar@yahoo.co.id, kristiyadi@itenas.ac.id

Abstrak

Boiler merupakan unit penting pada PLTU yang didalamnya terdapat *superheater* untuk memanaskan uap agar panas dan kekeringannya meningkat sehingga menjadi uap panas lanjut. Permasalahan terjadi pipa *secondary superheater* pecah karena mengalami panas berlebih akibat adanya deposit lapisan oksida didalamnya. Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan perpindahan panas pada pipa SSH yang mengalami pecah. Dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics* model pipa dibuat 3 model yaitu tanpa sumbatan, sumbatan di ujung, dan pipa dengan sumbatan di tengah. Simulasi dilakukan dalam *steady state*, data operasional *boiler* seperti parameter tekanan, temperatur, kecepatan aliran dan laju aliran massa. Hasil simulasi menampilkan profil warna yang berbeda-beda untuk temperatur, kecepatan aliran dan tekanan untuk uap di dalam pipa dan untuk *flue gas* di luar pipa. *Heat transfer rate* area *flue gas* lebih tinggi sekitar 800.000 kW, area uap di dalam pipa sekitar 80 kW, *mass flow rate* uap sebesar 0,046 kg/s sedangkan di area *flue gas* sebesar 0,130 kg/s. Kecepatan aliran uap rata-rata berkisar 1 m/s, maksimum 12 m/s pada model pipa dengan sumbatan, kecepatan aliran *flue gas* rata-rata berkisar 9 sampai 10 m/s. Temperatur uap rata-rata 600°C, dan 800°C hingga 900°C. Tekanan uap tidak mengalami perubahan yaitu sebesar 16.000.000 Pa dan tekanan *flue gas* 100.000 Pa.

Kata kunci: PLTU, *secondary superheater*, *computation fluid dynamics*, *heat transfer rate*

Abstract

The boiler is an important unit in the PLTU in which there is a Superheater to heat the steam so that increase and becomes superheated steam. The problem is secondary superheater pipe bursts due to excessive heat due to the deposit of the oxide layer in it. This study aims to simulate heat transfer in SSH pipes. with Computational Fluid Dynamics, 3 models are made, without a blockage, blockage at the end, and blockage in the middle. The simulation in a steady state, boiler operational data ; pressure, temperature, velocity flow and mass flow rate. The results show different color profiles for temperature, flow velocity and pressure for the steam and for flue gas. Flue gas heat transfer rate is higher around 800,000 kW, and steam is around 80 kW, Steam mass flow rate is 0.046 kg/s while in the flue gas area it is 0.130 kg/s. The average steam flow rate is around 1 m/s, the maximum is 12 m/s in blocked pipe models, Flue gas flow rate is around 9 to 10 m/s. The average steam temperature is 600°C, and 800°C to 900°C. Steam pressure constant in 16,000,000 Pa and flue gas pressure is 100,000 Pa.

Keywords: PLTU, Secondary Super Heater, Computation Fluid Dynamics, Heat Transfer Rate

1. Pendahuluan

Boiler merupakan salah satu peralatan utama pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap melalui proses pemanasan pada pipa-pipa penguap (*evaporator tubes*) dengan sumber panas yang didapat dari proses pembakaran bahan bakar yang berasal dari batu bara di ruang bakar. Energi panas dari pembakaran yang dihasilkan kemudian dipindahkan ke fluida kerja berupa air untuk memproduksi uap tekanan tinggi yang digunakan untuk menggerakkan turbin. Terdapat tiga proses perpindahan panas yang terjadi dalam *boiler*, yaitu radiasi di ruang bakar, konveksi di ruang *air heater*, dan kombinasi radiasi dan konveksi di *superheater* dan *eeheater* (M.J. Djokosetyardjo, 2003).

Proses perpindahan panas secara radiasi pada *boiler* terjadi pada area ruang bakar *boiler* dan tidak memerlukan media penghantar panas. Gas panas hasil pembakaran batubara dengan temperatur tinggi yang akan dibuang ke udara luar akan mengenai pipa *boiler* dan mengakibatkan pipa menjadi panas.

Perpindahan panas secara konduksi terjadi melalui media perantara yaitu dinding pipa *bolier* tetapi tanpa disertai perpindahan partikel-partikel media/pipa tersebut. Sedangkan perpindahan panas secara konveksi terjadi di dalam pipa disertai dengan perpindahan media penghantar panasnya yaitu uap panas tersebut. *Superheater* adalah sebuah alat penukar panas yang kinerjanya sangat dipengaruhi oleh mekanisme perpindahan panas konveksi dan konduksi yang terjadi didalamnya. Perpindahan panas konveksi sangat dipengaruhi oleh kecepatan dan pola aliran fluida. Sedangkan perpindahan panas konduksi dipengaruhi oleh konduktifitas termal material/bahan pipa alat penukar panas itu sendiri.

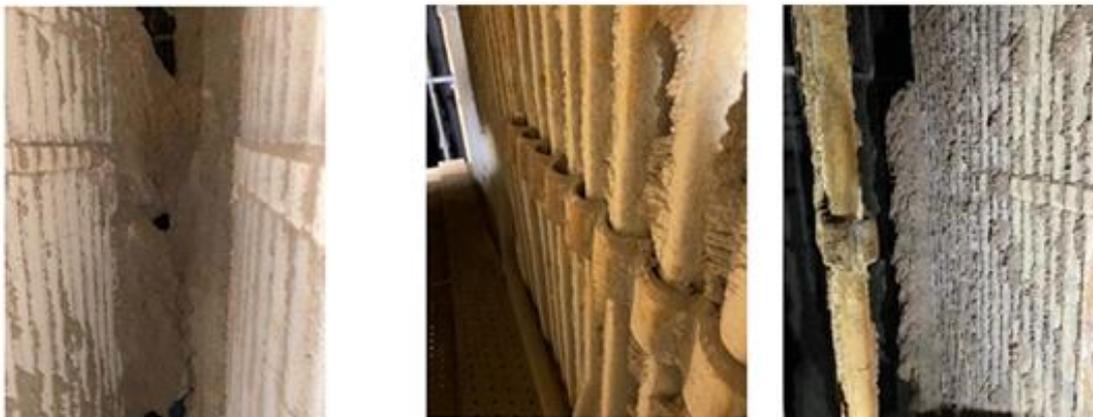
Info Makalah:

Dikirim : 03-24-23;
Revisi 1 : 06-30-23;
Revisi 2 : 07-19-23;
Revisi 3 : 08-03-23;
Diterima : 08-07-23.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62 815-7177-874
e-mail : go3m_gumilar@yahoo.co.id

Gambar 1 menunjukkan bagian *boiler* yaitu susunan pipa SSH yang secara visual di beberapa bagian sudah mengalami *aging*, *slag deposit* dan terdapat *oxide scale* pada bagian luarnya.



Gambar 1. Pipa SSH Tampak Luar yang Terdapat Deposit.

Kondisi ini menyebabkan kinerja kerja *boiler* akan menurun bila dilihat dari usia pakainya. Hal ini disebabkan adanya pengaruh masa pakai dari mesin, pengoperasian, pemeliharaan *boiler*, dan pengaruh banyaknya kerugian panas yang terjadi. *Boiler* yang mengalami penurunan kinerja tentu memerlukan biaya pemeliharaan yang cukup banyak. Hal tersebut bisa terjadi karena adanya reparasi dan penggantian komponen pada pipa *boiler* salah satunya adalah pipa SSH.

Pipa SSH mengalami *short term overheat*, disebabkan karena terdapat penumpukan deposit lapisan oksida di bagian dalam di area *elbow* pipa SSH sehingga terjadi perubahan kecepatan aliran uap dan berakibat pada massa uap yang mengalir di area pipa tersebut menjadi lebih sedikit dan tidak mencukupi untuk menyerap semua panas dari *flue gas* yang seharusnya diserap oleh uap panas di dalam pipa tersebut. Meskipun pipa SSH sudah diganti dengan pipa baru tapi kegagalan masih terjadi karena terganggunya aliran uap panas akibat adanya serbuk deposit yang menumpuk di daerah *elbow* pipa. Masuknya serbuk deposit oksida ke dalam pipa baru tersebut terjadi pada saat pembangkit dilakukan *start up* di mana pada saat kondisi *start up*, aliran massa uap yang mengalir di pipa baru tersebut lebih banyak karena laluanannya masih bebas sumbatan dibandingkan dengan pipa lainnya yang sudah lama digunakan.

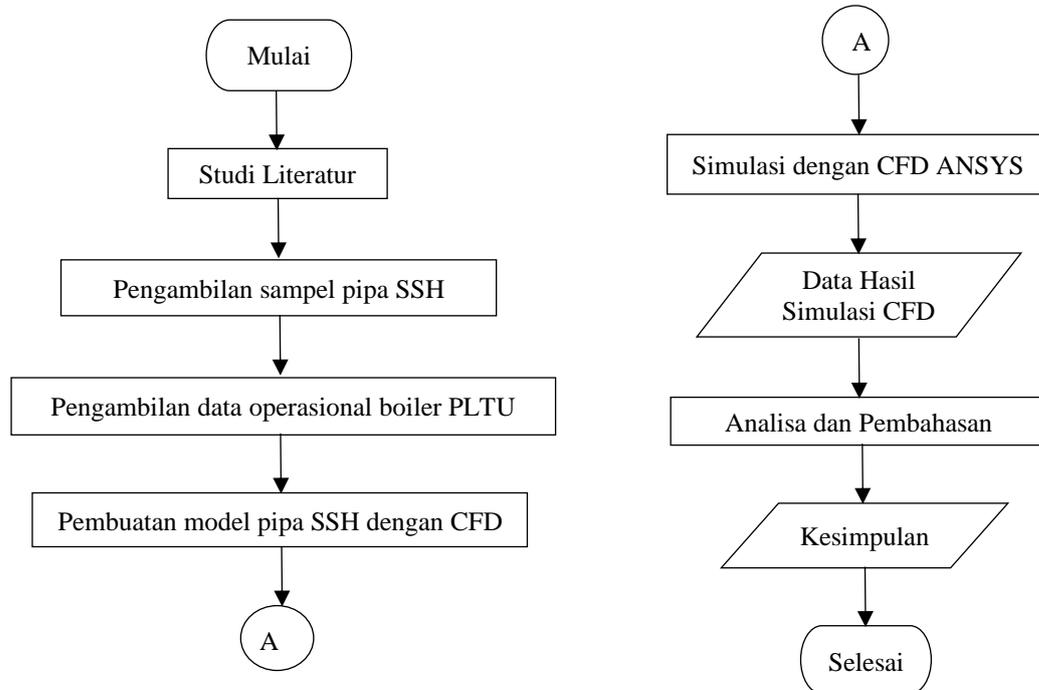
Superheater merupakan salah satu alat pada *boiler* yang berfungsi untuk menaikkan temperatur uap jenuh sampai menjadi uap panas lanjut (*superheated steam*). Komponen *superheater* mempunyai fungsi yang sangat penting, karena apabila komponen mengalami gangguan maka kualitas uap panas yang dihasilkan menjadi lebih rendah dan menyebabkan daya (*output power*) yang dihasilkan turbin menjadi lebih rendah (Viki Wahyu Endriyana dkk, 2013). Komponen *boiler* yang sangat berisiko mengalami panas berlebih adalah pada pipa penukar panas di *superheater*, *superheater* mengalami temperatur operasi yang cukup tinggi (Ryno Laubscher dan Pieter Rousseau, 2019). Degradasi akibat panas yang berlebih akan bertambah seiring dengan naiknya temperatur, tegangan dan juga waktu (Dillon dkk, 2011)

Malfin, (2018) telah melakukan penelitian bahwa setiap kenaikan bilangan *Reynold* akan berdampak pada nilai perpindahan panas. Banyaknya fluida yang masuk ke dalam suatu aliran per satuan waktu akan memiliki bilangan *Reynold* yang tinggi sehingga nilai performa perpindahan panas juga akan tinggi dibandingkan dengan fluida dengan bilangan *Reynold* yang kecil. Pipa SSH yang mengalami kegagalan seperti pecah dari bagian dalam ditandai adanya penurunan ketebalan dinding pipa akibat korosi sumuran, dengan temperatur dan tekanan yang tinggi ini menyebabkan pipa SSH menerima beban panas berlebih dan terjadi pecah (Lusiana dkk, 2019). Pemodelan dengan CFD dilakukan untuk menampilkan profil kecepatan aliran uap, temperatur dan tekanan di dalam area *superheater* (Mariusz Granda dkk, 2020). Dalam bidang keteknikan metode CFD (*Computational fluid Dynamics*) merupakan salah satu cara mudah untuk menyelesaikan suatu persamaan-persamaan yang berkaitan dengan dinamika fluida menggunakan komputer. CFD memiliki kelebihan untuk melakukan perhitungan dalam waktu yang singkat dan biaya yang cukup terjangkau dibandingkan dengan eksperimen, CFD juga dapat mengetahui fenomena aliran fluida (Rossi Cahyaningdias dan Ary Bachtiar Krishna Putra, 2019). Kajian mengenai analisa kegagalan material pada pipa SSH akibat terjadinya *short term overheat* sudah dilakukan oleh peneliti sebelumnya dan belum dilakukan kajian meliputi pemodelan pipa dengan CFD. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui penyebab kegagalan pipa sehingga terjadi pecah/sobek, yaitu dengan melihat hasil dari simulasi CFD pada model pipa SSH yang tanpa sumbatan aliran (bersih), dan pipa SSH dengan hambatan aliran di mana variasi posisi hambatan di ujung pipa dan di bagian tengah (horizontal). Sehingga bisa dilihat pengaruhnya terhadap nilai kecepatan aliran, temperatur dan tekanan baik di dalam pipa maupun di luar area pipa. Salah satu metode yang berkembang untuk menganalisis kondisi suatu aliran fluida dengan input yang tanpa batas mulai dari modifikasi geometri hingga ke kondisi operasionalnya (laju aliran massa, tekanan, temperatur, kecepatan

aliran bahkan material fluidanya) adalah dengan menggunakan CFD agar bisa dibandingkan profil warna dari kecepatan aliran, temperatur dan tekanan uap panas dan *flue gas* hasil simulasi dari ketiga model pipa SSH tersebut.

2. Metode

Metodologi penelitian merupakan suatu metode ilmiah dalam sebuah penelitian untuk mencapai tujuan analisa dalam penemuan atau pengembangan suatu pengetahuan. Dalam sebuah penelitian diperlukan sebuah rancangan metode penelitian yang mencakup tahapan-tahapan dalam pemecahan masalah. Metodologi penelitian diperlukan untuk mendapatkan hasil yang dikehendaki dan data yang valid. Alir penelitian dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian,

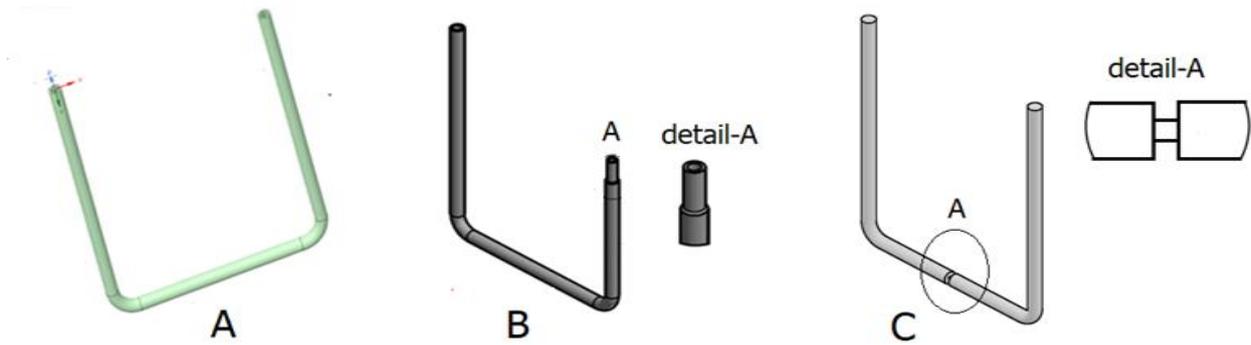
Gambar 2 menunjukkan diagram alir penelitian, dimulai dengan studi literatur dengan mengkaji dari sumber-sumber yang relevan dengan penelitian. Kemudian dengan menyiapkan sampel pipa SSH sebagai objek penelitian untuk dilakukan pengecekan visual, bentuk model, pengukuran dimensional, dan data penunjang lainnya yang diperlukan. Pengambilan data operasi *Boiler* merupakan data operasi seperti temperatur, tekanan, laju aliran massa, kecepatan aliran dan beberapa data lain yang diperlukan untuk simulasi model pipa SSH dengan CFD.

Setelah data terkumpul dilanjutkan dengan membuat model geometri pipa SSH. Dengan variasi 2 model pipa yaitu pipa tanpa hambatan aliran dan model pipa dengan hambatan aliran. Kemudian tahapan selanjutnya adalah proses input parameter dan tahapan simulasi (*running calculate*) dengan menggunakan CFD. Dari hasil simulasi diperoleh tampilan data numerik berupa *heat transfer rate* dan *mass flow rate* juga visualisasi kontur profil dari temperatur, tekanan juga kecepatan aliran untuk uap di dalam pipa dan *flue gas* di luar pipa SSH. Setelah itu dilakukan proses analisis data tahapan ini melakukan pengecekan ulang dan mengevaluasi kembali hasil simulasi apakah terdapat kesalahan atau tidak. Jika data sudah benar akan ditampilkan dalam bentuk tabel maupun bentuk grafik agar mempermudah menarik kesimpulan secara singkat dan jelas dari hasil penelitian yang dilakukan. Aplikasi Ansys R 2022 *student version* digunakan untuk menampilkan visualisasi aliran uap, meliputi kecepatan aliran, temperatur dan juga tekanan di pipa SSH.

2.1 Pre-Processing

Pada tahap *pre-processing* umumnya terdapat tiga tahapan yang harus diselesaikan adapun tiga tahap yaitu; Pertama pembuatan model/geometri pipa SSH, geometri merupakan domain yang berguna sebagai objek penelitian, di mana simulasi fluida dan solid akan terjadi sehingga dalam simulasi CFD bentuk geometri menjadi langkah pertama dalam simulasi. Kedua adalah penentuan domain geometri yang berupa model 3 dimensi dan kondisi operasi yaitu *steady state*. Ketiga adalah pembuatan *mesh* atau *grid* merupakan tahap *pre-processing* pada CFD yang sangat penting, proses *mesh* dapat mempengaruhi salah atau benarnya model simulasi CFD yang digunakan dan kualitas data yang didapatkan.

Ketiga tahap di atas berguna untuk mendefinisikan model dari geometri, domain dan tingkat detail serta kualitas data yang akan disimulasikan.



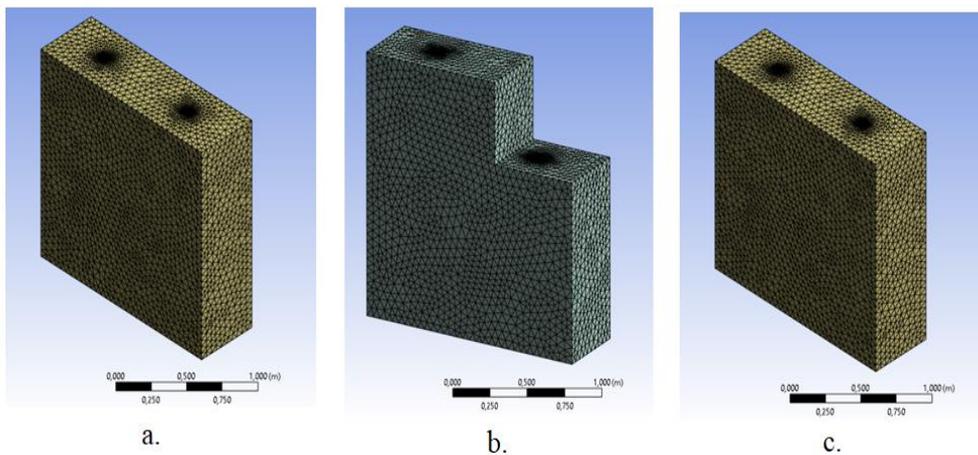
Gambar 3. (a) Model Pipa Tanpa Sumbatan, (b) Model Pipa dengan Sumbatan di Ujung, dan (c) Model Pipa dengan Sumbatan di Tengah.

Geometri untuk model pipa SSH ditampilkan pada tabel 1

Tabel 1. Geometri Pipa SSH.

No.	Dimensi	Nilai ukuran	Satuan
1	Lebar	840	mm
2	Tinggi	1000	mm
3	Diameter luar	50	mm
4	Tebal dinding pipa	7	mm
5	<i>Bounding box</i>	500 × 1600 × 1600	mm ³

Model geometri pipa seperti yang ditampilkan pada Gambar 3 dibuat berbeda untuk melihat bagaimana fenomena aliran uap yang terjadi di dalam pipa pada pipa normal/tanpa sumbatan, ketika aliran mengalami sumbatan baik di ujung pipa maupun sumbatan di bagian tengah pipa. Sedangkan di luar area pipa SSH terdapat area *flue gas*. Untuk memodelkan area *flue gas* dimodelkan *bounding box* untuk ke tiga model pipa SSH. *Bounding box* dimodelkan untuk membatasi area *flue gas* sehingga untuk profil warna temperatur, tekanan dan kecepatan aliran bisa terlihat perbedaannya antara di dalam pipa dengan di luar pipa tersebut. Model *bounding box* yang sudah melalui tahapan *meshing* terlihat seperti pada Gambar 4.

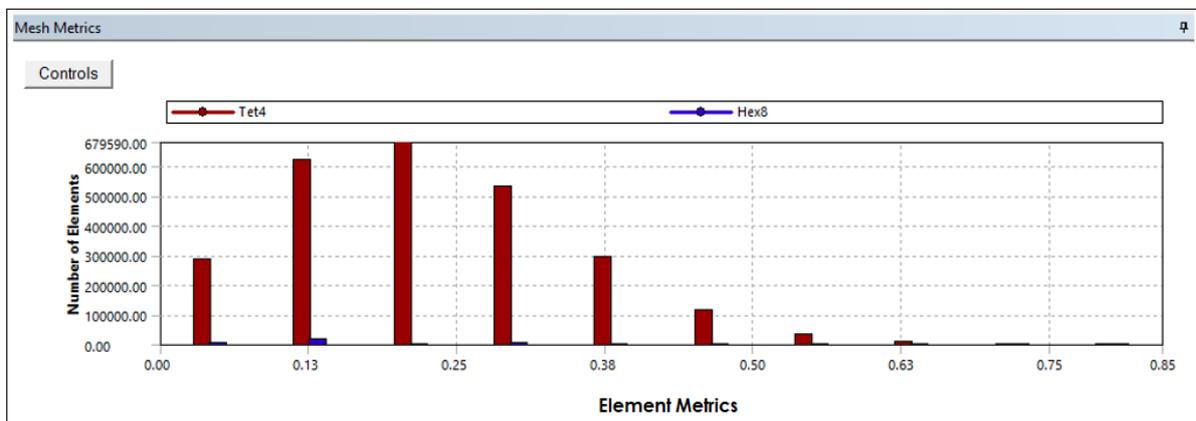


Gambar 4. *Bounding Box* dengan *Mesh* untuk Ketiga Model Pipa.



Gambar 5. Model Pipa SSH dengan *Meshing*.

Meshing atau *grid* adalah proses membagi komponen yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen kecil atau diskrit (Yusra, 2008). Semakin baik kualitas *mesh* maka akan semakin tinggi tingkat konvergensinya. Kualitas *mesh* ini sangat penting untuk menjamin hasil simulasi yang dibuat agar bisa sesuai dengan yang diharapkan visualisasi bagus, atau bahkan pada kondisi tertentu *mesh* yang berkualitas rendah dapat membuat simulasi menjadi divergen. Kualitas *meshing* dapat dilihat pada gambar 6 berikut:



Gambar 6. Grafik Kualitas *Mesh*.

Gambar 6 menunjukkan bahwa grafik elemen metrik paling rendah di angka 0,63 dengan jumlah elemen di bawah 100.000. Sedangkan grafik paling tinggi di angka 0,20 dengan jumlah elemen di atas 650.000. Secara umum kualitas *skewness mesh* baik.

2.2 Processing

Pada tahap *processing* ini terdiri dari *set up* dan *solution*. untuk *set up* ditentukan kondisi batas (*Boundary Condition*) seperti jenis aliran pada simulasi yang akan dilakukan seperti; kondisi simulasi dalam *steady state*, *viscous model* dipilih k-epsilon dengan model standar, pemilihan material pipa yang digunakan adalah baja, kemudian sifat material baja, sifat dari fluida yaitu uap panas, dan *flue gas*, seperti; tekanan, temperatur, laju aliran massa, dan kecepatan aliran. Semua data tersebut dimasukkan dalam data *set up* agar proses simulasi dapat berjalan sesuai dengan yang diharapkan. Data *set up* ditampilkan pada tabel 2.

Tabel 2. Data Set Up Processing.

No.	Komponen Set up	Type	Parameter	Nilai	Satuan
1	Time dependant	Steady-state	Non dimensional	Non dimensional	Non dimensional
2	Viscous model	K-epsilon	Non dimensional	Non dimensional	Non dimensional
3	K-epsilon model	Standard	Non dimensional	Non dimensional	Non dimensional
4	Material pipa	Steel	Non dimensional	Non dimensional	Non dimensional
5	Material fluida	Steam	Non dimensional	Non dimensional	Non dimensional
		Flue gas	Non dimensional	Non dimensional	Non dimensional
			Kecepatan aliran	0,9727	m/s
			Laju aliran masa	0,046	Kg/s
			Temperatur	497	°C
			Tekanan	150	bar
		Inlet Flue gas	Kecepatan aliran	9,5515	m/s
			Laju aliran masa	0,130	Kg/s
			Temperatur	900	°C
			Tekanan	1	bar
		Outlet Steam	Kecepatan aliran	0,9727	m/s
			Laju aliran masa	0,046	Kg/s
			Temperatur	545	°C
			Tekanan	150	bar
		Outlet Flue gas	Kecepatan aliran	9,5515	m/s
			Laju aliran masa	0,130	Kg/s
Temperatur	900		°C		
Tekanan	1		bar		
Turbulence	Intensity	5	%		
	Viscosity ratio	10	-		
7	Solution	Run calculation	Number of Iteration	1000	-

2.3. Post-Processing

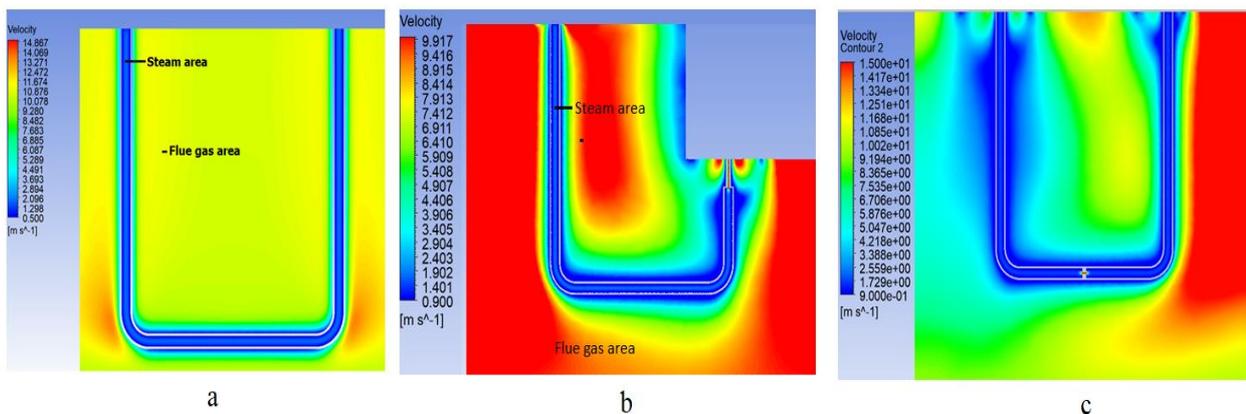
Post-processing merupakan tahap akhir dari simulasi yaitu merupakan tahap penampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang diperoleh berupa visualisasi aliran dengan menampilkan informasi yang diperlukan. Nilai yang dapat dikeluarkan adalah temperatur, tekanan dan kecepatan yang ditampilkan di dalam pipa SSH maupun di luar area pipa SSH.

Hasil simulasi berupa profil warna yang ditampilkan untuk ke tiga model pipa yaitu; model pipa SSH normal (tanpa hambatan), model pipa dengan hambatan di bagian ujung, model pipa dengan hambatan di bagian tengah.

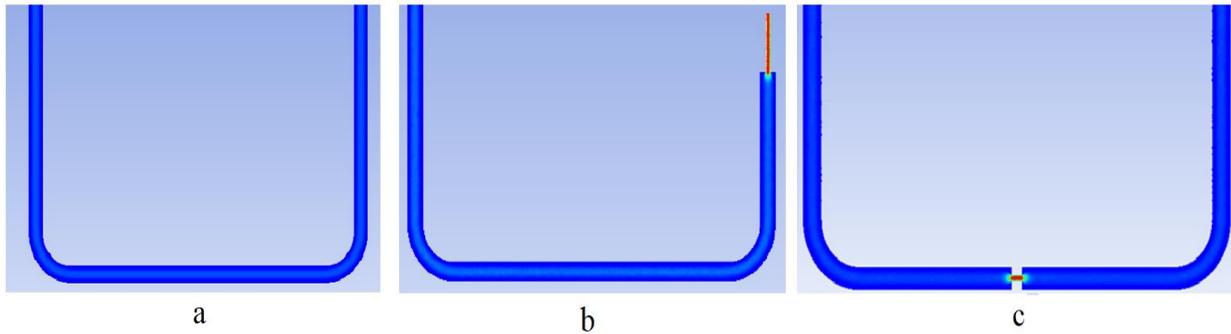
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kecepatan aliran

Hasil simulasi menunjukkan profil kecepatan fluida pada masing-masing model pipa ditunjukkan pada gambar 7 dan gambar 8 berikut:



Gambar 7. Profil Warna Kecepatan Aliran Flue Gas di Luar Area Pipa SSH.



Gambar 8. Detail Profil Warna Kecepatan Aliran Uap Panas di Dalam Pipa.

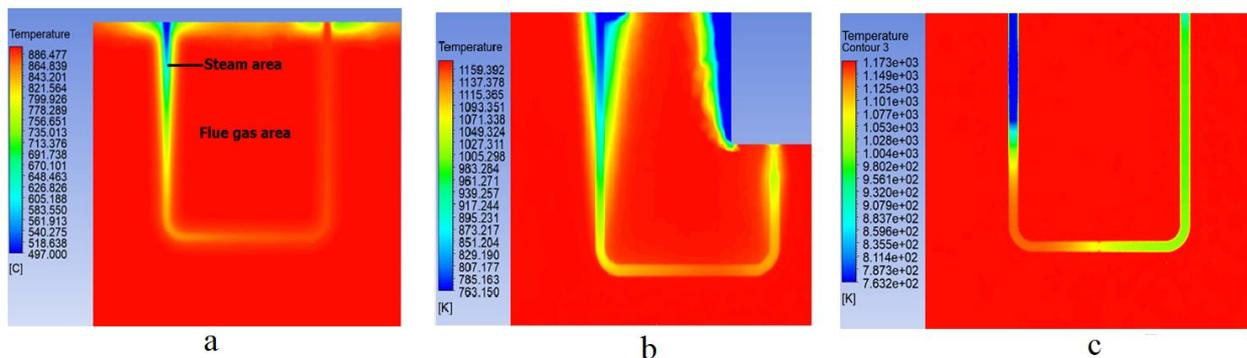
Gambar 7 (a) menunjukkan bahwa jika dilihat dari profil warna kecepatan aliran *flue gas* mengalami perubahan pada area dinding luar pipa baik di sisi vertikal maupun horizontal. Hal ini dikarenakan pipa dianggap sebagai hambatan bagi aliran *flue gas*, sehingga kecepatan aliran *flue gas* akan berkurang pada saat mendekati area pipa dengan kecepatan aliran *flue gas* 7 m/s, tetapi jauh dari area pipa kecepatan aliran *flue gas* cenderung stabil di 10 m/s. Pada sisi *elbow in* dan *sisi elbow out* terjadi perubahan kecepatan aliran *flue gas*. Hal ini dikarenakan setelah melewati pipa yang dianggap sebagai hambatan, maka kecepatan aliran akan meningkat signifikan sekitar 12 m/s. Gambar 7 (b) menunjukkan bahwa pada model pipa dengan sumbatan di bagian *outlet* menunjukkan kecepatan aliran *flue gas* mendekati area pipa terjadi penurunan berkisar 5 m/s. sedangkan di dinding pipa kecepatan aliran *flue gas* menurun drastis hingga 1 m/s. jauh dari area pipa kecepatan aliran *flue gas* cenderung stabil sekitar 9 m/s, hal yang sama terjadi juga pada model pipa dengan sumbatan di bagian tengah seperti yang ditampilkan pada gambar 7 (c).

Gambar 8 (a) menunjukkan bahwa jika dilihat dari profil warna kecepatan aliran uap di dalam pipa tidak mengalami perubahan yang signifikan baik di sisi *inlet* maupun di sisi *outlet*, kecepatan aliran uap berkisar di 1 m/s. Hal ini dikarenakan di dalam pipa tidak terdapat hambatan sehingga uap mengalir dalam keadaan normal. Pada model pipa dengan sumbatan di ujung pada gambar 8 (b) menunjukkan bahwa kecepatan aliran uap di dalam pipa mengalami perubahan yang signifikan pada saat aliran uap melewati sumbatan, karena terjadi pengecilan penampang aliran maka kecepatan aliran uap di dalam pipa menjadi lebih cepat sekitar 8 m/s. Model pipa dengan sumbatan di tengah pada gambar 8 (c) menunjukkan bahwa kecepatan aliran uap di dalam pipa mengalami hal yang sama dengan model pipa yang ditunjukkan pada gambar 8 (b) tetapi setelah melewati area sumbatan, kecepatan aliran kembali normal.

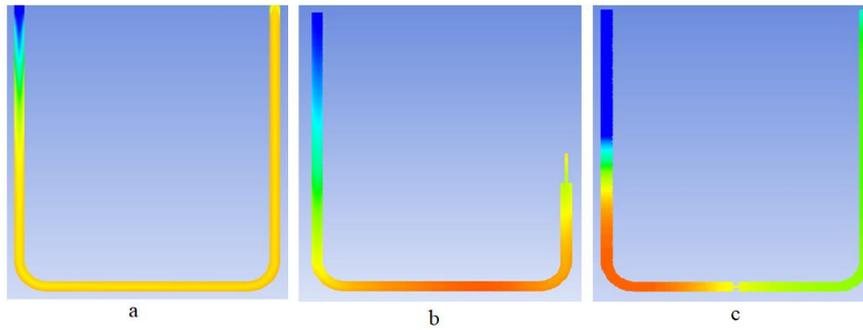
Simulasi ini menunjukkan model hambatan aliran uap panas di beberapa area dalam pipa. Area kritis di dalam pipa adalah pada bagian *elbow in* dan *elbow out* juga area di mana terdapat hambatan di mana aliran uap akan mengalami turbulensi di area tersebut. Dari tampilan profil kecepatan yang jelaskan di atas bisa diketahui bahwa jika suatu aliran fluida mengalami hambatan aliran, maka akan terjadi anomali aliran fluida pada area hambatan sehingga kecepatan aliran fluida akan meningkat signifikan tetapi volume aliran uap akan berkurang dan akan menyebabkan penyerapan panas dari *flue gas* jadi tidak optimal.

3.2. Temperatur

Profil/kontur temperatur uap panas di dalam pipa dan temperatur *flue gas* diluar area pipa ditampilkan pada gambar 9 dan gambar 10 berikut:



Gambar 9. Profil Temperatur Uap di Dalam Pipa dan *Flue Gas* di Luar Area Pipa SSH.

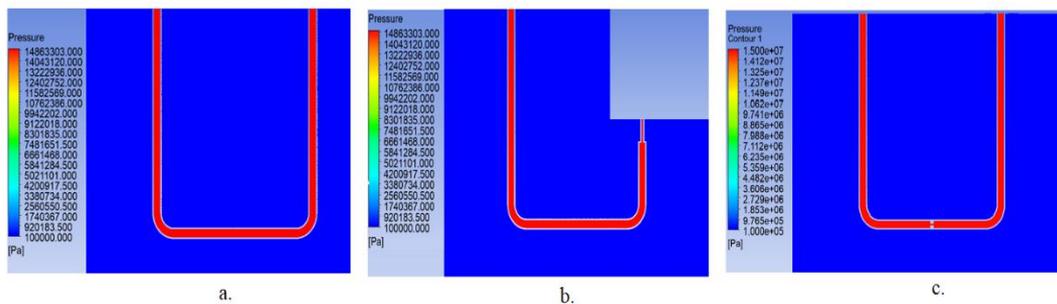


Gambar 10. Detail Profil Temperatur Uap di Dalam Pipa SSH.

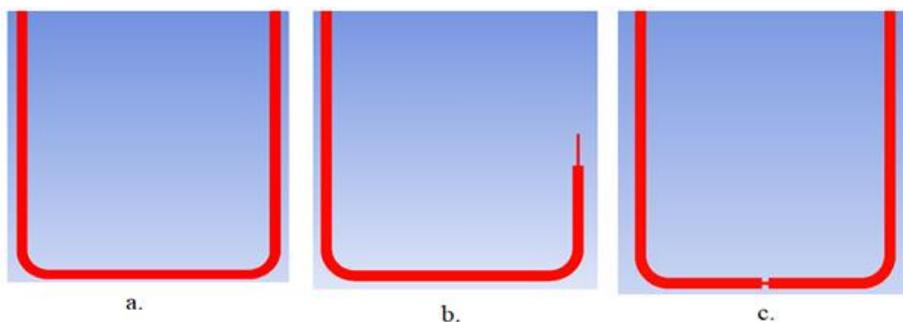
Gambar 9 menunjukkan bahwa temperatur *flue gas* di luar pipa SSH cenderung tetap berada pada nilai temperatur sebesar 900°C hanya terdapat sedikit anomali pada model pipa tanpa sumbatan pada seperti yang ditunjukkan pada gambar 9 (a) dan model pipa dengan sumbatan di ujung *outlet* pada gambar 9 (b) mendekati *bounding box* dan dinding pipa ke arah vertikal temperatur *flue gas* terjadi penurunan, hal ini terjadi karena dinding pipa dan uap di dalam pipa menyerap sebagian panas dari *flue gas* tersebut. Sedangkan pada model pipa dengan sumbatan di tengah seperti yang ditampilkan pada gambar 9 (c) menunjukkan bahwa temperatur lebih stabil tidak mengalami perubahan. Profil temperatur uap di dalam pipa SSH seperti pada gambar 10 menunjukkan pada sisi *inlet* (sisi kiri pipa) temperatur uap berkisar di 490°C dan mulai bergerak naik sebelum melewati sisi *elbow-in*, temperatur uap setelah melewati *elbow in* cenderung stabil hingga menuju *steam outlet* di kisaran 700°C seperti pada gambar 10 (a). Untuk model pipa pada gambar 10 (b) menunjukkan bahwa terjadi peningkatan temperatur dengan kisaran 800°C pada area horizontal pipa karena aliran uap panas tersumbat di sisi *steam outlet*, tetapi menuju area hambatan temperatur menurun di kisaran 700°C karena uap panas tetap mengalir meskipun melewati diameter yang kecil. Demikian juga fenomena pada pipa model yang ditunjukkan oleh gambar 10 (c) temperatur meningkat jadi 800°C hingga sebelum melewati area *elbow-in* hingga area hambatan di tengah pipa, dan temperatur menurun setelah melewati area hambatan tersebut dengan kisaran 700°C . Kondisi bagian pipa yang tersumbat alirannya secara umum jika melihat profil warna akan menyebabkan perubahan baik dari segi kecepatan aliran maupun temperatur uap.

Dari profil temperatur bisa disimpulkan bahwa temperatur uap panas di dalam pipa meningkat signifikan jika mendekati area hambatan karena aliran uap tersebut terhambat maka penyerapan panas dari *flue gas* di luar area pipa oleh uap di dalam pipa jadi tidak optimal. Jika kondisi ini berkelanjutan material pipa mengalami panas berlebih dan menyebabkan penurunan kekuatan material yang akhirnya terjadi kerusakan pada pipa SSH tersebut.

3.3. Tekanan



Gambar 11. Profil Tekanan Uap di Dalam Pipa dan *Flue Gas* di Luar Area Pipa SSH.



Gambar 12. Detail Profil Warna Tekanan Uap di Dalam Pipa SSH.

Gambar 11 menunjukkan bahwa profil tekanan di area *flue gas* yaitu di luar area pipa SSH untuk ketiga model pipa; tanpa hambatan pada gambar 11 (a), pipa dengan hambatan di ujung area *steam outlet* seperti pada gambar 11 (b) dan pipa dengan hambatan di tengah yang ditampilkan pada gambar 11 (c) tidak ada perubahan yang signifikan, tekanan di area *flue gas* ini berkisar di 100.000 Pa atau 1 bar, karena area *flue gas* ini berhubungan langsung dengan udara luar. Gambar 12 menampilkan profil tekanan uap di dalam pipa, untuk model pipa tanpa sumbatan seperti yang ditunjukkan pada gambar 12 (a), model pipa dengan hambatan di ujung area *steam outlet* ditunjukkan pada gambar 12 (b) dan model pipa dengan hambatan di tengah yang ditunjukkan pada gambar 12 (c) menunjukkan bahwa tekanan uap di dalam pipa stabil di 150 bar karena di sisi *steam inlet* terdapat SSH *inlet header* dan sisi *steam outlet* juga terdapat SSH *outlet header* untuk menjaga tekanan agar stabil sehingga tekanan uap menuju *turbin blade* tetap sama.

Profil tekanan menunjukkan tekanan uap panas di dalam pipa sebesar 150 bar akan berdampak pada pipa yang terdapat hambatan di dalamnya. Volume uap panas di dalam pipa berkurang dan selanjutnya temperatur material pipa semakin tinggi, dan mengakibatkan kekuatan material pipa menurun sehingga pipa memuai lalu menggelembung, menipis dan akhirnya pecah karena tidak mampu menahan tekanan uap panas yang cukup besar di dalam pipa.

3.4. Flux Report

Menampilkan hasil kalkulasi melalui proses iterasi dengan jumlah yang sudah ditentukan pada tahap set up, hasil kalkulasi berupa angka-angka yang tampilkan seperti *total heat transfer rate*, dan *mass flow rate* pada domain *inlet-outlet steam*, *inlet-outlet flue gas*. Selain itu juga menampilkan *surface integral* untuk nilai rata-rata pada parameter kecepatan aliran, temperatur dan tekanan di daerah pipa maupun di luar pipa SSH. Data *flux report* ditampilkan pada tabel 3.

Tabel 3. Data *flux report* model pipa tanpa sumbatan

No.	Flux report name	Model pipa		
		Tanpa hambatan	Hambatan di ujung	Hambatan di tengah
1.	<i>Total heat transfer rate:</i>			
	a. di dalam pipa	84.755,17 W	80.993,36 W	63.537,22 W
	b. di luar pipa	886.366.912,00 W	885.326.608,80 W	883.214.395,86 W
2.	<i>Mass flow rate:</i>			
	di dalam pipa	0,04 kg/s	0,04 kg/s	0,04 kg/s
	b. di luar pipa	0,130 kg/s	0,13 kg/s	0,13 kg/s
3	<i>Facet average uap:</i>			
	a. Kecepatan aliran			
	Rata-rata	1,06 m/s	1,38 m/s	1,56 m/s
	Maksimum	1,87 m/s	11,79 m/s	12,14 m/s
	b. Temperatur			
	Rata-rata	681,33 °C	648,87 °C	517,77 °C
	Maksimum	874,93 °C	800,74 °C	545,55 °C
	c. Tekanan			
	Rata-rata	15.994.537 Pa	15.624.395,25 Pa	17.445.043 Pa
	Maksimum	16.993.646 Pa	16.248.672 Pa	19.890.086 Pa
	<i>Facet average flue gas:</i>			
	Kecepatan aliran			
	Rata-rata	8,06 m/s	10,17 m/s	10,34 m/s
	Maksimum	13,64 m/s	10,79 m/s	11,13 m/s
	b. Temperatur			
Rata-rata	818,20 °C	807,66 °C	900 °C	
Maksimum	902,84 °C	900 °C	900 °C	
c. Tekanan				
Rata-rata	102183,23 Pa	101325,00 Pa	101325,00 Pa	
Maksimum	106490,55 Pa	101325,00 Pa	101325,00 Pa	

Berdasarkan nilai data *flux report* simulasi terlihat bahwa nilai untuk *heat transfer rate* untuk di luar pipa lebih besar dibandingkan dengan di dalam pipa. Di luar pipa merupakan area *flue gas* yang cukup luas dan memiliki temperatur tinggi sekitar 900°C sedangkan di dalam pipa temperatur uap lebih rendah yaitu sekitar 500°C dibanding di luar pipa. Nilai untuk model pipa tanpa sumbatan lebih besar dibanding model pipa dengan sumbatan. *Mass flow rate* di dalam pipa untuk model pipa tanpa sumbatan maupun model pipa dengan sumbatan tidak terdapat perbedaan nilai yang signifikan dengan melihat hasil dari simulasi di atas, begitu pula pada area luar pipa menunjukkan nilai yang konstan.

Parameter nilai kecepatan aliran, temperatur dan tekanan uap di dalam pipa dan *flue gas* di luar area pipa ditampilkan dari hasil *flux report* dengan menampilkan nilai rata-rata dan nilai maksimum seperti pada tabel 3 di atas. Kecepatan aliran uap di dalam pipa untuk model pipa tanpa sumbatan dan model pipa dengan sumbatan relatif sama

tidak terdapat perbedaan yang signifikan yaitu sekitar 1 m/s, kecepatan aliran uap maksimum ditunjukkan pada model pipa dengan sumbatan sebesar 12 m/s karena uap panas melewati area pipa yang sempit/area sumbatan. Temperatur uap pada model pipa tanpa sumbatan memiliki nilai rata-rata dan nilai maksimum yang tinggi dibanding nilai temperatur uap pada model pipa tanpa sumbatan. Sedangkan tekanan uap rata-rata untuk ke tiga model pipa tidak terlalu jauh perbedaannya, pada model pipa dengan sumbatan di ujung menunjukkan nilai tekanan maksimum yang paling tinggi di angka 19.000.000 Pa.

Parameter untuk *flue gas* menunjukkan bahwa kecepatan aliran *flue gas* rata-rata untuk model pipa tanpa sumbatan berkisar di angka 8 m/s, pada model pipa dengan sumbatan nilainya tidak mengalami perbedaan yang besar dengan angka paling tinggi 10 m/s. Sedangkan nilai kecepatan aliran *flue gas* maksimum di angka 13 m/s pada model pipa tanpa sumbatan, dan pada model pipa dengan sumbatan nilainya tidak jauh rentangnya. Temperatur *flue gas* rata-rata berkisar di angka 800°C sedangkan temperatur maksimum untuk semua model pipa berkisar di angka 900°C. Tekanan *flue gas* rata-rata dan maksimum pada semua model pipa tidak menunjukkan perubahan yaitu sebesar 100.000 Pa, *flue gas* yang berada di area yang luas tekanannya tetap konstan karena berhubungan langsung dengan udara luar.

Kesimpulan

Hasil simulasi pada model pipa SSH dengan menggunakan CFD Ansys menunjukkan bahwa terdapat perbedaan nilai total *heat transfer rate*, *mass flow rate*, dan nilai parameter untuk kecepatan aliran, temperatur serta tekanan tetapi perbedaan nilai tersebut adalah kecil dan tidak signifikan. Hasil simulasi menampilkan profil/kontur warna yang berbeda-beda untuk temperatur, kecepatan aliran dan tekanan untuk uap di dalam pipa dan untuk *flue gas* di luar area pipa, baik pipa tanpa sumbatan maupun pipa dengan sumbatan. *Flux report* menunjukkan nilai *heat transfer rate* area *flue gas* lebih tinggi sekitar 800.000 kW dibanding area uap di dalam pipa sekitar 80 kW, dan nilai *mass flow rate* uap di dalam pipa sebesar 0,046 kg/s sedangkan di area *flue gas* di luar pipa sebesar 0,130 kg/s. Kecepatan aliran uap rata-rata berkisar 1 m/s dan maksimum 12 m/s pada pipa dengan sumbatan, Kecepatan aliran *flue gas* di luar pipa rata-rata berkisar 9 sampai 10 m/s. Temperatur uap rata-rata berkisar 600°C, dan 800°C hingga maksimum 900°C. Tekanan untuk uap tidak mengalami perubahan signifikan yaitu sebesar 16.000.000 Pa dan di area *flue gas* tekanan berkisar di 100.000 Pa.

Daftar Notasi

P_a = tekanan [Pascal]
 T = suhu [°C]
 W = daya [Watt]
 kg = berat [kilogram]
 m = jarak [meter]
 s = waktu [second]

Daftar Pustaka

- Alireza Rezvanpour, Ronald E. Miller. (2022). *Scaling analysis as a tool to validate CFD simulation of a lubricant flow in the bearing housing of a gas turbine*, *Thermal Science and Engineering Progress*, Volume 36 Desember 2022, 101513.
- Constantine Samaras, Jeffrey A. Drezner, Henry H. Willis and Evan Bloom. (2011). *Characterizing the U.S. Industrial Base for Coal-Powered Electricity*. Chapter Title: *Coal-Fired Power Plant Designs, Systems, and Components* RAND Corporation. Stable URL: <https://www.jstor.org/stable/10.7249/mg1147netl.11>
- Dillon, J.J., Desch, P.B., Lai, T.S., Flynn, D.J. (2011). *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, The McGraw-Hill Companies, Inc. USA
- Lusiana, Fatayalkadri Citrawati, Erie Martides, Gugum Gumilar. (2019). *Analisis Kegagalan Pipa Boiler Superheater Pada Pabrik Kelapa Sawit*. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. doi:10.3372/DJITM.V11I1.9357
- M.J. Djokosetyardjo, (2003) *Ketel uap*, Pradnya Paramita, ISBN 9794081213, 2003
- Malfin, (2018). *Investigasi Performa Perpindahan Panas Winglet Vortex Generator Menggunakan CFD Pada Aliran Internal Pipa Silinder Heat Exchanger*. Skripsi. Universitas Sanata Dharma Yogyakarta.
- Mariusz Granda, Marcin Trojan, Dawid Taler. (2020). *CFD analysis of steam superheater operation in steady and transient State*, *Energy* 199-117423.
- M. Ghosh, (2023). *Effect of flue gas constituents on boiler tube failure of a captive power plant* *Engineering Failure Analysis* 151 (2023) 107416
- Rossi Cahyaningdias dan Ary Bachtiar Krishna Putra. (2019). *Studi Numerik Perpindahan Panas Konveksi Paksa pada Pin Fin Berpenampang Circular dengan Susunan Aligned*. *Jurnal Teknik ITS* Vol. 8, No. 2, ISSN: 2337-3539 (2301-9271 Print)
- Ryno Laubscher, Pieter Rousseau. (2019). *CFD study of pulverized coal-fired boiler evaporator and radiant superheaters at varying loads*, *Applied Thermal Engineering* 160-114057.

- Ruben Cabello, et all. (2022). *Heat transfer in pipes with twisted tapes: CFD simulations and validation*, Computers and Chemical Engineering 166 (2022) 107971
- Viki Wahyu Endriyana dkk, (2013). *Analisa Unjuk Kerja Secondary Superheater PLTGU Dan Evaluasi Peluang Peningkatan Effectiveness Dengan Cara Variasi Jarak, Jumlah dan Diameter Tube*. Jurnal Teknik POMITS Vol. 2, No. 3, ISSN: 2337-3539 (2301-9271 Print)