

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri kelapa sawit memainkan peran penting dalam sektor pertanian global, berkontribusi terhadap pertumbuhan ekonomi dan produksi energi. Pabrik kelapa sawit merupakan komponen integral dari industri ini, bertanggung jawab untuk memproses tandan buah segar (TBS) menjadi produk berharga, termasuk minyak sawit dan minyak inti sawit. Untuk memenuhi kebutuhan energi yang substansial dari pabrik kelapa sawit, boiler tabung air biasanya digunakan untuk menghasilkan uap untuk berbagai proses, seperti sterilisasi, pencernaan, dan pembangkit listrik.

Pemanfaatan sumber daya energi yang efisien merupakan perhatian utama dalam industri kelapa sawit. Sistem boiler dikenal intensif energi, dan setiap peningkatan kinerjanya dapat menghasilkan penghematan biaya yang substansial dan manfaat lingkungan. Di antara komponen kunci dari sistem boiler, preheater udara memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi energi.

Air Preheater dirancang untuk memulihkan limbah panas dari gas buang yang keluar dari boiler. Dengan memanaskan udara pembakaran dengan panas yang dipulihkan ini, sistem boiler menjadi lebih efisien, yang mengarah pada pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi gas rumah kaca yang lebih rendah. Namun, merancang *Air Preheater* yang efektif dalam mengoptimalkan pemulihan panas sambil meminimalkan penurunan tekanan adalah tantangan teknik yang kompleks.

Pemodelan komputasi dan simulasi telah muncul sebagai alat yang sangat diperlukan di bidang teknik mesin, menawarkan kemampuan untuk menganalisis, memvisualisasikan, dan mengoptimalkan kinerja sistem yang kompleks. SOLIDWORKS Flow Simulation, perangkat lunak *computational fluid dynamic* (CFD), menyediakan platform yang kuat untuk mensimulasikan aliran fluida, perpindahan panas, dan kinerja termal dalam sistem teknik.

Skripsi ini berusaha untuk mengatasi kebutuhan kritis untuk meningkatkan efisiensi energi dan kinerja dalam boiler tabung air dalam industri kelapa sawit melalui desain dan simulasi *Air Preheater* menggunakan SOLIDWORKS Flow Simulation. Tujuannya adalah untuk mengembangkan desain *Air Preheater* yang inovatif dan efisien yang memaksimalkan pemulihan panas sambil mengikuti pertimbangan praktis seperti kendala ruang, bahan, dan manufakturabilitas.

Sejumlah studi menunjukkan efisiensi termal boiler di pabrik kelapa sawit umumnya berada di kisaran 65–74 %, masih jauh dari batas ideal (≥ 80 %). Misalnya, di PKS Nagasaki, nilai efisiensi hanya mencapai 65,83 %; setiap penurunan 1 % efisiensi sama dengan kerugian sekitar Rp 670.800 per bulan akibat bahan bakar yang tidak termanfaatkan. Audit boiler berkapasitas 60 ton/jam lainnya mencatat efisiensi rata-rata hanya 66 %—di bawah standar pabrik baru (70 %)—dengan dry flue gas menyumbang kerugian energi antara 16–20 %.

Selain faktor usia peralatan, salah satu penyebab utama rendahnya efisiensi boiler pada pabrik kelapa sawit adalah banyaknya energi panas yang terbuang melalui gas buang. Pada umumnya, temperatur gas buang yang keluar dari boiler sawit masih

berkisar antara 250°C hingga 350°C, sehingga membawa energi panas yang cukup besar namun tidak dimanfaatkan secara optimal.

Menurut penelitian Azman et al. (2019), pabrik kelapa sawit rata-rata mengalami kerugian energi hingga 26,6% hanya dari panas yang terbawa oleh gas buang (flue gas). Selain itu, Saidur et al. (2011) menyebutkan bahwa pada boiler dengan kapasitas 60 ton/jam, sekitar 16-20% energi panas hilang melalui gas buang. Panas ini seharusnya dapat dipulihkan untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dengan cara memanfaatkan alat pemulihan panas (heat recovery equipment) seperti air preheater. Dengan memanfaatkan udara panas hasil preheater, pembakaran menjadi lebih efisien, konsumsi bahan bakar biomassa seperti EFB dan cangkang sawit dapat dikurangi, serta emisi gas buang dapat ditekan.

Tabel berikut menyajikan data umum persentase kerugian energi pada sistem boiler di pabrik kelapa sawit:

Jenis Kerugian Energi Boiler	Persentase Kehilangan (%)	Keterangan
Panas gas buang (dry flue gas loss)	16 – 20%	Udara panas keluar tanpa dimanfaatkan
Uap air dalam gas buang (moisture)	5 – 8%	Terbawa keluar melalui cerobong
Panas hilang ke lingkungan	3 – 5%	Radiasi dinding boiler
Kerugian mechanical unburnt fuel	2 – 5%	Bahan bakar tidak terbakar sempurna
Total Kerugian Umum	26 – 35%	Berdampak pada efisiensi energi

Tabel 1. 1 Data Umum Persentase Kerugian Energi pada Sistem Boiler di Pabrik Kelapa Sawit

(Sumber: Saidur et al., 2011; Azman et al., 2019)

Dari data tersebut, dapat dilihat bahwa potensi kerugian energi pada sistem boiler pabrik kelapa sawit cukup signifikan. Oleh karena itu, perlu dilakukan inovasi dan optimasi melalui penerapan teknologi air preheater guna memanfaatkan kembali panas dari gas buang tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan simulasi desain Air Preheater tipe Shell and Tube menggunakan SolidWorks Flow Simulation sebagai upaya meningkatkan efisiensi perpindahan panas pada sistem boiler, sehingga dapat memberikan kontribusi positif bagi efisiensi energi dan penghematan bahan bakar biomassa di industri kelapa sawit

1.2 Rumusan Masalah

Desain *Air Preheater* yang ada dalam boiler tipe *Water Tube* yang digunakan dalam industri minyak sawit mungkin tidak secara efektif memaksimalkan pemulihan panas sambil meminimalkan penurunan tekanan dan mengikuti kendala praktis ataupun sama sekali tidak digunakan. Inefisiensi ini mengakibatkan kinerja boiler yang kurang optimal, peningkatan konsumsi bahan bakar, dan peningkatan biaya operasional. Maka daripada itu, berikut beberapa rumusan masalah yang sudah dikumpulkan, yaitu:

1. Industri kelapa sawit sangat bergantung pada sistem boiler untuk berbagai proses, membuat efisiensi energi menjadi perhatian kritis.
2. Meningkatkan desain atau menambahkan komponen *Air Preheater* dapat menghasilkan penghematan biaya yang substansial, mengurangi dampak lingkungan, dan meningkatkan keberlanjutan.

3. Alat pemodelan komputasi canggih seperti SOLIDWORKS Flow Simulation menawarkan potensi untuk mengatasi masalah ini secara efektif.

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini akan fokus pada mengatasi masalah pemanfaatan energi yang tidak efisien dalam *Water Tube Boiler* dalam industri kelapa sawit dengan menargetkan desain dan simulasi *Air Preheater* menggunakan SOLIDWORKS Flow Simulation. Ruang lingkupnya mencakup berbagai aspek, termasuk desain, simulasi, optimasi, dan evaluasi, yaitu:

1. Penelitian ini akan melibatkan pembuatan model 3D rinci desain *Air Preheater* yang dirancang khusus untuk boiler tabung air yang digunakan di pabrik kelapa sawit. Desain akan bertujuan untuk mengoptimalkan *heat recovery* sambil mempertimbangkan kendala praktis seperti keterbatasan ruang dan pemilihan material.
2. Alat simulasi utama untuk penelitian ini adalah SOLIDWORKS Flow Simulation. Perangkat lunak ini akan digunakan untuk mensimulasikan dan menganalisis pola aliran udara, distribusi suhu, dan karakteristik perpindahan panas dalam konfigurasi *Air Preheater* yang dirancang.
3. Penelitian ini akan mengevaluasi dampak ekonomi dan lingkungan dari penerapan desain *Air Preheater* yang diusulkan di pabrik kelapa sawit. Evaluasi ini akan melibatkan pengukuran pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi, berkontribusi pada penilaian kinerja yang komprehensif.

1.4 Tujuan Penelitian

Untuk mengatasi masalah tersebut di atas, penelitian ini bertujuan untuk mencapai tujuan spesifik sebagai berikut:

1. Mengembangkan model 3D terperinci dari desain *Air Preheater* yang disesuaikan untuk *Water Tube Boiler* yang biasa digunakan di pabrik kelapa sawit, dengan mempertimbangkan kendala praktis.
2. Memanfaatkan SOLIDWORKS Flow Simulation untuk mensimulasikan dan menganalisis pola aliran udara, distribusi suhu, dan karakteristik perpindahan panas dalam konfigurasi *Air Preheater* yang dirancang.
3. Mengevaluasi hasil dari rancangan yang disimulasikan untuk penggunaannya dan menerapkannya pada system

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian tentang "Simulasi Desain *Air Preheater* menggunakan SOLIDWORKS Flow Simulation System untuk Meningkatkan Kinerja *Water Tube Boiler* di Industri Kelapa Sawit" membawa beberapa manfaat signifikan yang berkontribusi pada pengetahuan akademis dan aplikasi praktis dalam industri, seperti:

1. Manfaat utama dari penelitian ini terletak pada potensi peningkatan efisiensi *Water Tube Boiler* dalam industri kelapa sawit. Dengan mengoptimalkan desain *Air Preheater*, penelitian ini bertujuan untuk memulihkan lebih banyak limbah panas dari gas buang, menghasilkan udara pembakaran yang dipanaskan sebelumnya. Hal ini, pada gilirannya, mengarah pada peningkatan efisiensi boiler, pengurangan konsumsi

bahan bakar, dan biaya operasi yang lebih rendah untuk pabrik kelapa sawit.

2. Penerapan desain *Air Preheater* yang dioptimalkan dapat menghasilkan penghematan secara ekonomi yang besar bagi pabrik kelapa sawit. Mengurangi konsumsi bahan bakar berarti penghematan biaya, membuat produksi minyak sawit lebih hemat biaya, pemanfaatan bahan yang bisa dijual kembali dan kompetitif di pasar global.
3. Peningkatan efisiensi boiler dan pengurangan konsumsi bahan bakar juga memiliki dampak lingkungan yang positif. Penelitian ini berkontribusi pada upaya keberlanjutan dengan membantu pabrik kelapa sawit mengurangi jejak karbon mereka, menurunkan emisi gas rumah kaca, dan meminimalkan dampak lingkungannya.
4. Penggunaan SOLIDWORKS Flow Simulation System untuk desain dan simulasi *Air Preheater* menampilkan penerapan alat pemodelan komputasi canggih dalam memecahkan tantangan teknik dunia nyata. Penelitian ini memajukan pemahaman tentang bagaimana teknologi mutakhir dapat dimanfaatkan untuk mengoptimalkan proses industri.
5. Penelitian ini berkontribusi pada tubuh pengetahuan dalam teknik mesin dan praktik energi berkelanjutan. Ini berfungsi sebagai referensi berharga bagi mahasiswa, peneliti, dan profesional industri yang tertarik pada desain dan simulasi *Air Preheater* dan dampaknya terhadap kinerja boiler.
6. Temuan dan rekomendasi yang dihasilkan dari penelitian ini secara langsung membahas masalah yang sangat relevan dengan industri kelapa

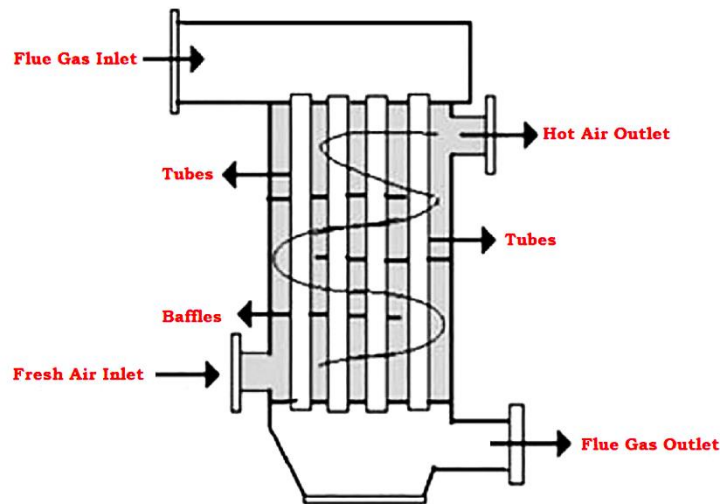
sawit. Karena pabrik kelapa sawit adalah pemain kunci di sektor pertanian global, peningkatan efisiensi energi mereka memiliki implikasi yang lebih luas bagi daya saing dan keberlanjutan industri.

7. Hasil penelitian memberikan wawasan praktis yang dapat diterapkan oleh pabrik kelapa sawit untuk meningkatkan operasi mereka. Ini menawarkan rekomendasi nyata untuk mengoptimalkan sistem boiler yang ada atau merancang yang lebih efisien ketika membangun fasilitas baru.
8. Penelitian ini dapat berfungsi sebagai dasar untuk penelitian lebih lanjut di bidang efisiensi energi dalam pengaturan industri. Ini dapat menginspirasi studi masa depan tentang sistem *heat recovery*, simulasi lanjutan, atau praktik berkelanjutan dalam industri minyak sawit.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Air Preheater

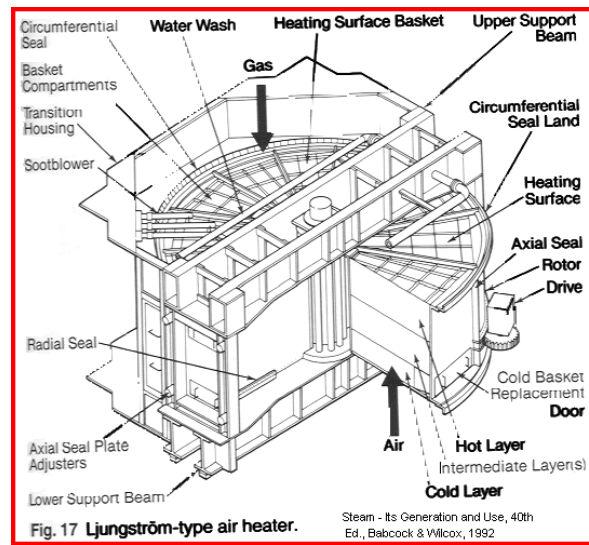
Air Preheater adalah komponen penting dalam banyak sistem mekanik dan industri, terutama dalam ketel uap dan *heat exchange*. Komponen ini memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi energi dengan memulihkan limbah panas dari gas buang dan menggunakannya untuk memanaskan udara pembakaran yang masuk. Tinjauan literatur ini memberikan gambaran umum tentang konsep-konsep kunci dan perkembangan yang terkait dengan *Air Preheater* dalam teknik mesin, dengan fokus pada desain, jenis, prinsip kerja, dan aplikasinya. *Air Preheater* hadir dalam berbagai desain, masing-masing disesuaikan dengan aplikasi tertentu. Salah satu klasifikasi utama didasarkan pada metode perpindahan panas, yaitu:



Gambar 2. 1 Air Pre-heater

1. Regenerative Air Preheater

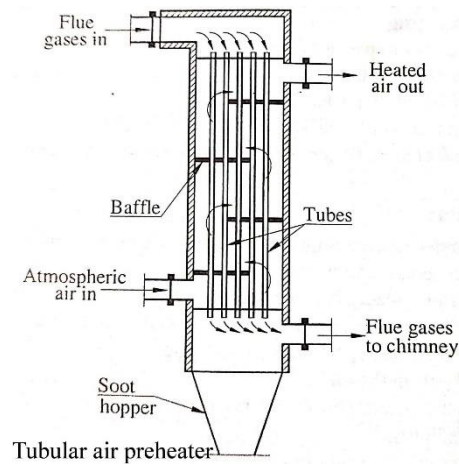
Air Preheater ini menggunakan media penyimpanan panas berputar (misalnya, matriks atau rotor) untuk mentransfer panas antara gas buang dan udara yang masuk. Desain dan kinerja *Air Preheater* regeneratif telah dipelajari secara ekstensif dalam konteks sistem pemulihan panas pada boiler (Li, 2018).



Gambar 2. 2 Regenerative Air Preheater

2. Tubular Air Preheater

Tubular Air Preheater terdiri dari jaringan tabung yang menghantarkan gas buang. Ketika udara yang masuk mengalir di atas permukaan luar tabung. Para peneliti telah meneliti faktor-faktor yang mempengaruhi perpindahan panas pada preheater udara tubular, seperti geometri tabung dan fouling (Rajaseenivasan, et al., 2021)



Gambar 2. 3 Tubular Air Preheater

Efektivitas *air preheaters* tergantung pada prinsip kerja dan efisiensi perpindahan panasnya. Mekanisme utama meliputi:

1. Counterflow and Parallel Flow

Counterflow air preheaters memiliki efisiensi perpindahan panas yang unggul dibandingkan dengan konfigurasi aliran paralel. Namun, desain dan aplikasinya tergantung pada persyaratan operasional tertentu (Arora, 2008).

2. Heat Exchange Media

Pilihan media pertukaran panas (misalnya, bahan rotor dalam *regenerative air preheater*) secara signifikan mempengaruhi efisiensi dan kinerja *air preheater* (Bergman, et al., 2020).

Air Preheater dapat ditemukan pada beberapa aplikasi dalam berbagai sistem teknik mesin. Seperti:

1. Boilers

Pada boiler industri, air preheater berperan dalam meningkatkan efisiensi termal dengan memanaskan udara pembakaran terlebih dahulu, sehingga mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi gas rumah kaca (Sarkar, 2016).

2. Power Generation

Di pembangkit listrik, air preheater berkontribusi pada pembangkitan listrik yang efisien dan pemulihan panas dari gas buang (Taler et al., 2019).

Air preheater memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi energi dan pemulihan panas dalam aplikasi teknik mesin, khususnya dalam boiler dan penukar panas. Desain dan prinsip kerja mereka sangat penting untuk mengoptimalkan kinerja dan mengurangi biaya operasional.

2.2 SOLIDWORKS 3D CAD Design Software & PDM Systems

SOLIDWORKS, perangkat lunak desain berbantuan komputer (CAD) yang banyak digunakan di bidang teknik mesin, telah merevolusi cara insinyur merancang dan mengembangkan produk. Rangkaian alat dan fiturnya yang kuat memungkinkan pemodelan, simulasi, dan dokumentasi 3D yang tepat. Tinjauan literatur ini memberikan gambaran umum tentang konsep-konsep kunci, aplikasi, dan kemajuan yang terkait dengan SOLIDWORKS CAD dalam domain teknik mesin.



Gambar 2. 4 Solidworks 2022 Logo

SOLIDWORKS CAD berperan penting dalam berbagai tahap proses pengembangan produk:

1. Conceptual Design

SOLIDWORKS memungkinkan para insinyur untuk dengan cepat membuat model konsep 3D, memberikan representasi visual dari ide-ide produk. Ini membantu dalam eksplorasi desain tahap awal dan pengambilan keputusan (Koren, 2019).

2. Detailed Design

Untuk desain mekanis terperinci, SOLIDWORKS menawarkan pemodelan parametrik, memungkinkan para insinyur untuk membuat bagian dan rakitan yang kompleks sambil mempertahankan maksud desain (Planchard & Planchard, 2021).

3. Simulation

Simulasi SOLIDWORKS memberikan kemampuan untuk menganalisis perilaku struktural, termal, dan aliran, membantu dalam optimalisasi desain produk untuk kinerja dan keandalan (Ku, 2015).

SOLIDWORKS CAD merupakan aplikasi yang sangat luas pengaplikasiannya di bidang teknik mesin, seperti:

1. Machine Design

Dalam desain permesinan, SOLIDWORKS digunakan untuk membuat model 3D terperinci dari komponen dan rakitan mesin, memfasilitasi analisis gerakan, gangguan, dan toleransi (Planchard & Planchard, 2021).

2. Product Development

Dalam pengembangan produk konsumen, SOLIDWORKS merampingkan proses desain dengan memungkinkan para insinyur untuk memvisualisasikan konsep, membuat prototipe, dan mengoptimalkan desain sebelum manufaktur (Koren, 2019).

2.3 Boiler

Boiler adalah perangkat mekanis penting yang digunakan di berbagai industri untuk menghasilkan uap atau air panas, dan mereka sangat penting untuk produksi energi, pemanasan, dan proses industri. Tinjauan literatur ini memberikan gambaran umum tentang konsep-konsep kunci, jenis, pertimbangan desain, dan kemajuan dalam boiler di bidang teknik mesin.

Desain boiler yang efisien sangat penting untuk mengoptimalkan produksi energi dan mengurangi dampak lingkungan:

1. Heat Exchangers

Desain penukar panas memainkan peran penting dalam efisiensi boiler. Penelitian telah difokuskan pada optimalisasi permukaan dan bahan perpindahan panas untuk memaksimalkan efisiensi termal (Basu, 2015).

2. Combustion Systems

Desain sistem pembakaran sangat penting untuk efisiensi bahan bakar dan pengendalian emisi. Kemajuan teknologi pembakaran telah menghasilkan proses pembakaran yang lebih bersih dan efisien (Baukal, 2013).

Boiler memiliki beragam aplikasi di seluruh lapangan teknik mesin, seperti:

1. Power Generation

Di pembangkit listrik, ketel uap adalah pusat pembangkit listrik. Kemajuan dalam desain dan teknologi boiler telah memungkinkan peningkatan efisiensi konversi energi (Pulkrabek, 2017).

2. Industrial Processes

Industri seperti kimia, makanan, dan kertas bergantung pada boiler untuk berbagai proses, seperti pemanasan, sterilisasi, dan produksi uap (Gupta, 2018).

2.4 Bahan Bakar Boiler pada Pabrik Kelapa Sawit

Industri kelapa sawit adalah sektor vital dalam lanskap pertanian global, yang dikenal karena kontribusinya yang signifikan terhadap produksi energi. Boiler

merupakan bagian integral dari industri ini, menyediakan uap yang diperlukan untuk berbagai proses, termasuk sterilisasi, pencernaan, dan pembangkit listrik. Pilihan bahan bakar untuk boiler ini merupakan faktor penting dalam kinerja, efisiensi, dan dampak lingkungannya.

Berikut beberapa tipe bahan bakar yang biasa digunakan untuk boiler pada pabrik industri kelapa sawit, yaitu:

1. Solid Fuels (Bahan Bakar Padat)

Industri kelapa sawit secara tradisional bergantung pada bahan bakar padat, seperti cangkang sawit dan serat mesocarp, yang tersedia sebagai produk sampingan dari pengolahan minyak sawit. Bahan bakar ini telah banyak digunakan karena kelimpahan dan efektivitas biaya (Sami et al., 2018).

2. Biomass Fuels (Bahan Bakar Biomassa)

Bahan bakar biomassa, termasuk tandan buah kosong (TBS), telah mendapat perhatian sebagai alternatif berkelanjutan untuk bahan bakar padat konvensional. EFB memiliki kadar abu yang lebih rendah dan dapat digunakan dalam sistem boiler biomassa modern, berkontribusi pada pengurangan emisi dan peningkatan efisiensi (Azman et al., 2019).

Dalam sisi ekonomi dan dampak lingkungan, ada beberapa hal yang menjadi pertimbangan, seperti:

1. Economic Impact

Pemilihan bahan bakar boiler memiliki implikasi ekonomi, terutama dalam hal pengadaan bahan bakar dan biaya operasional. Pabrik kelapa sawit bertujuan untuk memaksimalkan profitabilitas sambil mempertimbangkan ketersediaan dan biaya bahan bakar (Rushford, 2015).

2. Environmental Impact

Pilihan bahan bakar boiler di industri kelapa sawit memiliki dampak signifikan terhadap lingkungan. Penggunaan bahan bakar biomassa berkelanjutan sejalan dengan tujuan lingkungan dengan mengurangi emisi gas rumah kaca dan ketergantungan pada sumber daya tak terbarukan (Saidur et al., 2011).

Pada sektor teknologi untuk Boiler, juga ada beberapa kemajuan teknologi yang memberikan dampak yang baik terhadap performa dari boiler, yaitu:

1. Energy Efficiency

Kemajuan dalam teknologi pembakaran dan desain boiler telah meningkatkan efisiensi energi boiler industri kelapa sawit. Inovasi ini termasuk sistem pemulihan panas yang lebih efisien dan integrasi teknologi kogenerasi (Chin et al., 2015).

2. Biomass Gasification

Teknologi gasifikasi biomassa telah memungkinkan konversi biomassa minyak sawit menjadi bahan bakar gas yang lebih bersih, menawarkan peluang untuk pembangkit gabungan panas dan daya (CHP) (Dell et al., 2017).

2.5 CFD untuk Air Preheater pada Boiler Industri Kelapa Sawit

Perkembangan teknologi komputasi saat ini memberikan peluang besar dalam pengembangan sistem perpindahan panas, khususnya dalam desain dan optimasi Air Preheater (APH). Salah satu metode yang paling umum dan efektif digunakan adalah Computational Fluid Dynamics (CFD) karena mampu memodelkan fenomena perpindahan panas dan aliran fluida secara kompleks, baik secara kualitatif maupun kuantitatif.

CFD memungkinkan visualisasi distribusi aliran udara, suhu, kecepatan, dan tekanan dalam heat exchanger secara mendetail, sehingga memberikan gambaran yang lebih akurat terkait performa alat sebelum diproduksi. Beberapa penelitian sebelumnya telah memanfaatkan CFD untuk meningkatkan efisiensi air preheater dengan memvariasikan jumlah baffle, diameter pipa, dan konfigurasi aliran, guna memperoleh distribusi aliran udara yang lebih merata dan penyerapan panas yang lebih optimal (Taler et al., 2019).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Li (2018), penggunaan baffle sebagai pengarah aliran pada rotary regenerative air preheater terbukti dapat meningkatkan efektivitas perpindahan panas, sekaligus menurunkan pressure drop yang tidak diinginkan. Studi ini menekankan pentingnya pengaturan jalur aliran udara panas dan udara segar secara seimbang untuk meminimalisir kerugian energi pada sisi fluida.

Dalam konteks industri kelapa sawit, keberadaan air preheater pada sistem boiler memiliki peran signifikan dalam memanfaatkan panas sisa gas buang (flue gas)

yang masih memiliki temperatur tinggi. Pabrik kelapa sawit umumnya menggunakan boiler berbahan bakar limbah biomassa (EFB, cangkang sawit, serat) yang menghasilkan gas buang dengan temperatur 250–350°C. Tanpa sistem pemulihan panas yang baik, energi ini akan hilang ke atmosfer dan menurunkan efisiensi energi keseluruhan pabrik (Azman et al., 2019).

Penelitian lain juga menegaskan bahwa implementasi sistem heat recovery seperti economizer dan air preheater dapat menurunkan konsumsi bahan bakar biomassa hingga 5–10% dan meningkatkan efisiensi boiler lebih dari 5% secara keseluruhan (Chin et al., 2015). Oleh karena itu, studi simulasi CFD pada desain air preheater sangat relevan sebagai solusi peningkatan efisiensi energi di industri kelapa sawit, khususnya dalam rangka menekan biaya operasional dan mendukung keberlanjutan lingkungan (Saidur et al., 2011).

2.1 Computational Fluid Dynamics (CFD) dalam Analisis Heat Exchanger

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan salah satu metode berbasis numerik yang digunakan untuk menganalisis fenomena aliran fluida, perpindahan panas, dan interaksi antar fluida dengan struktur padat secara lebih akurat melalui simulasi komputer. Penerapan CFD saat ini sangat luas, salah satunya dalam bidang desain dan optimasi alat penukar panas (heat exchanger), termasuk air preheater (APH) yang digunakan pada sistem boiler industri. Dengan metode CFD, visualisasi aliran fluida, distribusi temperatur, dan profil tekanan dapat dianalisis tanpa perlu melakukan

uji coba fisik secara langsung, sehingga lebih hemat biaya dan waktu (Taler et al., 2019).

Dalam penerapannya, CFD mampu memberikan gambaran detail mengenai fenomena turbulensi, distribusi suhu, pressure drop, dan efektivitas perpindahan panas pada berbagai variasi desain heat exchanger, seperti variasi jumlah baffle, diameter pipa, atau kecepatan fluida. Salah satu penelitian oleh Li (2018) membuktikan bahwa penambahan baffle pada air preheater tipe rotary regenerative secara signifikan dapat meningkatkan efektivitas perpindahan panas, dengan distribusi suhu dan tekanan yang lebih stabil.

Dalam konteks pabrik kelapa sawit, pemanfaatan CFD untuk menganalisis desain air preheater sangat relevan mengingat sistem boiler yang digunakan umumnya berbahan bakar limbah biomassa seperti serat dan cangkang sawit, menghasilkan gas buang bersuhu tinggi yang belum dimanfaatkan secara maksimal. Dengan memanfaatkan CFD, potensi pemanfaatan kembali panas dari gas buang tersebut dapat dioptimalkan untuk memanaskan udara masuk pembakaran, sehingga meningkatkan efisiensi energi boiler secara keseluruhan (Azman et al., 2019).

2.2 Air Preheater (APH) Sebagai Alat Pemulihan Panas di Pabrik Kelapa Sawit

Air Preheater (APH) merupakan salah satu komponen penting dalam sistem pemulihan panas (heat recovery) yang berfungsi untuk memanfaatkan panas sisa dari gas buang boiler guna memanaskan udara masuk proses pembakaran. Dengan adanya

preheater, efisiensi termal boiler dapat meningkat karena udara masuk yang lebih panas akan mempercepat proses pembakaran dan mengurangi kebutuhan bahan bakar. Sistem APH banyak digunakan pada industri berbahan bakar biomassa, termasuk pabrik kelapa sawit, karena karakteristik gas buang dari pembakaran EFB dan cangkang sawit masih memiliki temperatur yang cukup tinggi.

Menurut Chin et al. (2015), penggunaan air preheater pada pabrik kelapa sawit dapat meningkatkan efisiensi boiler hingga 5%, serta menekan konsumsi bahan bakar biomassa hingga 10%. Hal ini tentunya memberikan dampak positif dalam efisiensi energi, pengurangan biaya bahan bakar, serta mendukung praktik industri yang lebih ramah lingkungan. Saidur et al. (2011) juga menambahkan bahwa pemanfaatan alat pemulihan panas seperti economizer dan air preheater sangat penting untuk memaksimalkan potensi energi sisa dari gas buang yang selama ini masih banyak terbuang ke lingkungan.