

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Isu ketahanan energi dan tuntutan terhadap sumber energi terbarukan (EBT) telah mendorong eksplorasi teknologi konversi biomassa sebagai solusi energi domestik di Indonesia. Gasifikasi biomassa merupakan sebuah proses termokimia yang terbukti efektif mengonversi material padat organik menjadi *syngas* (gas sintesis) bernilai kalor tinggi, yang menjadi solusi penting untuk memenuhi kebutuhan energi. Secara spesifik, reaktor tipe *downdraft* dipilih karena keunggulannya dalam menghasilkan *syngas* dengan kadar tar yang relatif rendah, menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi mesin penggerak. Berbagai studi lokal telah mengkonfirmasi kinerja jenis reaktor ini menggunakan aneka bahan bakar biomassa. Penelitian ini secara khusus fokus pada pemanfaatan biopellet kaliandra yang memiliki nilai kalor tinggi dan ketersediaan yang terbarukan, menjadikannya prospek yang kuat dalam mendukung diversifikasi energi nasional (Yulistiani, 2015).

Kinerja reaktor sangat bergantung pada pengelolaan panas yang optimal, terutama di zona oksidasi yang merupakan inti termal dari proses tersebut. Studi eksperimental menunjukkan bahwa suhu di zona oksidasi memiliki korelasi langsung dengan karakteristik *syngas* yang dihasilkan (Suparmin et al., 2023). Di zona krusial ini, pembakaran parsial biomassa terjadi, dan suhu harus dijaga dalam rentang kritis antara 850°C – 950°C untuk memastikan konversi karbon sempurna dan efisiensi gas dingin yang maksimal (Hasan Harun et al., 2024; Subroto, 2017). Penyimpangan suhu, yang utamanya disebabkan oleh kehilangan panas (*heat loss*) ke lingkungan melalui dinding reaktor, akan secara signifikan menurunkan kualitas *syngas* dan meningkatkan produksi tar (Wijianto & Alfitriah, 2024). Fenomena kehilangan panas ini melibatkan transfer panas Konduksi melalui lapisan insulasi padat reaktor, dan transfer panas Konveksi-Radiasi dari permukaan luar dinding reaktor ke udara sekitar. Oleh karena itu, analisis mendalam terhadap distribusi panas pada reaktor menjadi sangat penting untuk menjamin kinerja stabil (Gabul et al., 2024).

Guna menganalisis secara mendalam dan memprediksi perilaku termal yang rumit tersebut, Simulasi Komputasi Dinamika Fluida (CFD) dapat menggambarkan proses termokimia yang kompleks dan mensimulasikan dinamika fluida, perpindahan panas, dan reaksi kimia secara terperinci (Suparmin et al., 2024). Penelitian ini bertujuan memetakan secara detail distribusi suhu dan menganalisis profil *Conjugate Heat Transfer* (CHT) yang terjadi pada dinding reaktor, yang mencakup interaksi perpindahan panas antara fluida (gas panas) dan padatan (dinding reaktor). Untuk mereplikasi kondisi termal di zona oksidasi secara ideal. Proses termokimia disederhanakan melalui penerapan sumber panas volumetrik (*Volumetric Heat Source*). Pendekatan komputasi ini memungkinkan menggambarkan distribusi panas dalam reaktor.

Meskipun simulasi komputasi menawarkan efisiensi tinggi dalam analisis termal, akurasi model matematis yang digunakan wajib divalidasi dengan kondisi nyata. Model CFD harus teruji akurasinya agar dapat dijadikan fondasi yang kredibel untuk pengembangan dan modifikasi desain reaktor di masa depan (Wijianto & Alfitrah, 2024). Oleh karena itu, fokus utama dari penelitian ini adalah validasi melalui dua skema perbandingan, yaitu dengan membandingkan hasil prediksi suhu komputasi terhadap data sekunder dari literatur terverifikasi serta data suhu aktual yang diperoleh langsung dari pengukuran lapangan (Ridwan et al., 2018). Proses ini tidak hanya menguji kredibilitas model secara teoritis dan praktis, tetapi juga berfungsi untuk mengidentifikasi limitasi alat ukur fisik di lapangan seperti fenomena *screening feedstock* atau keterbatasan sensor tunggal, sehingga model komputasi dapat menjadi alat prediksi yang lebih andal untuk studi optimasi desain insulasi guna meminimalisasi kehilangan panas.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan dengan judul skripsi yang diangkat, agar pembahasan tidak menyimpang dari topik yang dibahas. Pemberian rumusan masalah meliputi:

1. Bagaimana distribusi suhu dan pola aliran *syngas* pada reaktor gasifikasi *downdraft* dapat dianalisis?
2. Berapa nilai *error* relatif yang dihasilkan dari perbandingan data suhu hasil simulasi CFD dengan data suhu aktual eksperimen, serta sejauh mana hasil tersebut selaras dengan validasi data sekunder dari jurnal referensi?

1.3 Tujuan

1. Menganalisis distribusi suhu dan pola aliran *syngas* pada reaktor gasifikasi *downdraft* menggunakan simulasi CFD.
2. Memvalidasi akurasi model simulasi CFD melalui perbandingan komprehensif terhadap data sekunder dari jurnal ilmiah serta data suhu aktual eksperimen guna memastikan keandalan profil distribusi suhu yang dihasilkan.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diambil dalam penelitian ini meliputi:

1. Manfaat praktis

Menghasilkan model komputasi termal yang dapat mengurangi biaya operasional penelitian lebih lanjut mengenai optimasi desain insulasi dan meningkatkan kualitas *syngas* di instalasi gasifikasi berbasis pelet kaliandra.

2. Manfaat Teoritis

Menambah ilmu pengetahuan di bidang Termodinamika dan Konversi Energi, serta implementasi CFD untuk analisis distribusi panas reaktor gasifikasi.

1.5 Ruang Lingkup Masalah

Proses memudahkan pemahaman penelitian pada pembahasan agar tidak melebar, penelitian membatasi berdasarkan beberapa poin sebagai berikut:

1. Pembahasan hanya tentang *gasifier* dengan tipe *downdraft*
2. Penelitian dilakukan secara komputasi melalui Simulasi CFD *Solidworks*.
3. Analisis simulasi difokuskan pada analisis distribusi termal dengan memodelkan konduksi, konveksi dan radiasi serta pola aliran *syngas* pada reaktor.
4. Validasi model CFD dilakukan secara dua tahap: menggunakan data sekunder dari jurnal ilmiah dan data primer (experimen) khusus untuk zona oksidasi reaktor.
5. Reaksi kimia yang terjadi di dalam reaktor (pirolisis, oksidasi, reduksi) disederhanakan dengan memodelkannya sebagai sumber panas volumetrik (*Volumetric Heat Source*) terdistribusi di zona oksidasi, tanpa mempertimbangkan kinetika reaksi kimia yang kompleks.

1.6 Kebaharuan

Kebaharuan dalam penelitian ini terletak pada integrasi analisis profil temperatur reaktor menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang dikombinasikan dengan evaluasi kritis terhadap kendala pengambilan data aktual di lapangan. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya berfokus pada validasi hasil, penelitian ini melakukan analisis mendalam terhadap penyebab diskrepansi data antara kondisi aktual dan komputasi, seperti identifikasi fenomena *screening feedstock* dan limitasi sensor tunggal yang menyebabkan munculnya suhu semu. Selain itu, penelitian ini menerapkan pendekatan *Volumetric Heat Source* yang dikalibrasi secara spesifik untuk mereplikasi profil termal zona oksidasi, sehingga mampu memvisualisasikan dinamika aliran gas panas konvektif yang sulit diamati secara langsung oleh instrumen fisik konvensional.

1.7 Hipotesa

Berdasarkan tinjauan pustaka dan latar belakang permasalahan, hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini adalah bahwa model simulasi CFD yang dikembangkan mampu merepresentasikan distribusi suhu pada zona oksidasi reaktor gasifikasi tipe *downdraft* secara akurat dengan *relative error* di bawah 25% terhadap data aktual lapangan, meskipun terdapat perbedaan profil suhu yang signifikan pada zona pengeringan akibat akumulasi panas gas konvektif serta ketiadaan model penguapan *moisture* secara dinamis. Selain itu, diduga pola distribusi panas yang dihasilkan oleh simulasi akan membentuk karakteristik kerucut terbalik (*inverted cone*), yang mengindikasikan bahwa mekanisme perpindahan panas dan momentum aliran gas telah dimodelkan secara tepat sesuai dengan prinsip termokimia reaktor.