

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Relevan

Penelitian ini mengacu pada sejumlah studi terdahulu yang relevan dalam bidang gasifikasi, simulasi komputasi, dan analisis termal. Analisis komprehensif dari penelitian-penelitian ini berfungsi untuk memvalidasi pendekatan metodologis CFD serta memperjelas kesenjangan penelitian (*research gap*) terkait upaya optimasi *heat loss* pada perancangan reaktor.

1. Desain dan Simulasi Mesin Gasifikasi Tipe *Downdraft* Menggunakan SolidWorks (Adli et al., 2021)

Tujuan fundamental penelitian ini adalah mengevaluasi kelayakan desain reaktor *downdraft* dari aspek termal dan hidrodinamika aliran menggunakan pendekatan komputasi. Studi ini mengatasi permasalahan kesulitan prediksi distribusi suhu aktual dan potensi titik kritis kegagalan termal pada tahap perancangan awal. Metode yang digunakan adalah pemodelan geometris 3D menggunakan *SolidWorks*, dilanjutkan dengan analisis CFD (Termal dan Fluida) menggunakan perangkat lunak ANSYS, mengimplementasikan model dan skema *Conjugate Heat Transfer* (CHT). Hasil utama dari penelitian ini sangat relevan karena secara tegas menunjukkan bahwa simulasi CFD adalah metode yang sangat efektif dalam memprediksi zona-zona dengan konsentrasi panas tinggi dan potensi *heat loss* maksimum pada dinding reaktor. Temuan ini memberikan validasi metodologis yang kuat, mendukung penggunaan simulasi CFD *SolidWorks* dalam tugas akhir ini sebagai alat utama untuk mengidentifikasi titik lemah desain termal yang akan dioptimasi.

2. Studi Karakteristik Reaktor Gasifikasi Tipe *Downdraft* Serbuk Kayu dengan Variasi Equivalence Ratio (Suliono et al., 2017)

Penelitian eksperimental ini bertujuan mengidentifikasi dan menentukan suhu zona reaksi optimal serta menganalisis pengaruh variasi ER terhadap komposisi *syngas* serbuk kayu. Isu inti yang diteliti adalah perlunya menjaga stabilitas suhu operasional ideal di zona oksidasi untuk memaksimalkan efisiensi konversi karbon. Fluktuasi suhu di luar rentang ini, yang sering disebabkan oleh *heat loss* ke lingkungan, akan menurunkan kualitas *syngas*. Hasil penelitian ini menyimpulkan secara eksplisit bahwa suhu optimal di zona oksidasi berada dalam rentang 850°C – 950°C . Di luar rentang ini, efisiensi konversi menurun drastis. Temuan ini menegaskan bahwa minimalisasi *heat loss* adalah kondisi prasyarat yang krusial bagi desain insulasi reaktor untuk menjaga suhu di dalam batas optimal tersebut dan mencapai efisiensi termal yang maksimal.

3. Simulasi Aliran Fluida pada Instalasi Gasifikasi Tipe *Downdraft* (Wijianto & Alfitrah, 2024)

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis secara detail profil aliran fluida dan menghitung penurunan tekanan (*pressure drop*) di dalam reaktor gasifikasi *downdraft*. Permasalahan utama yang diatasi adalah kurangnya pemahaman kuantitatif tentang bagaimana pola aliran gas memengaruhi proses termal internal. Pola aliran yang tidak seragam berpotensi menyebabkan *channeling* biomassa atau ketidakseragaman suhu. Metode yang digunakan adalah simulasi komputasi CFD, dengan penekanan pada dinamika aliran gas dari zona pembakaran menuju zona reduksi dan *throat*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain geometris *throat* dan lokasi *tuyere* sangat memengaruhi pola aliran fluida dan besar penurunan tekanan. Pola aliran yang tidak seragam dapat mengurangi efisiensi reduksi. Studi ini memberikan basis penting bagi pemodelan dinamika fluida yang terintegrasi dengan analisis CHT pada tugas akhir ini, karena aliran fluida menentukan transfer panas konveksi internal reaktor.

4. *Performance of a Gasifier Reactor Prototype without a Blower Using Palm Oil Waste* (Suardi Nur Chairat, Antono, Prayudi, Nurhasanah, et al., 2021)

Studi ini berfokus pada evaluasi kinerja operasional reaktor gasifikasi *downdraft* prototipe yang memiliki keunikan yaitu beroperasi tanpa menggunakan *blower* eksternal, melainkan memanfaatkan daya isap (*suction power*) dari mesin yang terhubung. Bahan bakar yang digunakan adalah limbah biomassa kelapa sawit (*palm oil waste*), yang merupakan sumber daya berlimpah di Indonesia. Metodologi penelitian melibatkan pengujian kinerja reaktor secara langsung, termasuk *monitoring* laju konsumsi bahan bakar, komposisi *syngas* yang dihasilkan, dan pengukuran profil suhu di berbagai titik reaktor. Temuan ini sangat relevan dan memberikan dua kontribusi penting. Pertama, studi ini memvalidasi limbah kelapa sawit sebagai bahan bakar efektif untuk gasifikasi, yang kemudian diadopsi sebagai bahan bakar dalam Tugas Akhir ini. Kedua, model operasional tanpa *blower* adalah asumsi yang harus direplikasi dalam simulasi CFD. Kondisi ini menuntut penentuan laju aliran massa udara dan nilai kalor limbah kelapa sawit yang akurat sebagai kondisi batas (*boundary conditions*) dan sumber energi panas di zona oksidasi. Data kinerja dari penelitian ini akan digunakan untuk menghitung parameter *input* termal yang realistis, memastikan bahwa simulasi perpindahan panas mencerminkan kondisi operasional prototipe reaktor yang sebenarnya.

5. *Design and development of biomass gasifier reactor to produce syngas* (Suardi Nur Chairat, Antono, Prayudi, & Nurhasanah, 2021)

Penelitian ini menitikberatkan pada proses perancangan dan pengembangan prototipe reaktor *gasifier* tipe *downdraft* skala kecil yang efisien. Tahapan perancangan melibatkan perhitungan teoritis ekstensif untuk menentukan dimensi kritis reaktor, yang harus disesuaikan dengan kapasitas *output* daya dan karakteristik bahan bakar biomassa yang digunakan. Perhitungan ini mencakup penentuan rasio ekuivalen (ER) yang ideal, laju konsumsi bahan bakar, dan penetapan dimensi geometris kunci seperti diameter reaktor, ketinggian zona reaksi (reduksi, oksidasi), dan dimensi *throat* (leher reaktor). Signifikansi studi ini terletak pada penyediaan set data geometris yang terperinci dan tervalidasi secara teoritis. Desain reaktor *downdraft* yang dihasilkan, termasuk spesifikasi material dan

struktur internalnya, menjadi referensi utama dan basis desain 3D yang akan dimodelkan dalam *Solidworks* untuk keperluan Tugas Akhir ini. Dengan mengambil dimensi reaktor dari studi ini, Tugas Akhir dapat memfokuskan analisisnya pada aspek termal (distribusi panas) dan optimasi struktural/termal, bukan lagi pada tahap desain awal. Hal ini memastikan bahwa model simulasi yang dibangun memiliki validitas desain yang kuat, karena didasarkan pada prototipe nyata yang telah melalui tahapan perancangan yang ketat.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Biomassa

Biomassa adalah material organik yang bersumber dari organisme hidup seperti tumbuhan dan hewan, yang secara alami menyimpan energi matahari melalui proses fotosintesis. Material ini berfungsi sebagai bahan bakar padat yang kaya akan senyawa karbon dan hidrogen. Contoh biomassa sangat beragam, meliputi limbah dari sektor pertanian (sekam padi, tongkol jagung), perkebunan (cangkang sawit, kayu kaliandra), limbah hutan, limbah industri (limbah biomasa kalapsawit) (Suardi Nur Chairat, Antono, Prayudi, Nurhasanah, et al., 2021) dan limbah padat perkotaan (MSW) (Buckley et al., 1998a; Suardi Nur Chairat et al., 2020; Suliono et al., 2017). Indonesia, sebagai negara dengan sektor pertanian dan kehutanan yang luas, memiliki potensi biomassa yang melimpah, di mana limbah seperti janggel jagung saja dapat mencapai 3.821.504 ton/tahun (Yulistiani, 2015). Potensi yang masif ini mendukung upaya diversifikasi energi nasional untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Pemanfaatan biomassa bertujuan untuk menghasilkan energi listrik, panas, atau bahan bakar gas/cair, dan dapat dilakukan melalui berbagai rute konversi. Rute konversi termokimia, khususnya gasifikasi, dianggap menjanjikan untuk mengubah biomassa padat menjadi gas yang mampu bakar (*syngas*).

2.2.2 Karakteristik Biomassa

Karakteristik biomassa secara garis besar didefinisikan sebagai sifat fisik dan kimia yang melekat pada material organik tersebut, yang mencakup komposisi elemen, struktur seluler, serta densitas energinya. komposisi biomassa sangat bervariasi antar jenis bahan bakar, terutama pada konstituen anorganik yang dapat menyebabkan masalah kritis

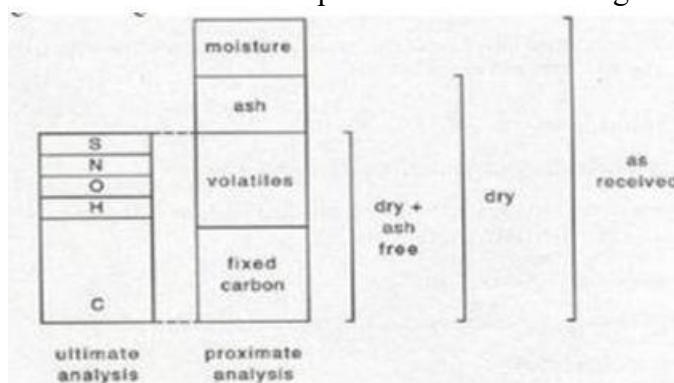
seperti *fouling* (penumpukan deposit) dan *slagging* (pelelehan abu) pada sistem konversi termal (Buckley et al., 1998). Variabilitas ini menuntut pemahaman mendalam terhadap sifat termokimia bahan agar desain reaktor dapat menyesuaikan dengan perilaku pembakaran masing-masing jenis biomassa. Dalam pemanfaatannya sebagai bahan bakar gasifikasi, pemahaman karakteristik ini diperlukan guna menentukan efisiensi konversi serta kualitas gas yang dihasilkan (*syngas*). Karakteristik fisik seperti ukuran partikel dan kadar air, serta karakteristik kimia seperti kandungan karbon terikat, sangat menentukan keberhasilan zona oksidasi dan reduksi di dalam reaktor. Terdapat analisa komposisi dari biomassa ini biasanya digunakan:

a. Analisis *Proximate* (*Proximate Analysis*)

Analisis *proximate* dilakukan untuk mengetahui komposisi fisik biomassa yang secara spesifik mengukur fraksi berat dari komponen-komponen utama penyusunnya, di mana analisis ini sangat krusial dalam menentukan reaktivitas bahan bakar selama proses termokimia berlangsung. Salah satu parameter yang paling kritis adalah kadar air (*moisture content*), karena kandungan air yang tinggi akan menyerap energi panas untuk proses penguapan sehingga menurunkan suhu operasional reaktor dan mengurangi efisiensi gasifikasi secara keseluruhan (Suardi Nur Chairat, Antono, Prayudi, & Nurhasanah, 2021). Selain kadar air, komponen zat terbang (*volatile matter*) juga memegang peranan penting; tingginya kadar zat terbang pada biomassa yang biasanya di atas 70% menandakan bahwa bahan tersebut mudah terbakar dan mampu menghasilkan volume gas yang besar pada suhu yang relatif rendah. Namun, proses ini juga menghasilkan residu anorganik berupa kadar abu (*ash content*) yang jika jumlahnya terlalu tinggi dapat menghambat aliran udara di dalam reaktor serta berisiko membentuk kerak (*clinker*) yang merusak geometri internal reaktor. Terakhir, terdapat karbon terikat (*fixed carbon*) yang merupakan bagian karbon sisa setelah zat terbang dilepaskan, yang berfungsi sebagai cadangan energi utama untuk menjalani proses reduksi guna menghasilkan gas karbon monoksida (CO) pada zona reduksi di dalam reaktor gasifikasi.

b. Analisis *Ultimate* (*Ultimate Analysis*)

Analisis ultimate memberikan informasi yang lebih fundamental mengenai komposisi kimia dasar penyusun biomassa, yang mencakup unsur-unsur utama seperti karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Karbon dan hidrogen merupakan penyumbang utama bagi nilai kalor bahan bakar, di mana oksidasi karbon akan menghasilkan CO_2 dan CO , sementara hidrogen akan membentuk H_2O serta gas H_2 yang sangat diinginkan dalam syngas. Kandungan oksigen dalam biomassa umumnya jauh lebih tinggi dibandingkan pada batu bara, yang menyebabkan biomassa lebih mudah terdegradasi secara termal namun memiliki nilai kalor yang lebih rendah. Sementara itu, nitrogen dan sulfur perlu dipantau secara ketat karena dapat berubah menjadi emisi berbahaya seperti NO_x dan SO_x selama proses konversi suhu tinggi. Sebagaimana dijelaskan dalam (Suparmin et al., 2024), pemodelan gasifikasi sangat bergantung pada akurasi input unsur-unsur ini dalam perhitungan stoikiometri untuk memprediksi komposisi syngas secara tepat, baik melalui simulasi numerik maupun analisis keseimbangan termodinamika.



Gambar 2.1 Analisa *Ultimate* dan *Proximate*

Sumber: (Siedlecki et al., 2011)

2.2.3 Sifat Termofisik Biomassa

Sifat termofisik seperti densitas kampa (*bulk density*), porositas, dan konduktivitas panas memegang peranan vital dalam perancangan serta operasional reaktor gasifikasi karena variabel-variabel ini menentukan bagaimana panas dan massa berpindah di dalam tumpukan bahan bakar. Densitas kampa yang tinggi menunjukkan bahwa energi yang tersimpan per satuan volume lebih besar, sehingga frekuensi pengisian bahan bakar dapat

dikurangi; sebaliknya, densitas yang terlalu rendah dapat menyebabkan fluktuasi suhu karena bahan bakar cepat habis terbakar. Porositas bahan juga sangat menentukan permeabilitas tumpukan terhadap aliran udara; bahan dengan porositas yang baik memungkinkan agen gasifikasi menembus hingga ke inti tumpukan, memastikan reaksi oksidasi dan reduksi terjadi secara merata. (Suardi Nur Chairat, Antono, Prayudi, Nurhasanah, et al., 2021) menyatakan bahwa pada reaktor tanpa *blower*, sifat fisik bahan menjadi faktor pembatas yang paling utama karena laju aliran gas sepenuhnya bergantung pada daya hisap mesin yang terbatas. Jika porositas terlalu rendah atau ukuran partikel terlalu kecil, akan terjadi penurunan tekanan (*pressure drop*) yang tinggi, yang menghambat suplai oksigen dan menurunkan laju produksi syngas. Selain itu, konduktivitas panas material mempengaruhi seberapa cepat energi dari zona oksidasi dapat berpindah ke zona pirolisis untuk memicu pelepasan zat terbang.

2.2.4 Karakteristik Energi pada Biomassa

Energi yang terkandung di dalam biomassa merupakan manifestasi dari potensi energi kimia yang dapat dikonversi menjadi energi termal melalui proses oksidasi parsial di dalam reaktor. Karakteristik energi ini secara fundamental ditentukan oleh komposisi kimia dan sifat fisik material, yang diidentifikasi melalui pengujian *ultimate* untuk memetakan unsur elemental serta pengujian *proximate* untuk parameter fisik seperti kadar air, kadar abu, dan nilai kalor. Komposisi unsur karbon dan hidrogen yang dominan pada suatu biomassa mengindikasikan kepadatan energi yang tinggi, sementara kandungan sulfur dan nitrogen yang rendah sangat diinginkan untuk menjaga agar proses konversi energi tetap ramah lingkungan dengan emisi gas berbahaya yang minimal. Selain itu, proporsi kadar abu yang rendah menjadi faktor teknis penting dalam menjaga integritas operasional reaktor, terutama untuk mencegah pembentukan kerak atau terak (*slagging*) yang dapat mengganggu distribusi panas dan aliran udara. Dalam pemodelan simulasi distribusi panas, potensi energi ini tidak hanya dipandang sebagai nilai kalor statis, melainkan sebagai sumber panas aktif yang menggerakkan seluruh rangkaian reaksi termokimia. Nilai energi tersebut kemudian diintegrasikan ke dalam simulasi sebagai *Volume Heat Source* pada zona oksidasi. Pendekatan ini memungkinkan simulasi untuk merepresentasikan fenomena pelepasan panas secara volumetrik yang akurat, di mana

energi kimia yang tersimpan di dalam struktur biomassa dilepaskan menjadi energi kinetik termal yang mendistribusikan panas ke seluruh zona reaktor, mulai dari zona pengeringan hingga zona reduksi. Dengan demikian, profil temperatur yang dihasilkan dalam simulasi merupakan representasi langsung dari kualitas termofisik biomassa yang digunakan.

2.2.5 Nilai Kalor (*Heating Value*)

Nilai kalor merupakan parameter fundamental yang menunjukkan jumlah energi panas yang dilepaskan oleh suatu massa bahan bakar melalui proses pembakaran sempurna pada kondisi standar, di mana dalam konteks simulasi distribusi panas reaktor gasifikasi, nilai ini menjadi data input utama guna menentukan profil temperatur di zona oksidasi. Peran nilai kalor sangat krusial karena energi panas yang dihasilkan di zona oksidasi harus cukup untuk memicu dan mempertahankan reaksi endotermik pada zona reduksi serta mendukung proses pirolisis pada bagian atas reaktor. Secara teknis, besarnya energi yang dihasilkan dari suatu biomassa sangat bergantung pada interaksi kompleks antara hasil analisis ultimate dan analisis proximate, yang mencerminkan densitas energi serta kemudahan bahan bakar untuk teroksidasi secara termal. Parameter ini tidak hanya menentukan suhu puncak (*peak temperature*) di dalam reaktor, tetapi juga mempengaruhi laju aliran gas dan efisiensi konversi karbon menjadi gas produser. Penjelasan mengenai kapasitas energi ini secara spesifik dijabarkan melalui dua jenis nilai kalor berikut:

a. Higher Heating Value (HHV)

Parameter ini menunjukkan jumlah total panas yang dilepaskan per satuan massa biomassa dengan asumsi bahwa seluruh produk pembakaran dikembalikan ke suhu referensi awal, sehingga uap air yang terbentuk selama proses oksidasi hidrogen dan penguapan kadar air awal terkondensasi sepenuhnya kembali menjadi fase cair. HHV merepresentasikan potensi energi maksimum yang terkandung di dalam bahan bakar secara teoritis. Besarnya nilai HHV ini sangat dipengaruhi oleh kandungan karbon (C) dan hidrogen (H); semakin tinggi persentase kedua unsur ini, maka semakin tinggi pula energi yang dilepaskan

karena oksidasi keduanya merupakan sumber utama reaksi eksotermik. Secara eksperimental, nilai HHV didapatkan melalui pengujian laboratorium menggunakan alat *Bomb Calorimeter*, di mana sampel biomassa dibakar dalam wadah bertekanan tinggi yang dikelilingi oleh air untuk mengukur kenaikan temperatur air secara presisi. Penentuan nilai HHV secara empiris dapat dilakukan menggunakan formula korelasi Dulong sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{HHV} = & (0,3491 \times C) + (1,1783 \times H) + (0,1005 \times S) \\ & - (0,1034 \times O) - (0,0151 \times N) - (0,0211 \times A) \end{aligned} \quad (2.1)$$

a. Lower Heating Value (LHV)

Parameter ini menunjukkan jumlah panas efektif yang tersedia dan dapat dimanfaatkan secara nyata selama proses konversi berlangsung, dengan asumsi bahwa seluruh produk air tetap berada dalam fase gas (uap) sehingga panas laten penguapan air dianggap hilang. Peran LHV dalam gasifikasi sangat krusial karena berdampak langsung terhadap temperatur di zona oksidasi. Faktor penghambat utama LHV adalah kadar air (*moisture*) dan kadar abu (*ash*) yang di mana air memerlukan panas laten yang signifikan untuk penguapan, sementara abu menyerap sebagian panas tanpa berkontribusi pada energi. Selain itu, komposisi lignin yang tinggi umumnya meningkatkan nilai kalor karena struktur molekulnya yang lebih kaya karbon dibandingkan selulosa. Dalam simulasi reaktor *downdraft*, LHV digunakan sebagai input awal yang lebih representatif untuk menentukan efisiensi termis dan kestabilan temperatur reaktor, yang dapat dihitung dengan persamaan:

$$\text{LHV} = \text{HHV} + h. g \left(\frac{9H}{100} - \frac{M}{100} \right) \quad 2.2$$

Sumber:(Basu, 2010)

Keterangan:

HHV = *Higher Heating Value* (MJ/kg).

h.g = Faktor koreksi yang memperhitungkan pengaruh kandungan hidrogen dan kelembaban dalam bahan bakar.

H = Persentase kandungan hidrogen dalam bahan bakar (%).

M = Persentase kadar air atau *moisture content* dalam bahan bakar (%).

2.2.6 Sumber Panas Volumetrik (*Volumetric Heat Source*)

Dalam pemodelan numerik distribusi panas reaktor, konsep *volumetric heat source* (S_h) digunakan untuk merepresentasikan laju pelepasan energi panas per satuan volume secara kontinu di dalam zona reaksi. Parameter ini merupakan elemen kunci dalam simulasi berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk memprediksi profil temperatur secara spasial di dalam *gasifier* (Adli et al., 2021). Penentuan nilai S_h menghubungkan karakteristik termokimia bahan bakar, seperti nilai kalor (LHV), dengan dinamika aliran massa bahan bakar yang dikonsumsi per satuan waktu di dalam reaktor. Berdasarkan studi simulasi menggunakan perangkat lunak, laju aliran udara masuk memiliki pengaruh signifikan terhadap efektivitas sumber panas ini. Udara yang masuk tidak hanya berfungsi sebagai oksidator, tetapi juga sebagai media distribusi kalor. Sebagai contoh, simulasi pada desain spesifik menunjukkan bahwa kecepatan udara sebesar 5 m/s menghasilkan distribusi kalor yang paling merata di seluruh zona oksidasi dibandingkan kecepatan yang lebih rendah atau lebih tinggi (Adli et al., 2021). Hal ini terjadi karena pada kecepatan tersebut, turbulensi yang dihasilkan mampu membawa panas ke area yang lebih luas tanpa mendinginkan zona reaksi secara berlebihan. Penentuan distribusi suhu melalui pendekatan *volumetric heat source* sangat krusial untuk memastikan suhu di ruang bakar mencapai target operasional (Ridwan et al., 2018). Suhu yang cukup tinggi menjamin terjadinya reaksi pemecahan tar dan pembentukan gas mampu bakar seperti CO, H₂, dan CH₄ secara optimal. Jika nilai sumber panas ini tidak terdistribusi dengan baik, dapat terjadi titik panas (*hotspot*) yang berisiko merusak

material reaktor atau titik dingin (*coldspot*) yang mengakibatkan proses gasifikasi tidak sempurna (Wijianto & Alfitrah, 2024).

2.2.7 Pelet Kayu Kaliandra

Pelet kayu kaliandra adalah bentuk bahan bakar padat terdensifikasi yang dibuat dari kayu Kaliandra (*Calliandra calothyrsus*). Tanaman Kaliandra dipilih karena karakteristik pertumbuhannya yang cepat dan kemampuannya beradaptasi di lahan marginal. Proses pembuatan pelet mencakup tiga tahapan utama: pengecilan ukuran (*grinding*) bahan baku, pengeringan hingga kadar air optimal di bawah 15%, dan terakhir adalah peletisasi (*pelletization*). Pada tahap peletisasi, bahan baku dipadatkan menggunakan mesin *pellet mill* dengan tekanan tinggi, di mana lignin alami dalam biomassa berperan sebagai perekat. Pelet yang dihasilkan memiliki karakteristik unggul, termasuk nilai kalor tinggi (contohnya janggol jagung terolah mencapai 16.97 MJ/kg)

dan kandungan air yang rendah, yang sangat krusial untuk menjaga suhu tinggi dalam proses gasifikasi (Yulistiani, 2015). Selain itu, bentuk silindris dan ukuran pelet yang seragam menjamin laju pengumpanan (*feeding rate*) yang stabil, suatu keunggulan yang tidak dimiliki oleh biomassa mentah.



Gambar 2.2 Pelet Kaliandra

Penggunaan pelet kaliandra dalam reaktor gasifikasi menawarkan beberapa kelebihan, terutama pada densitas energi yang tinggi, yang secara signifikan memudahkan penyimpanan dan transportasi. Kandungan airnya yang rendah juga secara langsung meningkatkan efisiensi termal reaktor, sementara alirannya yang stabil ideal untuk operasi reaktor kontinu (Subroto, 2017). Namun, terdapat beberapa kekurangan yang perlu diperhatikan. Proses pembuatan pelet memerlukan investasi energi yang cukup

besar pada tahap *grinding* dan *pelletizing*. Selain itu, pelet rentan terhadap degradasi jika disimpan di lingkungan yang memiliki kelembaban tinggi, dan kandungan abu yang dihasilkan dapat bervariasi tergantung pada kualitas bahan baku asalnya.

2.2.8 Gasifikasi

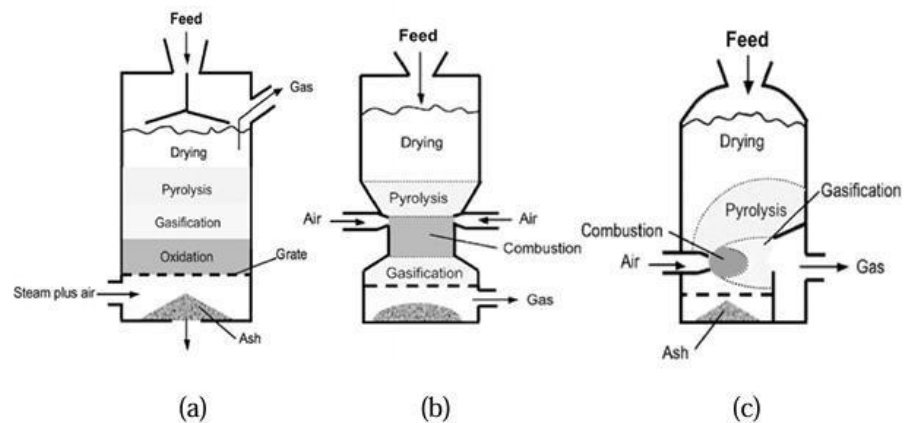
Gasifikasi adalah teknologi konversi termokimia yang mentransformasikan material padat. Gasifikasi merupakan proses konversi termokimia yang mentransformasikan bahan bakar padat berkarbon (biomassa) menjadi gas yang dapat dibakar, yang dikenal sebagai Syngas (*Synthesis Gas*). Proses ini terjadi pada suhu tinggi (umumnya 700°C) dengan suplai agen gasifikasi (seperti udara, oksigen, uap, atau campurannya) yang sengaja dibatasi, atau dikenal sebagai kondisi *sub-stoikiometri* (Ridwan et al., 2018). Pembatasan agen gasifikasi ini adalah perbedaan mendasar antara gasifikasi dan pembakaran (*combustion*), di mana pembakaran bertujuan menghasilkan panas dan CO₂ secara maksimal, sedangkan gasifikasi bertujuan menghasilkan gas yang kaya energi. *Syngas* sendiri adalah campuran gas yang mengandung komponen utama yang mudah terbakar, yaitu Hidrogen (H₂), Karbon Monoksida (CO), dan Metana (CH₄), serta gas *non-combustible* seperti Karbon Dioksida (CO₂) dan Nitrogen (N₂). Nilai kalor *syngas* sangat bergantung pada jenis agen gasifikasi yang digunakan. Salah satu parameter operasional terpenting dalam gasifikasi adalah *Equivalence Ratio* (ER), yang didefinisikan sebagai rasio antara udara aktual yang disuplai ke reaktor dengan udara stoikiometri yang diperlukan untuk pembakaran sempurna. Dalam gasifikasi, nilai ER selalu berada di antara $0.2 < ER < 0.4$, yang menjamin terjadinya pembakaran parsial dan pembentukan *syngas*.

2.2.8 Jenis-Jenis Reaktor Gasifikasi

Sistem gasifikasi secara teknis diklasifikasikan berdasarkan mekanisme interaksi antara fasa padat biomassa dengan fasa gas agen gasifikasi, yang secara langsung menentukan profil distribusi panas, waktu tinggal partikel, serta kualitas gas produser yang dihasilkan. Pemilihan jenis reaktor sangat bergantung pada kapasitas energi yang dibutuhkan, karakteristik bahan baku, serta toleransi kadar tar yang diizinkan untuk aplikasi hilir. Secara umum, klasifikasi reaktor gasifikasi dijabarkan sebagai berikut:

1. Fixed Bed Gasifier

Fixed Bed Gasifier merupakan desain reaktor klasik yang sangat andal untuk operasional skala kecil dengan mengandalkan tumpukan biomassa padat yang bergerak turun secara gravitasi melewati zona reaksi terstratifikasi. Secara umum, reaktor ini dibedakan menjadi tiga tipe utama berdasarkan arah aliran agen gasifikasinya. Pertama, *Updraft Gasifier* mengalirkan agen gasifikasi dari bawah ke atas, yang meskipun menawarkan efisiensi termis tinggi, menghasilkan kadar tar yang besar ($10\text{-}100\text{ g/Nm}^3$) karena uap pirolisis langsung keluar tanpa melalui proses pemecahan. Kedua, *Downdraft Gasifier* sering dianggap sebagai standar emas untuk aplikasi mesin pembakaran internal karena kemampuannya menekan kadar tar hingga di bawah 1 g/Nm^3 . Hal ini dicapai melalui mekanisme *thermal cracking* saat seluruh gas dipaksa melewati zona "tenggorokan" (*throat*) bersuhu ekstrem di atas $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Konfigurasi ini juga memberikan keuntungan signifikan dalam simulasi numerik karena posisi zona pembakarannya yang relatif tetap dan terdefinisi dengan jelas, memungkinkan pemodelan distribusi panas volumetrik yang akurat. Terakhir, *Cross-draft Gasifier* mengarahkan agen gasifikasi secara horizontal melintasi unggun bahan bakar. Tipe ini dikenal karena waktu responnya yang sangat cepat dan kemampuannya menghasilkan gas berkualitas tinggi dalam volume kecil, meskipun memerlukan spesifikasi bahan bakar yang lebih ketat dibandingkan tipe lainnya.

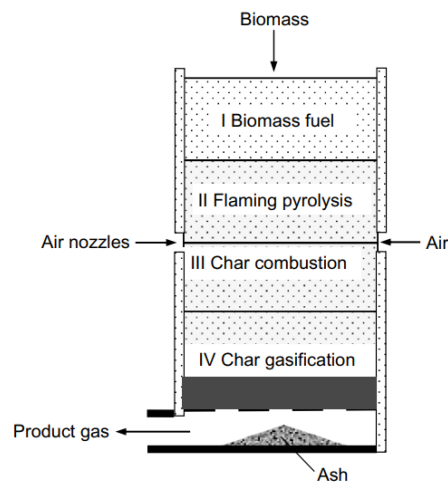


Gambar 2.3 Gasifier tipe fixed-bed (a) updraft, (b) downdraft, dan (c) crossdraft

Sumber:(Basu, 2010)

2.2.9 Gasifier Tipe *Downdraft*

Gasifier Tipe Downdraft adalah jenis reaktor gasifikasi di mana aliran bahan bakar, agen gasifikasi (udara), dan gas produk bergerak searah, dari atas ke bawah reaktor. Agen gasifikasi disuntikkan melalui *tuyere* di sekitar Zona Oksidasi yang terletak di bagian tengah reaktor. Prinsip kerjanya yang unik adalah memaksa gas volatil dan tar yang terbentuk di Zona Pirolisis untuk melewati Zona Oksidasi yang memiliki suhu puncak (500°C). Kontak gas dengan zona panas ini menyebabkan terjadinya perengkahan (*cracking*) tar menjadi gas yang lebih ringan. Karakteristik ini membuat gasifier *downdraft* mampu menghasilkan *syngas* dengan kandungan tar yang sangat rendah, sehingga gas produknya menjadi relatif bersih (Subroto, 2017).



Gambar 2.4 *Downdraft Gasifier*

Sumber: (Basu, 2010)

Gasifier tipe downdraft memiliki kelebihan utama yaitu menghasilkan *syngas* yang bersih, menjadikannya sangat ideal untuk aplikasi yang sensitif seperti bahan bakar pada mesin pembakaran internal (ICE) atau mesin *dual-fuel* (Ridwan et al., 2018). Selain itu, desain reaktor ini relatif lebih sederhana dibandingkan reaktor tipe *fluidized bed*. Namun, tipe *downdraft* juga memiliki keterbatasan. Reaktor ini menuntut ukuran dan densitas bahan bakar yang seragam (seperti pelet) untuk memastikan aliran yang optimal. Kekurangan lainnya adalah rentannya pembentukan *clinker* (kerak abu) di bagian *ash grate* akibat suhu operasi yang sangat tinggi. Dalam hal aplikasi, gasifier *downdraft*

umum digunakan pada pembangkit listrik skala kecil hingga menengah (di bawah 1 MW) dan sebagai tungku pembakaran untuk alat pengering hasil pertanian (Gabul et al., 2024). Pengembangan reaktor saat ini berfokus pada optimasi parameter operasional seperti variasi *Equivalence Ratio* (ER) dan pengendalian Temperatur Oksidasi untuk meningkatkan efisiensi termal (Suliono et al., 2017). Selain itu, kinerja reaktor seperti efisiensi termal dan nilai kalor gas produk sangat bergantung pada desain komponen reaktor itu sendiri (Suardi Nur Chairat, Antono, Prayudi, & Nurhasanah, 2021; Suparmin et al., 2023). Berikut adalah bagian utama dari reaktor tipe *Downdraft*:

1. *Hopper Feedstock*

Komponen ini berfungsi sebagai wadah penampung sekaligus penyalur biomassa ke dalam zona pengeringan reaktor. Penggunaan material SS 201 dipilih karena memiliki konduktivitas termal sebesar 16,3 W/mK dan titik leleh yang cukup tinggi (1398-1454°C), yang mampu menjaga integritas struktural pada bagian atas reaktor.



Gambar 2.5 *Hopper Feedstock*

2. *Case Reaktor*

Struktur luar atau selongsong utama reaktor yang menopang seluruh komponen internal. Material SS 201 digunakan karena memiliki kekuatan tarik (*Tensile Strength*) mencapai 685 MPa, sehingga mampu memberikan dukungan mekanis yang kuat bagi sistem nosel udara dan struktur isolasi panas di dalamnya.



Gambar 2.6 Case Reaktor

3. *Inner Insulant*

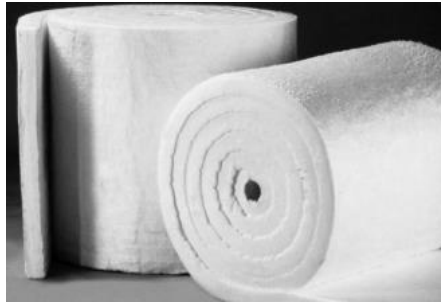
Lapisan isolasi dalam yang bersentuhan langsung dengan zona pembakaran (oksidasi). Menggunakan material *Fire Brick SK-34* yang memiliki temperatur kerja maksimum hingga 1300 °C. Material tahan api ini mengandung komposisi kimia $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 40\%$, yang sangat efektif untuk menahan beban termal ekstrem di dalam reaktor tanpa mengalami kerusakan struktural.



Gambar 2.7 *Inner Insulant*

4. *Heat Insulant*

Lapisan isolasi termal sekunder yang diletakkan di antara *inner insulant* dan *case reaktor*. Menggunakan material *Ceramic Fiber Blanket* dengan batas penggunaan kontinu hingga 1200 °C. Material ini memiliki konduktivitas termal yang sangat rendah (sekitar 0,07 - 0,28 W/mK tergantung suhu), yang berfungsi krusial untuk meminimalkan kehilangan panas (*heat loss*) ke lingkungan luar.



Gambar 2.8 *Heat Insulant*

Sumber: (GLT products, n.d.)

5. *Ash Collector*

Komponen yang terletak di bagian dasar reaktor untuk menampung residu abu sisa pembakaran. Penggunaan material SS 201 pada bagian ini memberikan ketahanan terhadap korosi dan suhu sisa dari zona reduksi, sekaligus memastikan kelancaran pembuangan limbah padat hasil gasifikasi.



Gambar 2.9 *Ash Collector*

2.2.10 Proses Gasifikasi

Secara keseluruhan, proses gasifikasi di dalam reaktor berlangsung melalui empat zona reaksi yang berurutan secara termokimia, di mana setiap zona memiliki fungsi dan rentang suhu spesifik yang dijelaskan sebagai berikut:

a. Zona Pengeringan (*Drying Zone*)

Zona Pengeringan adalah zona paling atas reaktor, di mana biomassa yang masuk mengalami penguapan kandungan airnya (*moisture content*) akibat transfer panas dari zona reaksi di bawahnya. Proses ini bersifat endotermis (membutuhkan

panas) dan energinya setara dengan kalor laten penguapan air. Kadar air awal biomassa sangat menentukan jumlah energi yang dibutuhkan di zona ini; semakin tinggi kadar air, semakin besar kehilangan energi yang harus diimbangi oleh zona di bawahnya. Pengeringan harus sempurna sebelum biomassa bergerak ke Zona Pirolisis, karena air dapat menurunkan suhu reaksi secara keseluruhan, yang sangat mempengaruhi efisiensi termal sistem dan kualitas *syngas* yang dihasilkan. Rentang suhu umum pada zona ini adalah 200°C.

b. Zona Pirolisis (*Pyrolysis Zone*)

Setelah biomassa kering, material masuk ke Zona Pirolisis, yang didefinisikan sebagai dekomposisi termal biomassa secara intensif tanpa adanya oksigen. Proses ini merupakan rangkaian kompleks reaksi dekomposisi organik yang menghasilkan tiga produk utama: arang padat (*char*) yang kaya karbon, gas non-kondensabel yang terdiri dari gas volatil ringan seperti CO, H₂, CO₂, CH₄, dan tar yang berupa uap hidrokarbon berat dan akan mengembun menjadi cairan kental pada suhu ruang. Proses pirolisis dapat dibagi menjadi tiga tahapan seiring peningkatan suhu: (1) pelepasan uap air dan gas ringan, (2) dekomposisi senyawa hemiselulosa dan selulosa, dan (3) dekomposisi lignin pada suhu tertinggi. Kandungan tar yang dihasilkan di zona ini harus dipecah di zona oksidasi di bawahnya, menjadikan interaksi Pirolisis-Oksidasi sangat penting pada reaktor tipe *downdraft*. Rentang suhu umum pada zona ini adalah 200°C – 600°C.

c. Zona Oksidasi (*Oxidation Zone*) / Pembakaran Parsial

Zona Oksidasi adalah jantung termal reaktor gasifikasi dan merupakan area fokus utama dalam penelitian ini. Di sini, arang (*char*) dari pirolisis bereaksi dengan agen gasifikasi (biasanya udara) yang disuntikkan melalui *tuyere*. Zona ini berfungsi sebagai sumber energi panas eksotermis utama untuk seluruh proses gasifikasi, terutama untuk menggerakkan reaksi endotermis di Zona Reduksi. Suhu yang sangat tinggi di zona ini (800°C – 1000°C) dihasilkan dari reaksi pembakaran parsial karbon yang mendominasi, seperti:



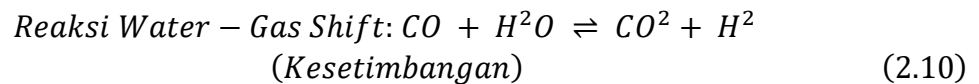
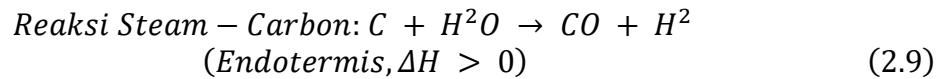
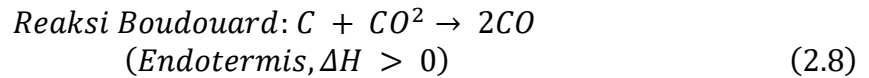
Sumber: (Rinovianto, 2012)

Suhu yang tidak memadai di zona ini akan menyebabkan penurunan kualitas *syngas* dan terhentinya reaksi di Zona Reduksi. Pada reaktor tipe *downdraft*, gas volatil dan tar dari Zona Pirolisis dipaksa mengalir melewati Zona Oksidasi yang sangat panas. Peran suhu tinggi di Zona Oksidasi menjadi ganda yaitu selain menyediakan panas, ia juga menyebabkan perengkahan termal (*thermal cracking*) pada tar. Proses *cracking* ini mengubah tar, yang merupakan kontaminan berbahaya bagi mesin, menjadi gas-gas ringan (*syngas*), sehingga menghasilkan gas produk yang relatif bersih, yang merupakan keunggulan utama reaktor *downdraft*. Karena kompleksitas kinetika kimia pada suhu tinggi, dalam simulasi CHT, Zona Oksidasi disederhanakan sebagai area yang memiliki Sumber Panas Volumetrik (Q_{vol}) yang terdistribusi secara seragam. Nilai (Q_{vol}) ini adalah representasi dari total energi yang dilepaskan oleh reaksi eksotermis di zona ini, yang kemudian menjadi *input* daya termal untuk domain padatan (dinding reaktor) dalam simulasi. Oleh karena itu, akurasi nilai (Q_{vol}) dan prediksi distribusi suhu dinding reaktor yang diakibatkannya adalah fokus utama dari penelitian ini. Rentang suhu umum pada zona ini adalah (800°C – 1000°C).

d. Zona Reduksi (*Reduction Zone*)

Terakhir, Zona Reduksi terletak di bagian bawah reaktor. Gas CO₂ dan H₂O yang dihasilkan di Zona Oksidasi akan bereaksi dengan arang sisa (*char*) pada suhu tinggi. Reaksi-reaksi yang terjadi di zona ini adalah endotermis (membutuhkan panas) dan bertujuan untuk mengubah CO₂ dan air menjadi komponen *syngas* yang mudah terbakar (CO dan H₂). Panas yang dibutuhkan disuplai dari Zona Oksidasi yang berada tepat di atasnya. Tiga reaksi endotermis utama yang terjadi pada suhu tinggi adalah Reaksi *Boudouard* yang mengkonversi CO₂ menjadi CO, Reaksi *Steam-Carbon* yang mengkonversi H₂O menjadi CO dan H₂, dan Reaksi *Water-Gas Shift* yang merupakan reaksi kesetimbangan penting untuk

menyesuaikan rasio H_2/CO dalam *syngas*. Reaksi-reaksi ini digambarkan sebagai berikut:



Tingkat keberhasilan Zona Reduksi, yang ditandai dengan konversi CO_2 dan H_2O yang tinggi, secara langsung meningkatkan nilai kalor *syngas* dan efisiensi keseluruhan proses gasifikasi. Rentang suhu umum pada zona ini adalah $700^\circ C - 900^\circ C$ (Menurun dari Zona Oksidasi).

2.2.11 Udara dalam Proses Gasifikasi

Suplai udara merupakan variabel kontrol yang sangat krusial dalam proses gasifikasi karena udara berfungsi sebagai agen oksidasi yang memicu reaksi termokimia di dalam reaktor. Jumlah udara yang dipasok menentukan apakah material organik tersebut akan mengalami pembakaran sempurna (*combustion*), gasifikasi, atau pirolisis. Penentuan jumlah udara yang tepat sangat krusial untuk menghasilkan *syngas* dengan nilai kalor yang optimal, di mana rasio udara terhadap bahan bakar harus berada pada titik tertentu guna menyeimbangkan antara panas yang dihasilkan untuk menjaga suhu reaktor dan jumlah gas mampu bakar yang tidak terbakar secara berlebihan (Suardi Nur Chairat, Antono, Prayudi, & Nurhasanah, 2021). Variasi rasio udara ini secara signifikan mempengaruhi profil temperatur di setiap zona reaktor serta menentukan konsentrasi gas CO , H_2 , dan CH_4 yang merupakan komponen utama energi *syngas*. (Suliono et al., 2017). Pengaturan rasio udara ini umumnya dinyatakan melalui konsep *Equivalence Ratio (ER)*.

a. Udara Teoritis (*Stoichiometric Air*)

Udara teoritis didefinisikan sebagai jumlah udara minimum yang diperlukan secara matematis untuk membakar habis seluruh unsur reaktif di dalam biomassa (karbon, hidrogen, dan sulfur) sehingga menjadi produk oksidasi sempurna tanpa menyisakan oksigen bebas. Parameter ini dihitung berdasarkan prinsip neraca massa unsur-unsur kimia hasil dari analisis ultimate, di mana nilai udara teoritis menjadi titik acuan absolut untuk menentukan seberapa banyak udara yang harus "dikurangi" agar proses pembakaran bergeser menjadi gasifikasi. Secara kimiawi, reaksi pembakaran stoikiometri biomassa mengikuti prinsip keseimbangan atom, di mana untuk setiap atom karbon diperlukan satu molekul oksigen dan untuk setiap empat atom hidrogen diperlukan satu molekul oksigen. Mengingat udara atmosfer hanya mengandung sekitar 23,2% oksigen berdasarkan massa, maka massa udara yang dibutuhkan menjadi jauh lebih besar daripada massa oksigen itu sendiri, sehingga kebutuhan udara teoritis untuk 1 kg bahan bakar biomassa dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Kebutuhan Oksigen teoritis} \times \frac{100}{23,2} \quad (2.11)$$

$$\text{Udara Teorit} = \frac{23,2}{100} \times (\text{O2 diperlukan C} + \text{O2 diperlukan oleh H} \\ + \text{O2 diperlukan oleh S})$$

Dimana:

$C = \% \text{ Carbon/Kg bahan bakar}$

$H = \% \text{ Hidrogen/Kg bahan bakar}$

$O = \% \text{ Oksigen/Kg bahan bakar}$

$S = \% \text{ Sulfur /Kg bahan bakar}$

b. Udara Aktual (*Actual Air*)

Udara aktual merupakan kuantitas massa udara yang secara nyata ditiupkan atau dihisap masuk ke dalam reaktor gasifikasi melalui nosel udara selama operasional berlangsung. Berbeda dengan udara teoritis yang bersifat statis berdasarkan

komposisi bahan, udara aktual bersifat dinamis karena dikontrol langsung oleh sistem kontrol reaktor, seperti melalui pengaturan *supply* udara atau diameter nosel guna menjaga kondisi "sub-stoikiometri". Pembatasan oksigen ini memaksa terjadinya oksidasi parsial yang menghasilkan gas mudah terbakar seperti Karbon Monoksida (CO) dan Hidrogen Hidrogen (H₂). Dalam konteks simulasi distribusi panas, parameter udara aktual dikonversi menjadi laju alir massa udara yang memiliki peran ganda yang di mana secara termal, oksigen memicu reaksi eksotermik di zona oksidasi sebagai penyedia energi untuk reaksi endotermik; sedangkan secara fluida, kecepatan udara masuk menciptakan turbulensi yang mempengaruhi perpindahan panas konveksi serta kedalaman penetrasi oksigen ke dalam tumpukan biomassa. Perhitungan laju alir massa udara aktual dalam simulasi sering kali didasarkan pada perkalian antara laju konsumsi biomassa dengan rasio udara-bahan bakar aktual sebagai berikut:

$$Udara_{Aktual} = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{biomassa}} \quad (2.12)$$

Keterangan:

$\dot{m}_{udara}$ = Massa aliran udara (kg/s)

$\dot{m}_{biomassa}$ = Massa aliran bahan bakar (kg/s)

c. *Equivalence Ratio (ER)*

Equivalence Ratio (ER) didefinisikan sebagai rasio antara perbandingan massa udara-bahan bakar yang disuplai secara aktual ke reaktor (reaktor gasifikasi) dengan perbandingan massa udara-bahan bakar yang dibutuhkan secara teoretis untuk mencapai pembakaran sempurna (stoikiometri) (Suliono et al., 2017). Proses yang terjadi pada gasifikasi adalah oksidasi parsial (pembakaran tidak sempurna), di mana suplai udara atau agen gasifikasi dibatasi. Oleh karena itu, nilai *ER* harus selalu lebih kecil dari satu ($ER < 1$). Nilai *ER* yang optimal sangat

menentukan suhu reaksi di zona oksidasi reaktor dan komposisi akhir dari gas produk (syngas) (Suparmin et al., 2023). Pemilihan nilai ER yang tepat adalah kunci untuk mencapai efisiensi termal yang tinggi dan kualitas syngas yang baik (tinggi kandungan CO dan H_2). Jika nilai ER terlalu rendah, suhu reaktor akan menjadi rendah, menyebabkan konversi biomassa menjadi syngas tidak maksimal dan produksi tar yang tinggi. ER yang terlalu tinggi akan meningkatkan pembakaran penuh dan mengurangi komponen gas yang mudah terbakar (Suardi Nur Chairat, Antono, Prayudi, Nurhasanah, et al., 2021).

$$ER = \frac{Udara_{Aktual}}{Udara_{Teoritis}} \quad (2.13)$$

2.2.12 Parameter pada Gasifikasi

Efektivitas proses gasifikasi dipengaruhi oleh interaksi antara kondisi operasional reaktor dan karakteristik bahan baku yang digunakan. Berikut adalah parameter-parameter utama yang menentukan keberhasilan proses tersebut:

1. Suhu Reaktor Gasifikasi

Suhu merupakan indikator utama dari energi panas yang tersedia untuk memicu reaksi endotermik pada zona reduksi. Suhu di dalam ruang pembakaran (zona oksidasi) harus dijaga di atas 500 °C sebagai syarat minimal terjadinya proses pembentukan syngas (Ridwan et al., 2018). Suhu operasional yang ideal untuk gasifikasi biomassa umumnya berkisar antara 550 °C hingga 600 °C. Jika suhu terlalu rendah, reaksi reduksi tidak berjalan sempurna sehingga gas yang dihasilkan mengandung banyak tar dan nilai kalornya rendah. Sebaliknya, suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan terjadinya pelelehan abu (*slagging*) yang dapat menyumbat aliran udara dalam reaktor (Buckley et al., 1998b).

2. Komposisi dan Properti Fisik Biomassa

Karakteristik bahan baku menentukan seberapa efisien energi kimia dalam padatan dapat diubah menjadi gas melalui analisis komposisi kimia dan properti fisik material. Komposisi kimia, yang diukur melalui analisis *ultimate* dan *proximate*, menunjukkan

bahwa unsur Karbon (C) dan Hidrogen (H) merupakan penyumbang utama bagi nilai kalor syngas yang dihasilkan. Namun, keberadaan kadar air (*moisture*) yang tinggi dapat menurunkan suhu operasional reaktor karena sebagian besar energi panas akan terserap untuk proses penguapan air, sementara kadar abu (*ash*) yang berlebihan berisiko membentuk kerak yang menghambat aliran udara. Selain aspek kimia, properti fisik seperti ukuran partikel, densitas kampa, dan porositas juga memegang peranan vital dalam menentukan permeabilitas tumpukan biomassa di dalam reaktor. Pada reaktor tanpa *blower*, porositas bahan menjadi faktor pembatas utama karena laju aliran gas sepenuhnya bergantung pada daya hisap mesin untuk menembus hambatan dari tumpukan bahan baku tersebut (Suardi Nur Chairat, Antono, Prayudi, Nurhasanah, et al., 2021).

3. Laju Alir Udara (*Air Flow Rate*) dan Kecepatan *Superficial*

Laju alir udara sangat krusial karena menentukan densitas energi termal per satuan luas penampang reaktor, di mana parameter utama yang digunakan untuk membandingkan performa antar reaktor adalah Kecepatan *Superficial*. Dalam operasional reaktor *downdraft*, kecepatan *superficial* yang ideal berkisar antara 2,5 - 4,0 m/s, sebab jika laju alir udara berada di bawah rentang tersebut (terlalu rendah), zona oksidasi tidak akan mencapai suhu optimal yang dibutuhkan untuk proses penghancuran tar, sementara jika laju alir udara melebihi rentang ideal (terlalu tinggi), maka waktu tinggal gas di zona reduksi akan menjadi terlalu singkat untuk mencapai kesetimbangan kimia yang diinginkan serta memunculkan risiko terbawanya partikel abu keluar dari reaktor (*carry over*).

2.2.13 Simulasi *Computational Fluid Dynamics*

Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) merupakan alat bantu komputasi yang digunakan untuk memecahkan persamaan fluida dan perpindahan panas yang kompleks. Metode ini secara khusus berfokus pada kondisi aliran turbulen dan interaksi antara fluida dan padatan. Dalam konteks reaktor gasifikasi, analisis utama berfokus pada Konjugasi Perpindahan Panas, yaitu studi perpindahan energi termal yang terjadi secara simultan melalui interaksi antara domain fluida (gas produk dan agen gasifikasi) dan

domain padatan (dinding reaktor dan insulasi). Perpindahan panas yang terjadi di dalam dan melalui dinding reaktor gasifikasi mencakup tiga mekanisme utama. Pertama adalah Konveksi, yaitu perpindahan panas antara gas di dalam reaktor dan permukaan dalam dinding reaktor. Kedua adalah Konduksi, yang merupakan perpindahan panas melalui material padatan dinding reaktor dan lapisan insulasi. Ketiga adalah Radiasi, yaitu perpindahan panas dari zona oksidasi bersuhu tinggi ke permukaan dalam dinding reaktor.

Meskipun model CFD yang komprehensif sering kali mencakup mekanisme reaksi kimia yang terperinci (kinetika) untuk memprediksi komposisi *syngas*, penelitian ini memiliki fokus utama pada analisis termal distribusi suhu dinding reaktor. Dalam konteks ini, Zona Oksidasi dapat disederhanakan sebagai sumber energi termal utama yang diserap oleh dinding. Oleh karena itu, reaksi termokimia yang sangat kompleks disederhanakan sebagai Sumber Panas Volumetrik (Q_{vol}) terdistribusi seragam di Zona Oksidasi. Pendekatan penyederhanaan ini memprioritaskan akurasi prediksi profil suhu dinding reaktor atas komposisi gas produk, sehingga mengurangi kompleksitas komputasi secara signifikan dan masih dapat divalidasi dengan pengukuran suhu aktual di lapangan (Ibrahim Ahmad, 2025). Besaran nilai (Q_{vol}) ini dihitung berdasarkan energi yang dilepaskan bahan bakar (nilai kalor x laju massa) dengan mempertimbangkan efisiensi konversi termal.

2.2.14 Pemodelan Numerik

Pemodelan numerik dalam penelitian ini dilakukan untuk mensimulasikan fenomena fisik yang kompleks di dalam reaktor. Perangkat lunak *SolidWorks Flow Simulation* menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk menyelesaikan serangkaian persamaan pengatur (*governing equations*) yang didasarkan pada hukum kekekalan massa, momentum, dan energi. Berikut merupakan persamaan yang digunakan dalam *SolidWorks Flow Simulation*:

a. Persamaan Kontinuitas (Kekekalan Massa)

Persamaan kontinuitas merupakan perwujudan dari hukum kekekalan massa yang menyatakan bahwa massa fluida yang masuk ke dalam volume kontrol harus sama dengan massa yang keluar ditambah dengan akumulasi massa di dalamnya.

Persamaan ini memastikan bahwa laju alir massa udara agen dan gas hasil gasifikasi terhitung secara konsisten di seluruh domain simulasi.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.14)$$

Keterangan:

ρ (kg/m³) = Massa Jenis Fluida.

t (s) = Waktu.

u_i (m/s) = Komponen kecepatan pada arah x, y, z

x_i = Arah koordinat ruang fluida mengalir

b. Persamaan *Navier-Stokes* (Kekekalan Momentum)

Persamaan momentum atau dikenal sebagai persamaan *Navier-Stokes* merupakan aplikasi dari Hukum II *Newton* pada fluida. Persamaan ini menghitung keseimbangan gaya-gaya yang bekerja pada elemen fluida, termasuk gaya tekanan, gaya viskos (hambatan aliran), dan gaya eksternal seperti gravitasi.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \rho g_i \quad (2.15)$$

Keterangan:

ρ (kg/m³) = Massa jenis fluida

u_i (m/s) = Komponen kecepatan pada arah x, y, z

p (Pa) = Tekanan statis

μ (kg/m·s) = Viskositas dinamis

g_i (m/s²) = Percepatan gravitasi

δ_{ij} = Delta Kronecker

c. Persamaan Konservasi Energi (Perpindahan Panas)

Hukum pertama termodinamika diterapkan melalui persamaan energi untuk menghitung distribusi panas di dalam sistem. Dalam reaktor gasifikasi, energi panas tidak hanya berpindah melalui aliran fluida (konveksi), tetapi juga melalui konduksi pada material dinding reaktor.

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho e + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j \tau_{ij} \right) + S_h \quad (2.16)$$

Keterangan:

ρ (kg/m ³)	= Massa jenis fluida
e (J/kg)	= Energi internal spesifik
p (Pa)	= Tekanan
u_i (m/s)	= Komponen kecepatan
k (W/m·K)	= Konduktivitas termal
T (K)	= Temperatur
τ_{ij}	= Tensor tegangan viskos
S_h (W/m ³)	= Sumber panas volumetrik

d. Model Turbulensi RANS (k)

Aliran di dalam reaktor *downdraft* memiliki bilangan Reynolds yang tinggi, yang mengindikasikan adanya aliran turbulen. Untuk mengatasi fluktuasi kecepatan yang sangat acak, digunakan pendekatan *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS).

Persamaan Energi Kinetik Turbulen (k):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (2.17)$$

Persamaan Laju Disipasi Turbulen (ϵ):

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.18)$$

Keterangan:

k (m²/s²) = Energi kinetik turbulen

ϵ (m²/s³) = Laju disipasi turbulen

μ = Viskositas dinamis

μ_t = Viskositas turbulen

$\sigma_k, \sigma_\epsilon$ = Konstanta Prandtl turbulen

P_k = Produksi energi kinetik turbulen

$C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$ = Konstanta model

e. Persamaan Keadaan (*Equation of State*)

Untuk menghubungkan parameter mekanika fluida dengan termodinamika, simulasi ini menerapkan Persamaan Keadaan. Karena suhu gasifikasi berada jauh di atas titik kritis komponen gasnya, hukum gas ideal digunakan sebagai pendekatan yang valid untuk menentukan kerapatan gas berdasarkan tekanan dan suhunya.

$$p = \rho RT \quad (2.19)$$

Keterangan Variabel:

p (Pa) = Tekanan

ρ (kg/m³) = Massa jenis fluida

R (J/kg·K) = Konstanta Gas Spesifik

T (K) = Temperatur

2.2.15 Isolasi Termal

Isolasi termal adalah praktik yang digunakan untuk meminimalkan perpindahan energi panas antara dua sistem dengan suhu yang berbeda. Dalam konteks reaktor gasifikasi, isolasi termal sangat krusial untuk dua alasan utama: (1) mempertahankan suhu operasi yang tinggi (seperti 700°C – 1000°C) di Zona Oksidasi demi keberlanjutan reaksi gasifikasi, dan (2) mengurangi kerugian energi (heat loss) ke lingkungan luar, sehingga meningkatkan efisiensi termal sistem secara keseluruhan. Bahan yang digunakan sebagai isolasi, sering disebut bahan refraktori, harus memiliki titik lebur tinggi dan, yang paling penting, nilai Konduktivitas Termal (k) yang sangat rendah.

2.2.16 material insulasi

Material insulasi termal secara umum diklasifikasikan berdasarkan komposisi dan struktur fisiknya, yang menentukan rentang suhu operasi serta efektivitasnya dalam menghambat aliran panas melalui tiga kelompok utama, yaitu insulasi berserat (*fibrous insulation*) yang menggunakan serat halus untuk menjebak udara sebagai penghambat panas, insulasi seluler (*cellular insulation*) yang terdiri dari sel tertutup atau terbuka seperti *foam glass* untuk suhu rendah hingga sedang, dan insulasi granular (*granular insulation*) berbentuk butiran seperti *perlite* untuk pengisi rongga dinding reaktor. Pada reaktor yang digunakan, jenis insulasi berserat diimplementasikan melalui penggunaan *Ceramic Fiber Blanket* (Tipe HPS/HTZ) yang tersusun dari serat fleksibel hasil proses *spun*, di mana udara yang terjebak di dalam pori-pori seratnya menghasilkan nilai konduktivitas termal yang sangat rendah (0,07 - 0,28 W/mK). Berdasarkan data teknis, material ini memiliki batas penggunaan kontinu pada suhu 1200 °C hingga 1325 °C dengan titik leleh mencapai 1760 °C, sehingga sangat efektif dalam meminimalkan kehilangan panas ke lingkungan luar serta memberikan ketahanan terhadap kejutan termal (*thermal shock*) tanpa memerlukan waktu pengeringan (*curing*) sebelum reaktor dioperasikan. Berikut adalah *material properties* insulasi yang digunakan pada reaktor gasifikasi

Tabel 2.1 Material Insulasi

Kategori	Parameter	HPS	HTZ
Sifat Fisik	<i>Max. Use Limit</i> °C (°F)	1315 (2400)	1425 (2600)
	<i>Continuous Use Limit</i> °C (°F)	1200 (2192)	1325 (2417)
	<i>Melting Point</i> °C (°F)	1760 (3200)	1760 (3200)
	<i>Average Fiber Diameter</i> (microns)	3.0	3.0
	<i>Average Fiber Length</i> mm (in)	203 (8)	203 (8)
<i>Linear Shrinkage</i> (%)	24 jam @ 1000 °C (1832 °F)	–	–
	24 jam @ 1100 °C (2012 °F)	1.8	–
	24 jam @ 1300 °C (2372 °F)	–	2.0
Analisis Kimia (%)	Al ₂ O ₃	44 – 50	33 – 37
	SiO ₂	50 – 56	47 – 51
	ZrO ₂	–	13 – 19
	Fe ₂ O ₃	0.1 – 0.2	0.1 – 0.2
	TiO ₂	0.1 – 0.2	0.1 – 0.2

2.2.17 material refraktori

Material refraktori adalah bahan non-logam yang memiliki kemampuan luar biasa untuk mempertahankan kekuatan mekanik, stabilitas kimia, dan integritas strukturalnya pada suhu yang sangat tinggi (1500°C), serta tahan terhadap korosi dan abrasi, sehingga material ini menjadi lapisan pelindung utama pada Zona Oksidasi dan Reduksi di dalam reaktor. Berdasarkan komposisi kimianya, refraktori dibagi menjadi tiga kategori utama. Kategori pertama adalah Refraktori Asam (*Acid Refractories*), yang terutama terdiri dari Silika (SiO₂) dan memiliki ketahanan tinggi terhadap lingkungan yang bersifat asam,

namun rentan terhadap serangan terak (*slag*) yang bersifat basa. Kategori kedua adalah Refraktori Basa (*Basic Refractories*) yang mengandung oksida basa seperti Magnesia (MgO) dan Dolomite, unggul dalam ketahanan terhadap terak basa, dan banyak digunakan di zona reaksi dengan kondisi kimia yang agresif dan suhu sangat tinggi. Kategori terakhir adalah Refraktori Netral (*Neutral Refractories*) yang termasuk Alumina (Al_2O_3), Kromit, dan Karbon; material ini stabil secara kimia di lingkungan asam maupun basa, menjadikannya sangat serbaguna. Refraktori Alumina Tinggi (dengan kadar Al_2O_3 di atas 50%) sering dipilih untuk reaktor gasifikasi karena kombinasi ketahanan termal, kekuatan, dan ketidakreaktifan kimianya. Dalam aplikasinya pada reaktor gasifikasi ini, digunakan kombinasi material yang spesifik, yaitu bata api SK-34 sebagai refraktori netral alumina-silika $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 40\%$, yang mampu menahan temperatur kerja hingga 1300 °C dengan kekuatan tekan tinggi untuk menjaga stabilitas struktur tumpukan bahan bakar. Berikut adalah *material properties refractory* yang digunakan pada reaktor gasifikasi:

Tabel 2.2 Material Refraktori

No.	Spesifikasi	SK-34
1	Temperatur Kerja Maksimum (°C)	1300
2	Porositas Tampak (%)	19 – 22
3	Berat Jenis / Bulk Density (ton/m^3)	1.98 – 2.10
4	Kuat Tekan Dingin / CCS (kg/cm^2)	> 230
5	Perubahan Linear Permanen (%)	± 0.22 (1300°C)
6	Kandungan Al_2O_3 (%)	≥ 40
7	Kandungan SiO_2 (%)	≤ 55