

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Relevan

Penelitian ini dilakukan oleh Arif Rahman Saleh pada tahun 2017 berfokus untuk mengetahui pengaruh pemanasan awal (preheating) temperatur udara inlet zona oksidasi terhadap unjuk kerja (performa) gasifier tipe *downdraft* yang menggunakan bahan bakar pelet *Municipal Solid Waste* (MSW). Dalam penelitian ini, udara inlet dipanaskan menggunakan pemanas induksi eksternal dengan lima variasi temperatur: 80°C, 110°C, 150°C, 180°C, dan 200°C. Hasil penelitian menunjukkan korelasi positif yang kuat, di mana peningkatan temperatur udara inlet dari 80°C menjadi 200°C berhasil meningkatkan temperatur aktual di zona oksidasi secara signifikan, yaitu dari 818°C menjadi 942°C. Peningkatan temperatur operasi ini berdampak langsung pada perbaikan kualitas *syngas* yang dihasilkan; komposisi gas CO (Karbon Monoksida) naik dari 20,03% menjadi 21,99% dan H<sub>2</sub> (Hidrogen) naik dari 7,79% menjadi 8,87%. Selain itu, efisiensi proses yang diukur sebagai *Cold Gas Efficiency* (CGE) juga meningkat linear sebesar 13,7% (dari 47,37% menjadi 61,07%), sementara kandungan *tar* turun drastis ke level 56,34 mg/m<sup>3</sup>. Penelitian ini menunjukkan melalui eksperimen bahwa suhu oksidasi merupakan faktor utama yang mempengaruhi hasil akhir dari proses mengubah sampah kota menjadi gas. Dengan meningkatkan suhu oksidasi kualitas campuran kimia gas sintetis (seperti karbon monoksida dan hidrogen) langsung meningkat, begitu juga efisiensinya dalam hal energi yang diukur sebagai efisiensi gas dingin. (Rahman Saleh, 2017)

Gianardo Satria Primandanu dan Ary Bachtiar Krishna Putra pada tahun 2022 penelitian ini mengkaji secara mendalam proses konversi biomassa, khususnya tongkol jagung, menjadi gas bahan bakar yang bermanfaat (dikenal sebagai *syngas*). Tujuan utamanya adalah untuk menemukan pengaturan operasi terbaik pada reaktor gasifikasi tipe *downdraft* sebagai bagian dari upaya pengembangan sumber energi baru terbarukan untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Kajian dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu simulasi proses menggunakan perangkat lunak Aspen Plus V10 dan pengujian langsung pada reaktor gasifikasi berskala laboratorium. Variabel penelitian

meliputi tiga variasi temperatur udara masuk pada zona oksidasi, yaitu 30°C, 50°C, dan 75°C, serta lima variasi *equivalence ratio* (ER) masing-masing sebesar 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; dan 0,4. Setiap kondisi operasi diuji untuk mengetahui pengaruhnya terhadap komposisi volumetrik gas sintetik (*syngas*), nilai kalor bawah (*lower heating value* atau LHV), efisiensi energi dingin (*cold gas efficiency*), serta efisiensi eksergi sistem. Hasil penelitian menunjukkan hal yang sangat spesifik jika tujuan dari penelitian adalah untuk menghasilkan kualitas gas terbaik (diukur sebagai *Lower Heating Value* atau LHV), pengaturan optimal yang ditemukan adalah menggunakan rasio udara terendah (ER 0,2) pada temperatur inlet terendah (30°C). Temuan ini konsisten untuk hasil simulasi (5052,65 kJ/kg) dan eksperimen (3736,67 kJ/kg). Hal yang sama berlaku untuk efisiensi eksergi yang mengukur seberapa banyak energi yang benar-benar dapat dimanfaatkan secara efisien nilai tertingginya juga dicapai pada ER 0,2 dan 30°C (Gianardo Satria Primandanu, 2022)

Penelitian yang dilakukan oleh Prayudi Suparmin, Roswati Nurhasanah, Hendri Hendri, dan Muhammad Ridwan pada tahun 2023, studi ini menyoroti potensi pemanfaatan biomassa, khususnya pelet sampah kota (MSW) dan kayu, sebagai solusi energi alternatif untuk mesin diesel *dual-fuel*, dengan menekankan efektivitas metode pemanasan awal menggunakan sinar matahari. Melalui proses penjemuran selama empat hari hingga suhu internal mencapai 60°C, biomassa mengalami penurunan kadar air dan peningkatan nilai kalor yang signifikan sebelum diolah dalam reaktor gasifikasi tipe *downdraft*. Pengujian pada rentang suhu oksidasi 700-900°C dengan *equivalence ratio* 0,22 menunjukkan hasil yang menjanjikan di mana kedua jenis biomassa menghasilkan *syngas* dengan efisiensi konversi karbon yang sangat tinggi, mencapai kisaran 94%. Secara teoretis, temperatur zona oksidasi menjadi faktor krusial dalam kinerja reaktor *downdraft* karena fungsinya dalam menggerakkan kesetimbangan reaksi kimia utama, seperti *Boudouard* dan *Water-Gas*, serta memfasilitasi pemecahan termal (*thermal cracking*) tar menjadi gas bersih. Meskipun peningkatan suhu terbukti menaikkan produksi gas mudah terbakar (CO dan H<sub>2</sub>) serta efisiensi energi, pendekatan berbasis energi (Hukum I Termodinamika) semata dianggap tidak memadai untuk memetakan kualitas energi yang hilang. Oleh sebab itu, penerapan analisis eksergi (Hukum II Termodinamika) menjadi sangat vital untuk mengevaluasi dampak *irreversibilitas* dan

generasi entropi, yang berpotensi menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan meskipun produksi gas meningkat. (Suparmin et al., 2023)

Penelitian yang dilakukan Kapil Dev Sharma dan Siddharth Jain pada tahun 2025 ini mengkaji penilaian kinerja gasifier tipe *downdraft* yang dimodifikasi menggunakan pelet *Refuge-Derived Fuel* (RDF) dari *Municipal Solid Waste* (MSW). Penelitian ini berfokus pada pengaruh variasi *Equivalence Ratio* (ER), *Air Ratio* (AR), dan *Preheated Air Temperature* (PAT) atau temperatur udara pra-pemanasan. Para peneliti pertama-tama menentukan kondisi operasi optimal tanpa pemanasan, dan menemukan ER optimal pada 0.4 dan AR optimal pada 0.66. Selanjutnya, mereka menguji pengaruh PAT pada rentang 100°C hingga 210°C. Hasilnya membuktikan bahwa pemanasan awal udara (preheating) secara signifikan meningkatkan temperatur di zona oksidasi, yang tercatat mencapai 1034-1165°C pada PAT 210°C. Peningkatan temperatur operasi ini berdampak langsung pada perbaikan substansial kualitas *syngas*; dibandingkan dengan tanpa pemanasan, komposisi gas mudah terbakar meningkat drastis: CO (Karbon Monoksida) naik dari 17,3% menjadi 26,2% , dan H<sub>2</sub> (Hidrogen) naik dari 14,6% menjadi 22,2%. Peningkatan kualitas ini juga tercermin pada Nilai Kalor Bawah (LHV) *syngas* yang meningkat dari 4600 kJ/kg menjadi 6053 kJ/kg, serta peningkatan *Carbon Conversion Efficiency* (CCE) dari 85% menjadi 93%. Peningkatan drastis pada komposisi kimia dan nilai kalor *syngas* ini secara langsung mengindikasikan peningkatan nilai eksergi kimia dari gas keluaran. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan data eksperimental yang kokoh untuk menganalisis bagaimana efisiensi eksergi sistem gasifikasi MSW secara keseluruhan sangat bergantung pada pencapaian temperatur oksidasi yang tinggi. (Sharma & Jain, 2025)

Shafwan Amrullah dan Cyrilla Oktaviananda pada tahun 2022 mereka melakukan penelitian spesifik menguji pengaruh peningkatan suhu gasifikasi (pada zona oksidasi) terhadap kinerja reaktor tipe *downdraft* berbahan bakar *Municipal Solid Waste* (MSW). Penelitian ini menggunakan variasi suhu operasi yang luas, yaitu 550, 600, 650, 700, 750, 800, dan 850°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu berdampak positif signifikan terhadap mayoritas parameter. Kualitas *syngas* terbukti membaik seiring kenaikan suhu dari 550°C ke 850°C, di mana kadar CO (Karbon Monoksida) meningkat dari 19,32% menjadi 20,45% dan kadar H<sub>2</sub> (Hidrogen) meningkat dari 12,5% menjadi

15,9%, sementara kadar CO<sub>2</sub> justru menurun. Efisiensi proses, yang diukur sebagai *Cold Gas Efficiency* (CGE), juga menunjukkan peningkatan substansial, yaitu naik dari 77% (pada 550°C) menjadi 97% (pada 850°C). Menariknya, *Carbon Conversion Efficiency* (CCE) menunjukkan titik optimal, yakni meningkat dari 69% (pada 550°C) ke puncaknya 78% (pada 650°C) sebelum akhirnya menurun kembali menjadi 66% pada suhu 850°C. (Amrullah et al., 2022)

## **2.2 Landasan Teori**

### **2.2.1. Biomassa**

Biomassa adalah sebagai sumber energi terbarukan yang berasal dari material padat organik atau senyawa yang mengandung karbon. Biomassa merupakan bahan bakar padat yang dapat dikonversi melalui proses termal (seperti gasifikasi) menjadi gas yang mudah terbakar (*syngas*) untuk menggantikan bahan bakar fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca. (Ridwan et al., 2018a) Dalam konteks penelitian-penelitian ini, cakupan biomassa sangat luas, meliputi limbah perkebunan kelapa sawit seperti tandan kosong (*Empty Fruit Bunches*), cangkang, dan serat, limbah pertanian dan kehutanan seperti tempurung kelapa dan arang kayu akasia, serta limbah padat perkotaan (MSW). (Nur Chairat et al., 2021) MSW digambarkan sebagai limbah perkotaan yang terdiri dari campuran sampah organik (sisa makanan, dedaunan, ranting) dan sampah non-organik (kertas dan plastik).

#### **2.2.1.1 Limbah Padat Perkotaan / MSW**

Transisi energi dari bahan bakar fosil ke energi baru terbarukan menjadi fokus penting di Indonesia, di mana biomassa termasuk *Municipal Solid Waste* (MSW) atau sampah perkotaan memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai sumber energi listrik. MSW menempati porsi signifikan sekitar 32% dari potensi biomassa yang dapat dimanfaatkan, bersanding dengan limbah kelapa sawit dan kayu. Namun, karakteristik MSW sebagai bahan baku gasifikasi memiliki tantangan tersendiri, yaitu densitas dan nilai kalor yang rendah, serta kandungan *moisture* (kadar air) yang tinggi. (Suparmin et al., 2023) Karakteristik kimia

biomassa, seperti rasio oksigen terhadap karbon (O/C) dan hidrogen terhadap karbon (H/C), sangat mempengaruhi nilai kalor semakin tinggi rasio O/C, maka nilai *High Heating Value* (HHV) bahan baku cenderung semakin rendah. Oleh karena itu, perlakuan awal (*pre-treatment*) seperti pengeringan atau pemanasan awal (*preheating*) seringkali diperlukan untuk menurunkan kadar air dan *volatile matter*, meningkatkan karbon tetap (*fixed carbon*), serta menaikkan nilai kalor bahan baku agar proses gasifikasi lebih efisien.(Suparmin et al., 2023)



*Gambar 2. 1 Municipal Solid Waste (MSW)*

Sumber: Dokumentasi pribadi

Temperatur oksidasi merupakan variabel kritis yang mempengaruhi efisiensi gasifikasi, yang sering diukur melalui *Cold Gas Efficiency* (CGE) dan *Carbon Conversion Efficiency* (CCE). Menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur reaktor jumlah bahan baku yang terkonversi menjadi gas akan meningkat yang ditandai dengan kenaikan CGE dan CCE pada biomassa tertentu seperti MSW. Peningkatan temperatur juga berdampak langsung pada nilai kalor syngas (*Lower Heating Value/LHV*); misalnya, LHV syngas dari MSW dapat meningkat seiring kenaikan temperatur dari 700°C ke 900°C akibat penurunan konsentrasi CO<sub>2</sub> dan peningkatan gas mampu bakar.(Suparmin et al., 2023) Selain itu, pemanasan awal pada biomassa MSW misalnya menggunakan energi matahari terbukti dapat meningkatkan karakteristik fisik dan termal bahan baku yang pada akhirnya meningkatkan efisiensi konversi karbon dan nilai kalor gas

yang dihasilkan dibandingkan dengan biomassa tanpa perlakuan awal. Hukum Termodinamika.

#### **1.2.1.2 Heating Value Biomassa Municipal Solid Waste (MSW)**

Nilai kalor dari biomassa *Municipal Solid Waste* (MSW) atau sampah perkotaan sangatlah bervariasi, mencerminkan keberagaman material penyusunnya yang memiliki sifat fisik dan kimia berbeda. Berdasarkan pengujian eksperimental di berbagai lokasi, *pellet* MSW umumnya memiliki kisaran Nilai Kalor Atas (*Higher Heating Value*/HHV) antara 13,84 MJ/kg hingga 18,06 MJ/kg. Meskipun angka ini berada sedikit di bawah biomassa kayu murni seperti *wood pellets* yang dapat mencapai ~19,91 MJ/kg, MSW tetap memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan. (I Nyoman Suprpta Winaya, 2011) Material berbasis sintetis seperti plastik menyumbang nilai kalor tertinggi, mencapai 30,7 MJ/kg, diikuti oleh karet/kulit sebesar 25,45 MJ/kg. Tingginya nilai energi pada material ini disebabkan oleh struktur rantai karbon dan hidrogen yang panjang, serupa dengan bahan bakar fosil yang melepaskan energi besar saat teroksidasi. Sebaliknya, komponen organik basah seperti sisa makanan memiliki nilai kalor terendah yaitu sekitar 2,26 MJ/kg, sementara kertas/karton berada di kisaran 12,4 MJ/kg. Rendahnya nilai energi pada limbah organik ini disebabkan oleh tingginya kandungan air (*moisture*) yang dapat mencapai 84,84% dan oksigen internal secara termodinamika, keberadaan air ini merugikan karena sebagian besar energi panas yang dihasilkan justru terserap kembali untuk menguapkan air tersebut (panas laten) sebelum pembakaran efektif dapat terjadi. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai komposisi MSW lokal sangat krusial untuk memprediksi potensi energi dan memilih teknologi konversi yang tepat. (M. Idris, 2024)

#### **2.2.2. Karakteristik Biomassa**

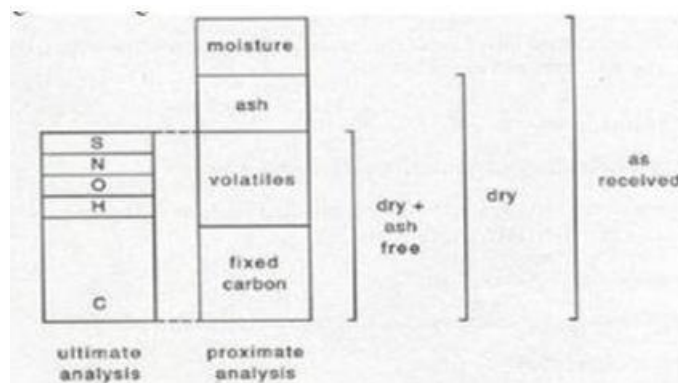
Karakteristik biomassa sebagai bahan bakar alternatif sangat berpengaruh dalam menentukan bagaimana efisien dan efektif proses konversi energi, seperti gasifikasi. Biomassa biasanya berasal dari limbah organik, seperti limbah pertanian, kayu, atau sampah padat kota (MSW), dan memiliki sifat fisika serta kimia yang memengaruhi kinerjanya dalam sistem termokimia. Karakteristik ini mencakup

analisis proksimat dan ultimat. Untuk analisis proksimat, terdapat beberapa komponen seperti kandungan air (moisture), zat terbang (volatile matter), abu (ash), dan karbon tetap (fixed carbon), sedangkan analisis ultimat mencakup kandungan unsur seperti karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), belerang (S), dan klorin (Cl). Kandungan zat terbang serta karbon tetap menjadi indikator penting dalam menunjukkan kemampuan biomassa menghasilkan gas yang dapat dibakar seperti CO, H<sub>2</sub>, dan CH<sub>4</sub> selama proses gasifikasi.

Di samping itu, desain termal dari sebuah sistem yang mempergunakan biomassa, baik sebuah reaktor gasifikasi sangat bergantung pada komposisi biomasanya. Terdapat analisa komposisi dari biomassa ini biasanya digunakan:

a. Analisa proxymate dan ultimate

Kandungan yang dimiliki biomassa mempengaruhi proses gasifikasi yang akan dilalui, dan dari kandungan inilah struktur biomassa tersusun. Untuk mengetahui karakter dan komposisi dari biomassa digunakan metode pemeriksaan secara analitis (proximate analyze) dan pemeriksaan secara kimia (ultimate analyze). Analisa proximate mengidentifikasi kandungan air. (moisture), volatile matter (ketika dipanaskan sampai 950°C), fixed carbon, dan abu yang dimiliki oleh biomassa, sedangkan analisa ultimate menyatakan komposisi dari karbon, hidrogen, nitrogen, belerang, dan oksigen.



Gambar 2. 2 Analisa proximate dan ultimate

Gambar 2.2 menggambarkan elemen-elemen yang terdapat dalam biomassa

dalam analisis secara ultimate dan proximate. Agar mendapatkan unsur yang diperlukan seperti C, S, N, O, dan H, maka kelembaban yang ada dalam biomassa harus dihilangkan terlebih dahulu. Kelembaban yang dihilangkan akan menghasilkan molekul H<sub>2</sub>O. Proses devolatilisasi, yaitu pengeluaran zat volatil dari biomassa, menghasilkan unsur-unsur C, H, dan O, yang kemudian bereaksi dengan karbon tetap dari biomassa dan udara dalam proses gasifikasi untuk membentuk gas sintetik, sementara sisa dari proses tersebut akan membentuk abu. Jika dibandingkan dengan batubara, biomassa memiliki kandungan zat volatil yang lebih tinggi (sekitar 60-80%) serta kandungan karbon tetap yang lebih rendah dan juga kandungan abu yang lebih sedikit, sehingga dapat disimpulkan bahwa biomassa lebih reaktif dibandingkan batubara. Pada proses pembakaran maupun gasifikasi, abu yang dihasilkan dari biomassa juga lebih ramah lingkungan karena kaya akan mineral seperti fosfat dan kalium. Pada suhu operasi maksimum 950 °C atau 1000 °C, abu dari biomassa tidak menyebabkan terbentuknya terak.

### **2.2.3. Gasifikasi**

Gasifikasi adalah sebuah proses teknologi yang mengubah bahan-bahan yang mengandung karbon seperti biomassa, sampah padat perkotaan (MSW), atau batubara menjadi gas bahan bakar yang bermanfaat. Gas yang dihasilkan ini dikenal sebagai "*syngas*" (gas sintesis), yang komponen utamanya sangat berharga sebagai bahan bakar, yaitu Karbon Monoksida (CO) dan Hidrogen (H<sub>2</sub>), serta sedikit Metana (CH<sub>4</sub>). Proses ini membutuhkan suhu yang sangat panas, biasanya di atas 700°C. Perbedaan utama antara gasifikasi dan pembakaran biasa terletak pada cara penggunaan oksigen. Gasifikasi secara khusus hanya menggunakan sedikit sekali media pembakar (seperti udara, oksigen murni, atau uap), seringkali hanya 20-40% dari jumlah yang dibutuhkan untuk membuatnya terbakar sempurna. Tujuannya bukanlah untuk menghancurkan bahan baku demi menghasilkan panas semata, melainkan untuk mengubah bahan baku tersebut menjadi produk gas yang bernilai. Gas ini kemudian dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, termasuk sebagai bahan bakar pembangkit listrik atau sebagai bahan dasar untuk industri kimia.

#### **2.2.4. Tahapan Gasifikasi**

Proses gasifikasi pada prinsipnya memiliki 4 tahapan yaitu proses pengeringan, pyrolysis, oksidasi dan proses reduksi yang semuanya terjadi secara alamiah pada saat proses pembakaran.

##### **2.2.2.1. Proses Pengeringan**

Pengeringan biomassa merupakan langkah awal yang krusial dalam rangkaian proses gasifikasi. Pada fase ini, biomassa dipanaskan dalam kisaran suhu 100–200°C dengan tujuan utama menurunkan kadar airnya. Hal ini sangat penting karena keberadaan air yang berlebih dapat menghambat kelancaran reaksi fisik maupun kimia di tahap selanjutnya. Secara teknis, energi panas bekerja mengubah kandungan air di dalam biomassa menjadi uap yang kemudian dilepaskan. Proses ini murni merupakan perubahan fisik dan belum melibatkan reaksi kimia. Meskipun demikian, tahapan ini memiliki peran vital untuk mempersiapkan bahan baku agar siap memasuki fase pirolisis dan oksidasi, yang pada akhirnya akan meningkatkan efisiensi total dari sistem gasifikasi tersebut.(Djafar & Darise, 2018)

##### **2.2.2.2. Proses Pirolisis**

Setelah bahan bakar kering, temperatur akan terus naik hingga mencapai kisaran 250°C sampai 500°C di sinilah proses pirolisis terjadi. Pada rentang suhu tersebut, biomassa mengalami tekanan panas yang luar biasa. Struktur molekul biomassa yang awalnya besar dan rumit (seperti selulosa dan lignin) tidak mampu bertahan terhadap panas ini, sehingga mereka mulai "retak" atau terurai. Dalam bahasa ilmiah, fenomena ini disebut sebagai *thermal decomposition* atau perengkahan termal. Karena tidak ada oksigen yang memicu api pembakaran, biomassa tidak terbakar menjadi abu, melainkan berubah bentuk.(Djafar & Darise, 2018) Akibat dari pemecahan molekul yang disebabkan oleh suhu tinggi, biomassa akan terpecah dan bertransformasi menjadi tiga wujud zat utama secara bersamaan. Produk pertama yang terbentuk adalah padatan berupa arang atau karbon (*char*), yang memegang peranan vital karena menyimpan cadangan energi panas untuk bahan bakar di tahap selanjutnya. Selain menghasilkan padatan, proses dekomposisi ini juga melepaskan senyawa berbentuk uap tebal mengandung hidrokarbon berat

yang disebut sebagai uap *tar* , serta membebaskan gas-gas ringan yang mudah menguap (*volatile matter*) seperti Metana (CH<sub>4</sub>) dan Hidrogen (H<sub>2</sub>) dari pori-pori biomassa.(Yuda Pratama et al., 2020)

#### 2.2.2.3. Proses Oksidasi

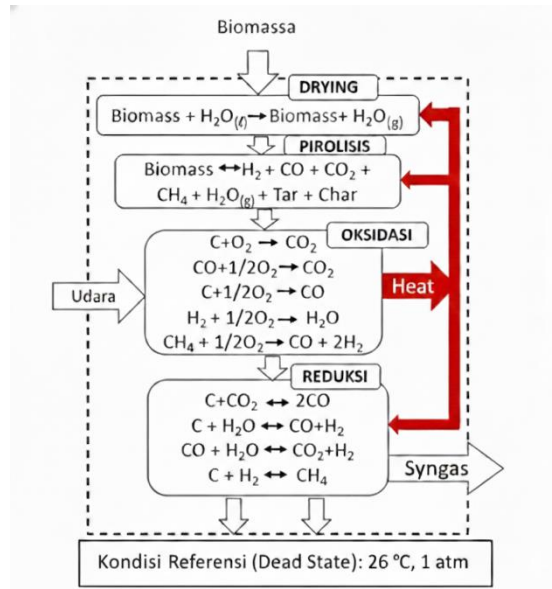
Tahap oksidasi merupakan fase pembakaran yang memegang peranan vital utama dalam reaktor gasifikasi. Pada zona ini, arang (karbon) dan zat-zat volatil yang dihasilkan dari proses pirolisis sebelumnya bertemu dengan pasokan udara yang masuk. Secara kimiawi, reaksi utama yang terjadi pada tahap ini adalah pembakaran karbon menjadi karbon dioksida ( $C + O_2 \rightarrow CO_2 + \text{Panas}$ ), serta pembakaran hidrogen menjadi uap air ( $H_2 + O_2 \rightarrow H_2O + \text{Panas}$ ). Kedua reaksi tersebut dikategorikan sebagai reaksi pembakaran sempurna yang bersifat sangat eksotermik, artinya reaksi ini melepaskan energi kalor dalam jumlah besar secara spontan. Dalam tinjauan stoikiometri, unsur karbon dan hidrogen dari biomassa akan bereaksi aktif mengikat oksigen (O<sub>2</sub>), sedangkan unsur Nitrogen (N<sub>2</sub>) yang terbawa dalam udara pembakaran bersifat inert (tidak bereaksi) dan hanya melewati zona ini, yang menyebabkan temperatur di dalam zona ini melonjak drastis hingga mencapai titik tertinggi dalam keseluruhan sistem, seringkali melebihi 900°C.(Djafar & Darise, 2018)

#### 2.2.2.4. Proses Reduksi

Tahap reduksi merupakan fase puncak dalam proses gasifikasi yang terjadi setelah zona pembakaran, di mana tidak ada lagi oksigen bebas yang tersedia. Berbeda dengan tahap oksidasi yang menghasilkan panas, reaksi di zona ini justru bersifat endotermik atau menyerap energi panas yang dihasilkan dari zona sebelumnya. Di sinilah arang (karbon) bertindak sebagai agen pereduksi yang memasak gas-gas hasil pembakaran menjadi gas bahan bakar bernilai tinggi. Secara kimiawi, karbon akan bereaksi dengan karbon dioksida untuk menghasilkan karbon monoksida melalui reaksi Boudouard ( $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ ). Selain itu, karbon juga bereaksi dengan uap air untuk membentuk karbon monoksida dan hidrogen melalui reaksi *water-gas* ( $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ ). (Suparmin et al., 2023) Kombinasi dari

kedua reaksi penyerapan panas inilah yang pada akhirnya menghasilkan komponen utama *syn-gas* yang menjadi *tar* get dari teknologi gasifikasi.

### 2.2.5. Skema Proses Gasifikasi



Gambar 2. 3 Proses Gasifikasi

Proses konversi termokimia di dalam reaktor gasifikasi berlangsung secara simultan melalui empat zona utama yang saling berinteraksi secara termal, diawali dengan tahap pengeringan (*drying*) untuk menguapkan kadar air biomassa menjadi  $\text{H}_2\text{O}$  dan dilanjutkan dengan tahap pirolisis yang mende komposisi struktur makromolekul biomassa menjadi arang (*char*), tar, serta gas volatil. Kelangsungan reaksi-reaksi endotermik pada tahap awal tersebut didorong oleh distribusi panas (*heat*) yang dihasilkan dari zona oksidasi, di mana terjadi reaksi eksotermik antara karbon dan oksigen yang menghasilkan energi termal substansial sekaligus memicu zona reduksi untuk mentransformasi produk antara menjadi gas sintesis (*syngas*) melalui reaksi utama seperti *Boudouard*  $\text{C} + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}$  dan *water-gas shift*  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ . Analisis performa termodinamika sistem ini secara keseluruhan dievaluasi berdasarkan kondisi referensi (*dead state*) pada temperatur 26 °C dan tekanan 1 atm, yang ditetapkan sebagai titik acuan nol untuk menghitung nilai eksergi dan efisiensi hukum kedua termodinamika, sehingga potensi kerja maksimum dari gas produk dapat ditentukan relatif terhadap lingkungan sekitarnya.

## 2.2.6. Parameter Operasi Gasifikasi

Dalam pengoperasian sistem gasifikasi, kinerja dan kualitas produk gas sangat bergantung pada beberapa parameter kunci. Parameter-parameter krusial tersebut meliputi *Air Fuel Ratio* (AFR), *Equivalence Ratio* (ER), temperatur pada zona oksidasi dan nilai kalor (Heating Value):

### 1.2.5.1 *Air Fuel Ratio* (AFR)

*Air Fuel Ratio* (AFR) didefinisikan sebagai rasio massa udara terhadap massa bahan bakar yang terlibat dalam proses reaksi termokimia. Dalam konteks gasifikasi, parameter ini sangat krusial karena menentukan jumlah oksigen yang tersedia untuk bereaksi dengan karbon dan hidrogen dalam biomassa. Nilai AFR dibedakan menjadi dua jenis utama: AFR aktual ( $AFR_{act}$ ) dan AFR stoikiometri ( $AFR_{stoich}$ ). AFR stoikiometri merepresentasikan jumlah udara teoritis minimum yang diperlukan untuk membakar habis satu satuan massa bahan bakar secara sempurna, sedangkan AFR aktual adalah jumlah udara riil yang disuplai ke dalam reaktor gasifikasi. (Suparmin et al., 2023)

Nilai *Air-Fuel Ratio* (AFR) aktual dapat dihitung menggunakan persamaan berikut: (Suparmin et al., 2023)

$$AFR_{act} = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{biomassa}} \quad (2.1)$$

Keterangan :

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

Sementara itu, nilai AFR stoikiometri (teoritis) dihitung berdasarkan komposisi unsur bahan bakar menggunakan persamaan: (Suparmin et al., 2023)

$$AFR_{stoich} = 0,1153 C + 0,3434(H - 0,125 O) + 0,0434 S \quad (2.2)$$

Keterangan :

- C = Karbon dalam biomassa.
- H = Hidrogen.
- O = Oksigen.
- S = Sulfur.

#### 1.2.5.2 *Equivalence Ratio (ER)*

ER didefinisikan sebagai perbandingan *antar* a suplai udara aktual terhadap kebutuhan udara stoikiometri yang diperlukan untuk membakar habis biomassa<sup>2</sup>. Parameter ini bertindak sebagai pembeda krusial; ketika nilai ER dijaga di bawah 1,0 (kondisi miskin oksigen), proses yang terjadi adalah gasifikasi atau oksidasi parsial, di mana biomassa tidak terbakar habis melainkan terkonversi menjadi gas sintesis (*syngas*) yang kaya energi kimia seperti karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H<sub>2</sub>). (Suparmin et al., 2023) Sebaliknya, jika ER meningkat mendekati atau melebihi 1,0 (kondisi kaya oksigen), reaksi akan bergeser menuju pembakaran sempurna yang menghasilkan panas tinggi namun menurunkan nilai kalor gas karena dominasi produk karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan air. Oleh karena itu, dalam tinjauan teoretis efisiensi pemilihan nilai ER merupakan titik keseimbangan yang kritis ER harus cukup tinggi untuk menghasilkan temperatur yang memadai bagi penguraian termal, namun tetap dibatasi untuk mencegah oksidasi berlebih yang dapat menurunkan efisiensi energi dan eksergi sistem secara keseluruhan. (Tang et al., 2016)

Nilai *Equivalence Ratio* (ER) ditentukan dengan cara membagi hasil perhitungan AFR aktual dengan AFR stoikiometri, seperti rumus berikut: (Suparmin et al., 2023)

$$ER = \frac{AFR_{act}}{AFR_{stoich}} \quad (2.3)$$

### 1.2.5.3 Temperature Oksidasi

Temperatur oksidasi didefinisikan sebagai suhu paling panas yang tercipta di dalam reaktor akibat proses pembakaran bahan bakar. Panas tinggi ini bukan sekadar efek samping, melainkan berperan sebagai "sumber tenaga" utama. Fungsinya adalah menyediakan energi yang cukup agar reaksi-reaksi penting lainnya yang sifatnya menyerap panas (seperti reaksi pembentukan gas) bisa terus berlangsung. Tinggi rendahnya temperatur oksidasi sangat bergantung pada bagaimana kita mengatur operasional mesin, terutama seberapa banyak udara yang disuplai (*Equivalence Ratio*) dan seberapa panas udara yang dimasukkan ke dalam sistem. (Ridwan et al., 2018)

### 1.2.5.4 Nilai kalor (*Heating Value*)

*Higher Heating Value* (HHV) didefinisikan sebagai ukuran total energi termal yang tersimpan dalam bahan bakar, yang berfungsi sebagai acuan teoretis untuk menentukan seberapa besar energi internal yang harus dikorbankan guna mempertahankan reaksi endotermik pirolisis. Sementara itu, *Lower Heating Value* (LHV) memegang peran yang jauh lebih praktis dan krusial sebagai parameter energi efektif (tanpa memperhitungkan panas laten air), yang digunakan secara langsung sebagai basis utama perhitungan efisiensi energi kimia serta menjadi variabel kunci untuk mengestimasi besaran eksergi kimia dari bahan bakar padat dan produk *tar* cair melalui metode korelasi elemen. (Tang et al., 2016)

Penentuan HHV dilakukan dengan mengalikan setiap komponen unsur utama dalam bahan bakar dengan faktor konversinya. Faktor-faktor ini mewakili kandungan energi yang tersimpan dalam unsur-unsur pembentuk bahan bakar tersebut. (Suparmin et al., 2023)

$$HHV = (0,3491 \times C) + (1,1783 \times H) + (0,1005 \times S) - (0,1034 \times O) - \quad (2.4)$$

$$(0,0151 \times N) - (0,0211 \times A)$$

Keterangan:

- C = Karbon
- H = Hidrogen
- S = Sulfur
- O = Oksigen
- N = Nitrogen
- A = Abu

Total energi yang ada dalam *syngas* bisa dihitung dengan melihat kandungan gasnya, lalu dijumlahkan menggunakan rumus *Lower Heating Value* (LHV). (Suparmin et al., 2023)

$$LHV = HHV + h.g \left( \frac{9H}{100} - \frac{M}{100} \right) \quad (2.5)$$

Keterangan:

- *LHV* (*Lower Heating Value*) = Energi yang dapat dimanfaatkan dari bahan bakar setelah mengurangi energi yang hilang dalam bentuk uap air.
- *HHV* (*Higher Heating Value*) = Total energi yang dihasilkan saat pembakaran lengkap, termasuk energi yang hilang dalam bentuk uap air.
- *h.g* = Faktor koreksi yang memperhitungkan pengaruh kandungan hidrogen dan kelembaban dalam bahan bakar.
- *H* = Persentase kandungan hidrogen dalam bahan bakar (%).
- *M* = Persentase kandungan kelembaban dalam bahan bakar (%).

#### 1.2.5.5 *Specific Heat*

*Specific Heat* atau panas spesifik didefinisikan sebagai energi yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu persatuan massa suatu zat sebesar satu derajat, dalam termodinamika ada 2 macam panas spesifik, panas spesifik pada volume konstan

atau *constant volume* ( $C_v$ ) dan panas spesifik pada tekanan konstan atau *constant pressure* ( $C_p$ ). Pada perhitungan eksergi gasifikasi digunakan *specific heat*  $C_p$  yang dapat dilihat pada Tabel 2.1 (Wu et al., 2014)

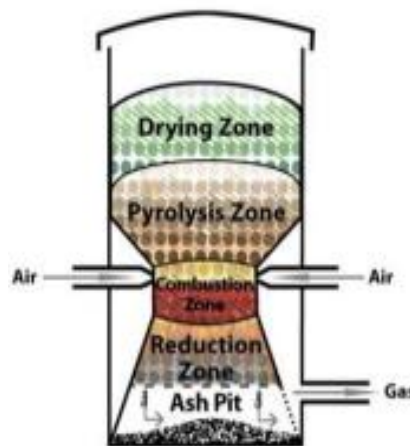
Tabel 2. 1 Kapasitas panas spesifik tekanan konstan ( $C_p$ ) yang terdapat pada setiap komponen

| No | Komponen                      | $c_p (kJ/kmol.K)$                                                                                                                          |
|----|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | N <sub>2</sub>                | $c_p = 39.060 - 521.79 \left(\frac{T}{100}\right)^{-1.5} + 1072.7 \left(\frac{T}{100}\right)^{-2} - 820.4 \left(\frac{T}{100}\right)^{-3}$ |
| 2  | O <sub>2</sub>                | $c_p = 25.48 + 1.52 \times 10^{-2}T - 0.07155 \times 10^{-5}T^2 + 1.312 \times 10^{-9}T^3$                                                 |
| 3  | H <sub>2</sub> O              | $c_p = 32.24 + 0.1672 \times 10^{-2}T + 1.055 \times 10^{-5}T^2 - 3.595 \times 10^{-9}T^3$                                                 |
| 4  | CO                            | $c_p = 28.16 + 0.1672 \times 10^{-2}T + 0.5327 \times 10^{-5}T^2 - 2.222 \times 10^{-9}T^3$                                                |
| 5  | CO <sub>2</sub>               | $c_p = 22.26 + 5.981 \times 10^{-2}T - 3.501 \times 10^{-5}T^2 + 7.469 \times 10^{-9}T^3$                                                  |
| 6  | H <sub>2</sub>                | $c_p = 29.11 - 0.1916 \times 10^{-2}T + 0.4003 \times 10^{-5}T^2 - 0.8704 \times 10^{-9}T^3$                                               |
| 7  | CH <sub>4</sub>               | $c_p = 19.89 + 5.024 \times 10^{-2}T + 1.269 \times 10^{-5}T^2 - 11.01 \times 10^{-9}T^3$                                                  |
| 8  | Char<br>(Arang)               | $c_p = 17.166 + 4.271 \frac{T}{1000} - \frac{8.79 \times 10^5}{T^2}$                                                                       |
| 9  | CaO (Abu)                     | $c_p = 50.75 + 3.86 \times 10^{-3}T$                                                                                                       |
| 10 | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> | $c_p = -36.22 + 0.48475T - 31.75 \times 10^{-5}T^2 + 77.62 \times 10^{-9}T^3$                                                              |

### 2.2.7. Gasifier Tipe *Downdraft*

Gasifier jenis ini merupakan teknologi yang paling banyak digunakan secara komersial (sekitar 75%). Popularitasnya disebabkan oleh desain yang sederhana, kemudahan pengoperasian, serta kemampuannya menghasilkan gas dengan kandungan *tar* yang rendah. (Gianardo Satria Primandanu, 2022) *Gasifier* tipe *downdraft* (juga dikenal sebagai *co-current gasifier*) adalah jenis reaktor gasifikasi di mana bahan baku biomassa dan agen gasifikasi (seperti udara atau oksigen)

mengalir searah, yaitu dari atas ke bawah menuju dasar reaktor. Dalam reaktor *downdraft*, proses konversi biomassa terjadi melalui beberapa tahapan zona yang bergerak ke bawah. Karena aliran udara dan biomassa searah, gas hasil pirolisis (yang mengandung *tar*) dipaksa melewati zona oksidasi yang sangat panas. Hal ini menyebabkan *tar* pecah (*thermal cracking*) menjadi gas yang lebih ringan, sehingga gas keluaran menjadi lebih bersih.(Suparmin et al., 2023)



Gambar 2. 4 Downdraft Gasifier

Sumber: (Suparmin et al., 2023)

Reaktor tipe *downdraft* memiliki keunggulan desain yang signifikan, terutama dalam kemampuannya menghasilkan gas yang lebih bersih dengan kandungan *tar* yang rendah. Keunggulan ini diperoleh karena posisi sumber panas berada di bawah tumpukan bahan bakar, sehingga aliran udara bergerak ke bawah menuju zona gasifikasi. Mekanisme aliran ini memaksa asap hasil pirolisis untuk melewati zona gasifikasi yang bersuhu tinggi, yang mengakibatkan *tar* yang terkandung di dalamnya ikut terbakar sebelum keluar sebagai *syngas*. Selain kualitas gas yang lebih baik, desain ini juga memberikan keuntungan berupa operasional yang berkesinambungan (kontinu), di mana bahan bakar dapat ditambahkan secara terus-menerus melalui bagian atas reaktor tanpa perlu menghentikan proses gasifikasi yang sedang berlangsung di bagian bawah.(Ridwan et al., 2018b)

## 2.2.7 Energi

Energi adalah suatu kuantitas yang mematuhi hukum kekekalan alam, di mana energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan. Berdasarkan hukum pertama termodinamika, aliran energi dianggap berkelanjutan dan selalu mematuhi prinsip konservasi. Dalam analisis energi, terlepas dari bentuknya, semua energi dianggap setara dan hanya kuantitas atau jumlahnya yang diperhitungkan. (Tang et al., 2016)

### 2.2.7.1 Keseimbangan Energi

Untuk menghitung keseimbangan energi pada gasifikasi udara, kita menggunakan persamaan yang berdasar pada Hukum Pertama Termodinamika, sebagaimana dijelaskan dalam rumus: (Martínez González et al., 2019)

$$E_{bio} + E_{air} = E_{syn} + E_{sen} + E_{char} + E_{tar} + E_{loss} \quad (2.6)$$

Mengingat kandungan energi dari udara tergolong sangat kecil, komponen  $E_{air}$  biasanya dapat diabaikan dalam perhitungan. Dengan demikian, nilai  $E_{bio}$  (MJ) dapat ditentukan melalui persamaan berikut: (Abishek et al., 2024; T. Li et al., 2025).

$$E_{bio} = m_{bio} LHV_{bio} \quad (2.7)$$

$E_{syn}$  (MJ), adalah energi syngas hasil gasifikasi biomassa yang dihitung dengan rumus: (T. Li et al., 2025),

$$E_{syn} = V_{gas} LHV_{syn} \quad (2.8)$$

$V_{gas}$  (Nm<sup>3</sup>) dihitung dengan rumus:

$$V_{gas} = n_{gas} \times 22.414 \quad (2.9)$$

$n_{gas}$  (kmol) dihitung dengan rumus:

$$n_{gas} = \frac{n_{C,gas}}{n_{C,per\ kmol\ gas}} \quad (2.10)$$

$$n_{C,gas} = \frac{m_{C,gas}}{12} = \frac{1}{12} m_{bio} C_{mass} \eta_C \quad (2.11)$$

Fraksi karbon dalam biomassa disimbolkan dengan  $C_{mass}$ . Sedangkan untuk melihat efektivitas perubahan karbon tersebut menjadi gas hasil (*syngas*), kita menggunakan parameter  $\eta_c$  efisiensi konversi karbon yang rumusnya adalah: (Buentello-Montoya & Zhang, 2019).

$$n_{C,gas} = \frac{m_{C,gas}}{12} = \frac{1}{12} m_{bio} C_{mass} \eta_c \quad (2.12)$$

Energi sensibel merujuk pada panas yang dikandung oleh gas, arang (*char*), maupun biomassa akibat perbedaan suhunya yang lebih tinggi dibandingkan suhu lingkungan. Untuk menghitung nilai energi tersebut  $E_{sen}$  (MJ) digunakan rumus sebagai berikut: (Martínez González et al., 2019; Yan et al., 2015).

$$E_{sen} = m_{gas} C_{p,mix} (T - T_0) \quad (2.13)$$

Kandungan energi dalam residu padat (*char*) dari hasil gasifikasi atau pirolisis biomassa/MSW didefinisikan sebagai energi *char*. Perhitungannya diperoleh melalui persamaan:

$$E_{char} = E_{char,ch} + E_{char,ph} \quad (2.14)$$

Dimana  $E_{char,chem}$  dihitung dengan rumus:

$$E_{char,ch} = m_{char} LHV_{char} \quad (2.15)$$

$$m_{char} = m_{bio} (1 - \eta_c) C_{mass} \quad (2.16)$$

Dimana  $E_{char,ph}$  dihitung dengan rumus:

$$E_{char,ph} = m_{char} \int_{T_0}^T C_{p,char}(T) dT \quad (2.17)$$

$$E_{char,ph} = m_{char} \left[ 0.92(T - T_0) + \frac{0.0021}{2} (T^2 - T_0^2) \right] \quad (2.18)$$

### 2.2.7.2 Heat Loss

Energi panas yang hilang (*heat loss*) ke lingkungan terjadi melalui mekanisme perpindahan panas (konduksi, konveksi, dan radiasi) pada dinding reaktor maupun peralatan pendukung. Fenomena ini muncul akibat perbedaan temperatur sistem dan lingkungan, serta dikategorikan sebagai energi yang tidak dimanfaatkan dalam produksi *syngas*. Energi panas yang hilang atau *heat loss* dapat dihitung dengan rumus: (Balakheli et al., 2026).

$$E_{loss} = E_{bio} - E_{syn} - E_{sen} - E_{char} \quad (2.19)$$

### 2.2.7.3 Efisiensi Energi

Efisiensi energi merupakan parameter utama untuk mengevaluasi kinerja suatu sistem termal. Analisis ini didasarkan pada Hukum Pertama Termodinamika, yang menyatakan bahwa energi bersifat kekal (konservasi energi). Dalam analisis ini, energi yang masuk ke dalam sistem harus sama dengan energi yang keluar ditambah energi yang hilang, tanpa memandang kualitas energi tersebut. Efisiensi energi didefinisikan sebagai rasio antara energi yang bermanfaat (output) terhadap total energi yang dimasukkan ke dalam sistem (input).

$$\eta_{en} = CGE = \frac{E_{syn}}{E_{bio}} \times 100 \quad (2.20)$$

### 2.2.8 Eksergi

Eksergi merupakan kerja teoritis maksimum yang dapat diperoleh dari suatu sistem atau aliran energi ketika sistem tersebut dibawa ke keadaan kesetimbangan termodinamika dengan lingkungan referensinya, yang sering disebut sebagai *dead state* atau keadaan mati. (Hossein, 2022) Berbeda dengan energi yang bersifat kekal sesuai Hukum Termodinamika I, eksergi merupakan ukuran kualitas energi yang tidak kekal dan dapat dimusnahkan atau mengalami degradasi akibat adanya

*irreversibilitas* (ketidakbalikan) dalam proses nyata, seperti gesekan, perpindahan panas, dan reaksi kimia.(Kurniawan Putra et al., 2020) Konsep ini sangat penting karena memungkinkan identifikasi lokasi, jenis, dan besarnya kerugian termodinamika dalam suatu sistem, yang disebut sebagai pemusnahan eksergi (*exergy destruction*), sehingga memberikan gambaran yang lebih akurat dan realistis mengenai efisiensi sistem dibandingkan analisis energi konvensional. Oleh karena itu, analisis eksergi menjadi parameter yang lebih efektif untuk mengevaluasi kinerja termodinamika dan potensi perbaikan pada sistem konversi energi seperti gasifikasi, karena memperhitungkan ketersediaan (*availability*) energi dari produk untuk pemanfaatan selanjutnya.(Tang et al., 2016)

Nilai eksergi total pada suatu aliran fluida didefinisikan sebagai penjumlahan dari dua komponen utama, yaitu eksergi fisik dan eksergi kimia.

$$e = e_{ph} + e_{ch} \quad (2.21)$$

Keterangan:

- $e_{ph}$  = Eksergi Fisik
- $e_{ch}$  = Eksergi Kimia

#### 2.2.8.1 Eksergi Sensibel

Eksergi sensibel didefinisikan sebagai potensi kerja maksimum yang terkandung dalam suatu zat yang muncul semata-mata karena perbedaan kondisi termodinamikanya—yakni suhu (T) dan tekanan (P) terhadap kondisi lingkungan acuan ( $T_0$ ,  $P_0$ ) (Kurniawan Putra et al., 2020). Berbeda dengan eksergi kimia yang meninjau potensi energi dari reaksi kimia atau perubahan komposisi zat, eksergi sensibel murni berfokus pada aspek termomekanis. Secara sederhana, metrik ini mengukur seberapa besar energi yang tersedia akibat perbedaan tingkat panas atau tekanan fluida dibandingkan dengan kondisi udara luar. Dalam analisis ini, nilai eksergi sensibel dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Tang et al., 2016):

$$e_{sen} = (h - h^0) - T^0(s - s^0) \quad (2.22)$$

Apa bila eksergi fisik aliran gas ideal, maka dihitung menggunakan

persamaan:

$$e_{sen} = \int_{T_0}^T c_p(T') dT' - T_0 \int_{T_0}^T \frac{c_p(T')}{T'} dT' + R T_0 \ln \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (2.23)$$

Jika nilai kapasitas panas spesifik ( $C_p$ ) diasumsikan konstan pada rentang temperatur tertentu, maka pendekatan perhitungan yang digunakan, yaitu:

$$e_{sen} \approx c_p \left( T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) + R T_0 \ln \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (2.24)$$

Keterangan:

- $h$  = entalpi aktual
- $h_0$  = entalpi referensi
- $s$  = entropi aktual
- $s_0$  = entropi referensi
- $T$  = temperatur aktual
- $T_0$  = temperatur referensi
- $P$  = tekanan aktual
- $P_0$  = tekanan referensi
- $c_p$  = kapasitas panas
- $R$  = konstanta gas campuran

### 2.2.8.2 Eksergi Kimia

Eksergi kimia timbul akibat adanya ketidakseimbangan atau perbedaan komposisi kimia *antar* a suatu aliran fluida dengan lingkungan *sekitar* nya. Dalam konteks *syngas*, nilai eksergi kimia ini umumnya signifikan karena keberadaan komponen-komponen penyusun yang memiliki potensi energi tinggi, seperti karbon monoksida (CO), hidrogen (H<sub>2</sub>), dan metana (CH<sub>4</sub>). Persamaan eksergi kimia dijabarkan sebagai berikut. (Tang et al., 2016)

$$e_{ch} = \sum_i y_i e_{ch,i}^0 + R T_0 \sum_i y_i \ln y_i \quad (2.25)$$

Menghitung eksergi kimia gas campuran terdiri dari dua komponen utama. Komponen pertama merepresentasikan akumulasi nilai eksergi kimia standar dari

setiap spesies gas  $\sum_i y_i e_{ch,i}^0$ , pada kondisi standar  $e_{ch,i}^0$  yang nilainya dapat dirujuk dari tabel literatur. Komponen kedua  $RT_0 \sum_i y_i \ln y_i$  berfungsi sebagai faktor koreksi untuk memperhitungkan entropi pencampuran (*mixing term*) dengan asumsi gas ideal. (Tang et al., 2016)

$$e_{ch} = \sum_i (y_i \bar{e}_i) + \bar{R} T_0 \sum_i y_i \ln y_i \quad (2.26)$$

Secara spesifik, variabel  $\bar{e}_i$  didefinisikan sebagai eksergi kimia standar per mol (kJ/mol) untuk spesies ke-i, di mana referensi nilai untuk komponen utama gasifikasi ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ , dan  $N_2$ ) telah tersedia. Adapun  $R$  dalam persamaan tersebut merujuk pada konstanta gas universal. Pada Tabel 2.2 dapat dilihat besar nilai standar pada eksergi kimia tiap komponen gas pada hasil produk gasifikasi, yang mana standar eksergi kimia merupakan nilai standar kerja maksimum pada perbedaan komposisi kimia dari suatu sistem terhadap lingkungan. (Wu et al., 2014)

Tabel 2. 2Nilai spesifik standar eksergi kimia pada komponen gas

| No. | Komponen            | $ex_i^{ch} (kJ/kmol)$ |
|-----|---------------------|-----------------------|
| 1.  | $N_2$               | 720                   |
| 2.  | $O_2$               | 3.970                 |
| 3.  | $H_2O$              | 9.500                 |
| 4.  | $CO$                | 275.100               |
| 5.  | $CO_2$              | 19.870                |
| 6.  | $H_2$               | 236.100               |
| 7.  | $CH_4$              | 831.650               |
| 8.  | $C_2H_2$            | 1.265.800             |
| 9.  | $C_2H_6$            | 1.495.480             |
| 10. | <i>Char</i> (arang) | 410.260               |
| 11. | Abu                 | 110.000               |
| 12. | $C_6H_6$            | 3.303.600             |

### 2.2.7.3 Eksergi Biomassa

Biomassa memiliki *chemical* eksergi dan *physical* eksergi, karena *physical* eksergi pada biomassa relatif kecil maka diabaikan dalam perhitungan, *chemical* eksergi dapat dirumuskan dengan (Tang et al., 2016)

$$Ex_{biomassa} = m_{biomassa} \cdot \beta \cdot LHV_{biomassa} \quad (2.27)$$

$$\beta = \frac{1.0412 + 0.216 \left(\frac{H}{C}\right) - 0.24990 \left(\frac{O}{C}\right) \left[1 + 0.7884 \left(\frac{H}{C}\right)\right] + 0.0450 \left(\frac{N}{C}\right)}{1 - 0.3034 \left(\frac{O}{C}\right)} \quad (2.28)$$

Keterangan:

$LHV_{biomassa}$  = Nilai pembakaran rendah pada biomassa (KJ/Kg)

$\beta$  = Faktor korelasi biomassa

$m_{biomassa}$  = Massa aliran biomassa

### 2.2.7.4 Eksergi Udara

Eksergi agent merupakan eksergi pada udara yang masuk kedalam reaktor melalui distributor, udara yang masuk diasumsikan berupa 79% N<sub>2</sub> dan 21% O<sub>2</sub>, eksergi udara dapat dirumuskan dengan (Wu et al., 2014)

$$Ex_{udara}^{tot} = \sum x_i \left( \int_{T_0}^T c_p dT - T_0 \left( \int_{T_0}^T \frac{c_p}{T} dT \right) \right) + \sum_i x_i (ex_i^{ch} + RT_0 \ln x_i) \quad (2.29)$$

### 2.2.7.5 Eksergi Produk Gas

Eksergi produk gas yang dihasilkan gasifikasi berupa, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, perhitungan eksergi gas dapat dinyatakan dengan rumus:

$$x_{gas}^{tot} = \sum x_i \left( \int_{T_0}^T c_p dT - T_0 \left( \int_{T_0}^T \frac{c_p}{T} dT \right) \right) + \sum_i x_i (ex_i^{ch} + RT_0 \ln x_i) \quad (2.30)$$

#### 2.2.7.6 Eksergi Tar

*Tar* hasil dari gasifikasi diasumsikan dalam bentuk  $C_6H_6$ , total eksergi pada *tar* dapat dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$Ex_{tar(C_6H_6)}^{tot} = \left( \int_{T_o}^T c_p dT - T_o \left( \int_{T_o}^T \frac{c_p}{T} dT \right) \right) + x_i (ex_i^{ch} + RT_o \ln x_i) \quad (2.31)$$

#### 2.2.7.7 Eksergi Arang (*char*)

Eksergi pada arang dihitung berdasarkan eksergi yang dirumuskan dengan:

$$Ex_{char}^{tot} = \left( \int_{T_o}^T c_p dT - T_o \left( \int_{T_o}^T \frac{c_p}{T} dT \right) \right) + x_i (ex_i^{ch} + RT_o \ln x_i) \quad (2.32)$$

#### 2.2.7.8 Eksergi Abu

Eksergi pada abu dihitung berdasarkan eksergi yang dirumuskan dengan:

$$Ex_{abu}^{ch} = \sum_i x_i ex_i^{ch} + \left( RT_o \sum_i x_i \ln x_i \right) \quad (2.33)$$

#### 2.2.7.9 Eksergi Sensibel

Eksergi sensibel adalah komponen eksergi fisik yang muncul akibat adanya perbedaan temperatur antara sistem dengan lingkungan acuannya. Parameter ini merepresentasikan potensi kerja maksimum yang dapat dihasilkan secara reversibel dari energi panas sensibel hingga sistem mencapai titik kesetimbangan termal dengan lingkungan.

$$Ex_{sens} = n_{gas} \int_{T_o}^T c_p(T) \left( 1 - \frac{T_o}{T} \right) dT \quad (2.34)$$

Dengan pendekatan  $C_p$  konstan

$$Ex_{sens} = n_{gas} C_{p,mix} \left[ (T - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right] \quad (2.35)$$

#### 2.2.7.10 Eksergi Heat Loss

*Exergy heat loss* merepresentasikan hilangnya potensi kerja maksimum akibat perpindahan panas dari sistem ke lingkungan. Berdasarkan Hukum Kedua Termodinamika, besarnya kehilangan eksergi ini sangat bergantung pada temperatur saat panas berpindah relatif terhadap suhu lingkungan, yang sekaligus mencerminkan kualitas dari energi panas yang terbuang tersebut.

$$Ex_{heat\ loss} = \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) Q \quad (2.36)$$

#### 2.2.7.11 Dektruksi Eksergi

Analisa kinerja termodinamika sistem gasifikasi memerlukan pendekatan komprehensif yang mengintegrasikan analisis energi dan eksergi. Analisis energi, yang berlandaskan Hukum Termodinamika I, berfokus pada prinsip kekekalan kuantitas energi untuk menghitung efisiensi termal, namun memiliki keterbatasan karena mengabaikan degradasi kualitas energi yang terjadi selama proses. Sebaliknya, analisis eksergi menerapkan Hukum Termodinamika II untuk mengukur kerja teoritis maksimum yang tersedia saat sistem menuju kesetimbangan dengan lingkungan referensinya (*dead state*). Metode ini dianggap lebih unggul karena mampu mengidentifikasi lokasi dan besarnya pemusnahan eksergi (*exergy destruction*) akibat *irreversibilitas* proses nyata, sehingga memberikan gambaran inefisiensi sistem yang lebih realistis dibandingkan analisis energi semata. (Tang et al., 2016)

$$I = (\dot{e}x_{biomassa} + \dot{E}x_{udara}^{total}) - (\dot{E}x_{gas\ product}^{total} + \dot{E}x_{abu}^{tot} + \dot{E}x_{char}^{tot} + \dot{E}x_{C_6H_6}^{total}) \quad (2.37)$$

Dimana  $E_{in}$  meliputi eksergi biomassa, eksergi udara/oksidan/agent, serta eksergi tambahan yang mungkin terlibat. Sementara itu,  $E_{out}$  mencakup eksergi *syngas*, *tar*, *char*, uap air, dan abu ringan. (Tang et al., 2016)

#### 2.2.7.10 Efisiensi Eksergi

Efisiensi eksergi merupakan parameter kunci untuk mengukur efektivitas suatu sistem dalam mengonversi potensi kualitas energi dari input menjadi produk yang bernilai. Nilai efisiensi ini ditentukan dengan membandingkan total eksergi dari produk yang diinginkan seperti nilai kalor dan potensi kerja *syngas* terhadap keseluruhan eksergi yang masuk ke dalam sistem, yang mencakup eksergi kimia dari biomassa serta eksergi fisik dari agen gasifikasi. (Tang et al., 2016)

Secara matematis, efisiensi eksergi total dinyatakan sebagai:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{gas}^{total}}{Ex_{biomassa} + Ex_{udara}} \quad (2.38)$$

Keterangan :

- $e_{gas}^{tot}$  = Total eksergi (kimia + fisik) *syngas*,
- $e_{Biomass}$  = Total eksergi biomassa/solid feed,
- $e_{udara}$  = Total eksergi udara (oksidan) yang masuk ke gasifier.

Penerapan efisiensi eksergi total dianggap sebagai pendekatan yang sangat efektif untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai kinerja sistem dalam mengonversi biomassa menjadi energi yang bernilai guna. Keunggulan utama dari metode ini terletak pada kemampuannya untuk mengevaluasi kualitas energi secara utuh, dengan memperhitungkan kontribusi dari kedua komponen utama yaitu eksergi kimia dan eksergi fisik yang terkandung dalam produk keluaran reaktor gasifikasi. (Tang et al., 2016)

### 2.2.9 Diagram Sankey

Penerapan Diagram Sankey dalam analisis eksergi proses gasifikasi *Municipal Solid Waste* (MSW) bertujuan untuk menyajikan aliran kuantitatif dari potensi kerja (eksergi) yang masuk, ditransformasikan, dan keluar dari sistem reaktor. Dalam diagram ini, lebar aliran merepresentasikan besaran eksergi kimia dan fisika dari bahan baku MSW serta agen gasifikasi yang masuk ke dalam reaktor. Melalui visualisasi ini, perbedaan antara eksergi yang berguna dalam bentuk gas sintesis (*syngas*) dan eksergi yang hilang dapat diidentifikasi secara jelas.