

BAB II

PRATINJAU PUSTAKA

2.1 Penelitian Relevan

Penelitian ini mengacu pada sejumlah studi terdahulu yang relevan dalam bidang gasifikasi biomassa, analisis efisiensi eksergi, dan variasi parameter proses gasifikasi. Analisis komprehensif dari penelitian-penelitian ini berfungsi untuk memvalidasi pendekatan metodologis analisis efisiensi eksergi serta memperjelas kesenjangan penelitian (*research gap*) terkait variasi temperatur oksidasi pada efisiensi eksergi.

1. Energy and Exergy Analyses of Fluidized-Bed Municipal Solid Waste Air Gasification (Yuanjun Tang, Jun Dong, Yong Chi, Zhaozhi Zhou, & Mingjiang Ni, 2016)

Penelitian ini melakukan investigasi eksperimental mengenai gasifikasi udara menggunakan simulasi limbah padat perkotaan (*municipal solid waste*) dalam reaktor *fluidized-bed* dengan tujuan mengoptimalkan sistem gasifikasi. Studi ini berfokus pada pengaruh parameter *Equivalence Ratio* (ER) dan temperatur terhadap kualitas termodinamika melalui analisis energi dan eksergi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan energi dan eksergi dari gas yang diproduksi meningkat seiring kenaikan temperatur hingga mencapai puncak pada 650°C, namun menurun jika temperatur terus dinaikkan. Tren serupa juga teramati pada parameter ER, di mana nilai optimal tercapai pada angka 0,4. Analisis ini juga menemukan bahwa efisiensi maksimum—baik dari sisi energi kimia, energi total, eksergi kimia, maupun eksergi total—tercapai pada kondisi operasi temperatur 650°C dan ER 0,4, dengan nilai efisiensi eksergi total mencapai 51,33%. Peneliti menyarankan bahwa efisiensi eksergi total merupakan parameter yang paling efektif untuk mengevaluasi kinerja sistem termal berbasis gasifikasi karena mampu merepresentasikan ketersediaan energi produk untuk proses konversi selanjutnya (Tang et al., 2016).

2. Exergy sustainability analysis of biomass gasification: a critical review (Hossein Shahbeig, Alireza Shafizadeh, Marc A. Rosen, & Bert F. Sels, 2022).

Mengingat tingginya biaya operasional dan pentingnya manajemen energi termal dalam teknologi gasifikasi biomassa, penggunaan metrik keberlanjutan tingkat lanjut seperti analisis eksergi menjadi sangat penting. Artikel ini menyajikan tinjauan kritis dan analisis numerik mengenai penerapan metode eksergi untuk mengevaluasi kinerja, biaya, dan dampak lingkungan dari sistem gasifikasi. Melalui analisis bibliometrik, penelitian ini mengidentifikasi tren riset serta menyelidiki pengaruh komposisi biomassa, tipe reaktor, dan parameter operasi terhadap efisiensi eksergi. Temuan studi menunjukkan bahwa efisiensi eksergi berkorelasi positif dengan kandungan karbon dan hidrogen dalam biomassa, namun berkorelasi negatif dengan kandungan oksigen, nitrogen, dan abu. Selain itu, penggunaan agen gasifikasi campuran (CO_2 dan uap) serta penggunaan reaktor tipe downdraft fixed-bed terbukti menghasilkan nilai efisiensi eksergi yang paling tinggi dibandingkan konfigurasi lainnya (Shahbeig et al., 2022).

3. Biomass Gasification Modelling Development: A Review (Prayudi Suparmin, Nanik Purwanti, Leopold Oscar Nelwan, and Sutrisno S Mardjan, 2024).

Penelitian ini melakukan evaluasi mendalam terhadap berbagai model matematis yang digunakan untuk mengidentifikasi, mengembangkan, dan mengoptimalkan teknologi gasifikasi biomassa. Model yang dikaji meliputi kesetimbangan termodinamika, kinetika, *Computational Fluid Dynamics* (CFD), dan *Artificial Neural Network* (ANN). Hasil evaluasi menunjukkan bahwa setiap model memiliki keunggulan spesifik untuk tujuan *scale-up* reaktor. Model kesetimbangan termodinamika dapat ditingkatkan performanya melalui pengembangan faktor koreksi konstanta kesetimbangan reaksi, sehingga lebih baik untuk analisis sistem terintegrasi. Sementara itu, model CFD memiliki keunggulan utama dalam kemampuan *scale-up* reaktor untuk menghasilkan *syngas* yang lebih berkualitas, meskipun menghadapi tantangan kompleksitas dalam pemodelan ukuran partikel pada simulasi 3 dimensi. Di sisi lain, meskipun model ANN mampu memberikan prediksi yang sangat baik, efektivitasnya sangat

bergantung pada ketersediaan dan kualitas data input yang digunakan (Suparmin et al., 2024).

4. Design and development of biomass gasifier reactor to produce syngas (Arief Suardi N C, Vendy Antono, Prayudi, & Roswati Nurhasanah, 2021)

Studi ini bertujuan untuk merancang dan memanufaktur reaktor gasifier tipe *updraft* tanpa menggunakan *blower*, di mana aliran udara memanfaatkan daya hisap dari mesin (*engine suction*) sehingga tidak memerlukan daya listrik tambahan untuk operasionalnya. Desain ini sangat sesuai untuk aplikasi pembangkit listrik skala kecil di daerah pedesaan atau terpencil yang tidak terjangkau jaringan listrik utama (*off-grid*). Reaktor dikonstruksi menggunakan material *stainless steel* tipe 304, plat besi, dan semen tahan api. Berdasarkan hasil pengujian, penggunaan biomassa arang tempurung kelapa menunjukkan efisiensi dan performa paling optimal karena struktur materialnya yang padat. Dari segi analisis ekonomi, kombinasi bahan bakar diesel dengan arang Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS/EFB) menghasilkan biaya operasional terendah karena ketersediaan bahan baku yang tidak memerlukan biaya pembelian, serta mampu menghemat konsumsi bahan bakar diesel hingga 50% (Arief et al., 2021).

5. Exergy Analysis of Biomass Gasification Process (Aijun Wang, Xiaotao Zhang, et al., 2013)

Penelitian berjudul “Exergy Analysis of Biomass Gasification Process Based on an Equilibrium RGibbs Reactor Model” membahas analisis eksergi pada proses gasifikasi biomassa menggunakan pendekatan model reaktor kesetimbangan RGibbs. Studi ini mensimulasikan proses gasifikasi tiga jenis biomassa, yaitu pine, straw, dan sawdust, dengan variasi kadar air masing-masing 10%, 20%, dan 30%, serta temperatur agen gasifikasi 25°C dan 250°C. Hasil simulasi menunjukkan bahwa efisiensi eksergi gasifikasi maksimum dan temperatur optimum meningkat seiring dengan kenaikan nilai kalor biomassa dan penurunan kadar air. Pada kadar air 30% dan temperatur agen gasifikasi 25°C, efisiensi eksergi tertinggi diperoleh pada biomassa pine sebesar 71,06%, lebih tinggi dibanding straw (69,87%) dan sawdust (63,15%), dengan temperatur optimum

masing-masing 627°C, 601°C, dan 544°C. Untuk pine dengan kadar air 10%, efisiensi eksergi meningkat hingga 73,73%, sedangkan kenaikan temperatur agen gasifikasi dari 25°C ke 250°C juga meningkatkan efisiensi eksergi masing-masing sebesar 0,87%, 1,09%, dan 0,03% pada pine, straw, dan sawdust. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa jenis biomassa, kadar air, dan temperatur agen gasifikasi memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi eksergi, komposisi gas sintetik, dan nilai kalor gasifikasi, di mana performa gasifikasi dapat ditingkatkan dengan menurunkan kadar air biomassa dan menaikkan temperatur agen gasifikasi. (Aijun Wang et al., 2013)

6. *Energy and exergy analysis of high temperature agent gasification of biomass* (Yueshi Wu, et al., 2014)

Penelitian ini mengembangkan model kesetimbangan kimia untuk memprediksi komposisi gasifikasi biomassa menggunakan media udara dan uap air bersuhu tinggi, serta mengevaluasi efisiensinya melalui analisis Hukum Termodinamika I dan II pada berbagai variasi suhu pemanasan dan rasio uap/biomassa. Hasil studi menunjukkan bahwa kandungan energi kimia *syngas* mencapai titik maksimal pada rasio sebesar 1,83, meskipun peningkatan rasio yang berlebihan dapat menurunkan efisiensi energi dan eksergi secara keseluruhan. Sebaliknya, suhu pemanasan awal yang lebih tinggi terbukti meningkatkan kualitas energi *syngas* serta efisiensi sistem, dengan pencapaian nilai efisiensi energi maksimal sebesar 81,5% dan efisiensi eksergi sebesar 76,2%, yang pada akhirnya digunakan untuk menentukan batas wilayah operasional yang paling layak secara termodinamika.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Biomassa

Biomassa merupakan sumber energi terbarukan yang berasal dari material biologis dan organik, yang menyimpan energi cahaya matahari dalam bentuk energi kimia. Sebagai material biologis, biomassa dapat menyediakan energi secara berkesinambungan atau *sustainable* untuk menggantikan bahan bakar fosil

(Darmawan et al., 2023). Pemanfaatan biomassa untuk pembangkit listrik menjadi solusi strategis dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meminimalisir dampak lingkungan (Nur Chairat et al., 2021). Salah satu jenis biomassa yang potensial dikembangkan adalah tanaman energi seperti kayu Kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) dan Gamal (*Gliricidia sepium*) yang dapat dibudidayakan di lahan kering atau kawasan hutan (Darmawan et al., 2023). Dalam konteks termodinamika, kualitas biomassa sebagai input sangat menentukan besarnya eksergi kimia yang masuk ke dalam sistem gasifikasi. Kandungan karbon dan hidrogen yang tinggi dalam biomassa berkorelasi positif dengan efisiensi eksergi, sedangkan kandungan oksigen dan abu yang tinggi cenderung menurunkan kualitas energi yang dihasilkan (Shahbeig et al., 2022).

2.2.2 Klasifikasi Biomassa

Penyusun sebagian besar dari biomassa, terdiri dari karbohidrat, lemak, dan protein. Adapun senyawa utama daripada biomassa sendiri terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Dimana senyawa-senyawa tersebut merupakan senyawa yang membentuk dinding sel pada tanaman. Secara spesifik, senyawa-senyawa penyusun adalah sebagai berikut:

2.2.2.1 Selulosa

Komponen struktural utama dari dinding sel biomassa adalah selulosa, yang terdiri dari d-glukosa, yang terbuat dari enam karbon atau gula heksosa. Kandungan selulosa pada tiap tanaman bervariasi dengan kisaran 33-90%. Selulosa dapat dirumuskan dengan $C_6H_{10}O_5$, dengan memiliki struktur kristal ribuan unit yang terdiri dari banyak molekul glukosa. Pada kayu kering dengan massa jenis yang padat, kandungan selulosa mencapai 40-44%. Peran selulosa dalam biomassa adalah sebagai penghasil tar selama proses pirolisis. (Susanto, 2018)

2.2.2.2 Hemi-selulosa

Hemi-selulosa merupakan polimer pada biomassa yang terdiri dari senyawa glukosa yang memiliki struktur *amorphous* acak. Pada biomassa persentase hemiselulosa berkisar 15-35%. Selama proses pirolisis penurunan lebih pada kandungan hemiselulosa cenderung cepat jika dibandingkan dengan

selulosa dan lignin yaitu berkisar antara (100-200)°C. (Susanto, 2018)

2.2.2.3 Lignin

Lignin merupakan polimer fenilpropana kompleks yang sangat bercabang dan merupakan bagian integral dari dinding sel sekunder tanaman. Lignin merekatkan serat pada selulosa yang menyatukan sel-sel berdekatan. Pada umumnya, kayu keras mengandung sekitar 19-28% lignin, sedangkan kayu lunak akan mengandung sebanyak 24-33% lignin. Sifat yang dimiliki lignin yaitu tidak mudah larut dan tahan terhadap pengaruh termal, penurunan nilai pada kandungan akan terjadi di akhir proses pirolisis. Penurunan nilai yang terjadi pada lignin akan menghasilkan tar dan senyawa fenolik pada gas yang berbahaya bagi manusia. (Lebo, Stuart E. Jr. *et al*, 2001)

2.2.3 Pelet Kayu Kaliandra

Penggunaan biomassa dalam bentuk aslinya seringkali memiliki kendala berupa densitas energi yang rendah, sehingga proses densifikasi seperti pembuatan pelet kayu diperlukan. Kaliandra merupakan spesies tanaman yang sangat potensial untuk dijadikan bahan baku energi karena pertumbuhannya yang cepat (Suparmin *et al.*, 2023a). Studi komparasi menunjukkan bahwa penggunaan bahan bakar berbasis Kaliandra mampu menghasilkan *output* daya listrik yang lebih tinggi dibandingkan dengan biomassa jenis lain seperti kayu Gamal (Darmawan *et al.*, 2023).

Selain keunggulan teknis, pemanfaatan Kaliandra juga dinilai lebih ekonomis. Biaya produksi listrik menggunakan bahan bakar Kaliandra terbukti lebih rendah dibandingkan dengan penggunaan bahan bakar fosil maupun jenis biomassa lainnya (Darmawan *et al.*, 2023). Dari sisi lingkungan, penggunaan Kaliandra juga menghasilkan emisi CO₂ yang lebih rendah, mendukung upaya transisi energi bersih (Darmawan *et al.*, 2023). Selain itu, penelitian menunjukkan bahwa gasifikasi menggunakan pelet kayu mampu menghasilkan *syngas* dengan kandungan metana (CH₄) dan hidrogen (H₂) yang lebih stabil dibandingkan biomassa yang tidak dipadatkan (Suparmin *et al.*, 2023a). Penggunaan bentuk pelet pada reaktor *downdraft* juga memberikan keuntungan teknis berupa minimalisir masalah penyumbatan aliran bahan bakar dan kestabilan produksi *syngas* (Suparmin *et al.*, 2023).



Gambar 2. 1 Pelet Kayu Kaliandra

2.2.1.2 Nilai Kalor Kayu Kaliandra

Nilai kalor merupakan parameter fundamental yang menentukan jumlah energi termal yang tersimpan dalam biomassa per satuan massa. Terdapat dua jenis nilai kalor, yaitu *Higher Heating Value* (HHV) dan *Lower Heating Value* (LHV), di mana LHV merupakan energi efektif yang dapat dimanfaatkan dalam proses termokimia nyata (Tang et al., 2016). Kualitas nilai kalor ini memiliki korelasi langsung dengan performa pembangkit. Semakin tinggi nilai kalor bahan bakar, semakin besar pula *output* daya yang dapat dihasilkan oleh sistem pembangkit (Darmawan et al., 2023).

Tingginya nilai kalor pada biomassa seperti Kaliandra juga berdampak positif terhadap efisiensi konsumsi bahan bakar. Peningkatan kandungan kalori dalam bahan bakar terbukti dapat menurunkan nilai *Specific Fuel Consumption* (SFC), yang berarti jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk membangkitkan satu satuan listrik menjadi lebih sedikit (Darmawan et al., 2023). Dalam analisis efisiensi gasifikasi, nilai *Low Heating Value* (LHV) biomassa menjadi penyebut utama dalam perhitungan efisiensi gas dingin (*Cold Gas Efficiency*), sehingga biomassa dengan nilai kalor tinggi sangat diharapkan untuk mencapai performa optimal (Gianardo Satria

Primandanu & Ary Bachtiar Krishna Putra, 2022). Selain itu, rasio karbon terhadap oksigen yang tinggi dalam biomassa kayu juga berkontribusi pada tingginya potensi eksergi kimia (Shahbeig et al., 2022).

2.2.2 Gasifikasi

Gasifikasi adalah proses konversi termokimia bahan bakar padat berbasis karbon menjadi gas yang mudah terbakar melalui oksidasi parsial pada temperatur tinggi (Suparmin et al., 2024). Gas produk yang dihasilkan, dikenal sebagai *syngas*, terdiri dari komponen utama berupa karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), metana (CH₄), dan karbon dioksida (CO₂) (Nur Chairat et al., 2021). Proses ini berbeda dengan pembakaran langsung karena suplai udara atau oksigen dibatasi untuk mencegah pembakaran sempurna bahan bakar (Gianardo Satria Primandanu & Ary Bachtiar Krishna Putra, 2022). Secara umum, proses gasifikasi di dalam reaktor melibatkan empat tahapan utama yang terjadi secara berurutan. Konversi biomassa secara *thermochemical* dilakukan dengan tiga metode, yaitu pirolisis, gasifikasi dan pembakaran, metode dibedakan berdasarkan jumlah udara (oksigen) pada saat proses berlangsung. Gasifikasi secara umum didefinisikan sebagai salah satu proses konversi bahan bakar padat menjadi gas mampu bakar (*combustable gases*) berupa karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), metan (CH₄) melalui proses pembakaran dengan suplai udara terbatas antara 20% sampai 40% udara stoikiometri. Reaktor tempat terjadinya proses gasifikasi disebut *gasifier*. Selama proses gasifikasi akan terbentuk daerah proses yang ditentukan dari distribusi suhu dalam reaktor *gasifier*.

Gasifikasi biomassa merupakan peningkatan energi yang terkandung dalam biomassa dengan mengonversikan fase padat menjadi fase gas melalui proses degradasi termal temperatur tinggi di dalam pembakaran yang tidak sempurna, gasifikasi mengkonsumsi panas yang dihasilkan selama pembakaran, proses berlangsung didalam gasifier dengan mereaksikan biomassa bersama oksigen, uap, dan karbon dioksida untuk membentuk gas produk yang dapat terbakar (*combustible gases*), yang mengandung karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂) dan metana (CH₄). Pada data proses reduksi, sulfur dalam biomassa dilepaskan menjadi hidrogen sulfida dan nitrogen biomassa dikonversikan menjadi ammonia. Bentuk tereduksi dari sulfur dan nitrogen ini mudah diisolasi, ditangkap, dan dimanfaatkan, dan dengan demikian

gasifikasi adalah teknologi biomassa bersih dengan kinerja lingkungan yang lebih baik daripada pembakaran biomassa pada umumnya. Gasifikasi adalah proses endotermik. Oleh karena itu panas dibutuhkan untuk menopang proses gasifikasi. Prosesnya bisa berupa auto-termal atau semua-termal tergantung pada bagaimana panas ini disediakan. Dalam kasus gasifikasi auto-termal, panas yang diperlukan dihasilkan secara langsung oleh oksidasi parsial di dalam *gasifier* itu sendiri.

Pada analisis energy dan exergy, temperatur sangat berpengaruh pada efisiensi energi dan exergy. Tabel 2, memberikan deskripsi reaksi utama pada setiap zona gasifikasi beserta interval temperaturnya (Arena, 2012; Watson et al., 2018)

Tabel 2. 1 Reaksi Utama pada Gasifikasi

<i>Gasification Zone</i>	<i>Temperature Range (°C)</i>	<i>Main Reaction</i>	<i>Functional Description</i>
<i>Drying Zone</i>	< 200	$Wet\ biomass \rightarrow Dry\ biomass + H_2O(g)$	<i>Evaporation of free and bound moisture; heat-consuming process</i>
<i>Pyrolysis Zone</i>	250–400	$Biomass \rightarrow Char + Tar + Gas$ (CO, CO ₂ , H ₂ , CH ₄)	<i>Thermal decomposition of lignocellulosic components in the absence of oxygen</i>
<i>Oxidation / Combustion Zone</i>	500–1200	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	<i>Primary exothermic reaction supplying heat to the reactor</i>
		$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	<i>Partial oxidation under oxygen-limited conditions</i>
		$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	<i>Oxidation of hydrogen with heat release</i>
		$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	<i>Oxidation of carbon monoxide</i>
<i>Reduction Zone</i>	400-700	$C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$ (Boudouard reaction)	<i>Endothermic CO formation</i>

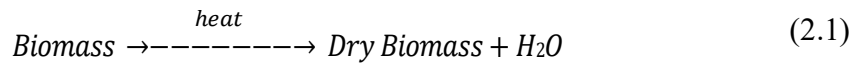
<i>Gasification Zone</i>	<i>Temperature Range (°C)</i>	<i>Main Reaction</i>	<i>Functional Description</i>
		$C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2$ (<i>Steam–char reaction</i>)	<i>Major hydrogen-producing reaction</i>
		$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$ (<i>Water–gas shift</i>)	<i>Controls H₂/CO ratio</i>
		$C + 2H_2 \rightleftharpoons CH_4$ (<i>Methanation</i>)	<i>Methane formation at moderate temperatures</i>
<i>Secondary Reactions</i> (<i>Tar Reforming</i>)	<i>> 700</i>	$C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + (n + m/2)H_2$ $C_nH_m + nCO_2 \rightarrow 2nCO + (m/2)H_2$	<i>Steam reforming of tar compounds</i> <i>Dry reforming of tar</i>

2.2.3 Tahapan Gasifikasi

Proses gasifikasi terbagi menjadi beberapa tahapan yang pembagian tersebut didasari oleh zona temperatur pada *gasifier*.

2.2.3.1 Pengeringan (*Drying*)

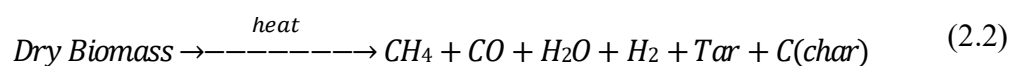
Tahap pengeringan terjadi pada bagian atas reaktor saat biomassa baru masuk dan menerima panas dari zona di bawahnya. Pengeringan merupakan tahapan pertama pada proses gasifikasi, dimana terletak pada bagian atas reaktor, dilakukan untuk mengurangi kadar air (*moisture*) yang terkandung di dalam biomassa, bahkan sebisa mungkin kandungan air tersebut hilang. Temperatur pada zona ini berkisar antara 100-250° C. Semakin tinggi temperatur pada pemanasan, maka semakin cepat proses difusi dari kadar air yang terkandung di dalam biomassa, yang membuat proses pengeringan berlangsung lebih cepat (Trifiananto, 2015). Pada tahap ini, kandungan air dalam biomassa diuapkan pada rentang temperatur hingga 200°C (Shahbeig et al., 2022). Proses ini bersifat endotermik atau membutuhkan suplai panas dari zona oksidasi. Tingginya kadar air dalam biomassa dapat menurunkan temperatur reaktor dan mengurangi kualitas *syngas* yang dihasilkan (Suparmin et al., 2023a).



2.2.3.2 Pirolisis (*pyrolysis*)

Setelah melewati tahap pengeringan, biomassa mengalami dekomposisi termal tanpa kehadiran oksigen yang disebut pirolisis. Pirolisis merupakan dekomposisi termokimia dengan memanaskan batu bara tanpa oksigen, sehingga mengubah batu bara menjadi produk yang bermanfaat seperti karbon aktif. Proses konversi ini diarahkan pada produksi produk yang dapat dikondensasikan seperti benzena, toluena, naftalena, fenol, kreosot, dan pitch. Selama pirolisis, molekul hidrokarbon kompleks pada batu bara terurai menjadi molekul yang lebih kecil seperti gas, cairan, dan arang (Trifiananto, 2015). Zona ini berlangsung pada temperatur 200-500°C. Dalam proses ini, bahan bakar gas terbentuk dalam jumlah yang signifikan dan berkualitas tinggi yang diukur dengan nilai kalor gas dalam satuan termal. Proses ini memecah struktur organik kompleks menjadi arang (*char*), tar, dan gas-gas volatil pada rentang temperatur 350-600°C (Shahbeig et al., 2022). Produk volatil yang dihasilkan pada tahap ini meliputi CO₂, CO, H₂, dan CH₄. Pirolisis memegang peranan penting karena menentukan rasio *char* dan volatil yang akan bereaksi pada zona selanjutnya (Tang et al., 2016).

Reaksi pada pirolisis dapat dinyatakan sebagai berikut :



2.2.3.3 Reduksi (*Reduction*)

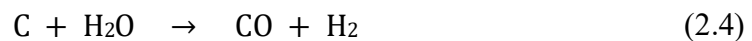
Proses reduksi merupakan zona utama dimana *syngas* didapatkan. Reduksi melibatkan rangkaian reaksi endotermik atau reaksi penyerapan panas yang diperoleh dari panas yang diproduksi, proses ini berlangsung pada temperatur berkisar 600 – 1000 °C, temperatur keluar dari gas yang dihasilkan harus diperhatikan. Pada proses ini, terjadi reaksi kimia dimana arang yang dihasilkan dari proses sebelumnya yang mengandung hidrogen dan oksigen direaksikan dengan air (H₂O) dan karbon dioksida (CO₂), sehingga proses ini dapat menghasilkan *combustible gas* atau gas mampu

bakar seperti karbon monoksida dan hidrogen. Zona reduksi adalah tahap di mana *syngas* yang kaya energi terbentuk. Di zona ini, arang panas bereaksi dengan gas hasil oksidasi melalui serangkaian reaksi endotermik (Shahbeig et al., 2022). Reaksi utama yang terjadi meliputi reaksi *Boudouard* dan reaksi *Water-gas* yang menghasilkan CO dan H₂. Karena sifatnya yang menyerap panas, temperatur gas produk akan menurun saat melewati zona ini, namun kandungan energi kimianya meningkat (Gianardo Satria Primandanu & Ary Bachtiar Krishna Putra, 2022). Proses stoikiometri yang terjadi diantaranya:

Boudouard reaction



Steam-carbon reaction



Water-gas shift reaction



Methanation



2.2.3.4 Oksidasi (*Oxidation*)

Proses oksidasi adalah proses yang menghasilkan panas atau reaksi eksotermik (Shahbeig et al., 2022). Reaksi ini terjadi dengan mengoksidasi kandungan karbon (C) dan hidrogen (H) yang terkandung dalam bahan bakar (Shahbeig et al., 2022). Proses oksidasi ini merupakan proses terpenting yang terjadi di dalam reaktor.

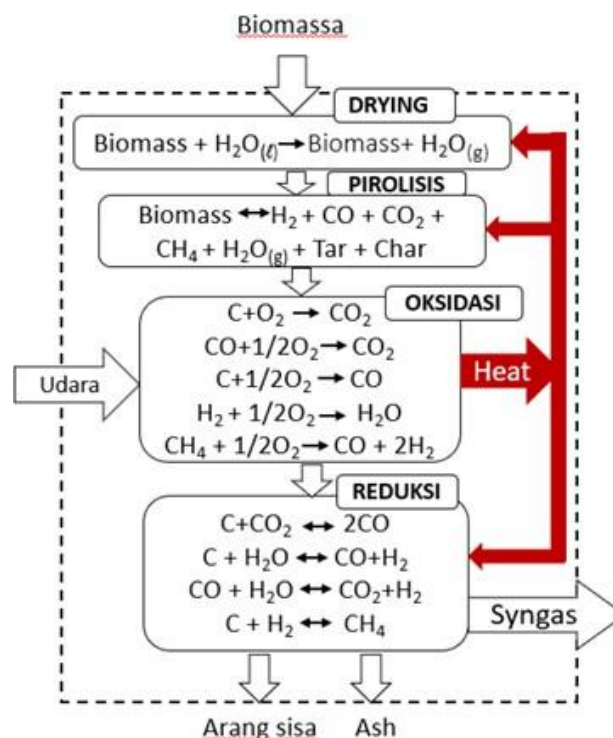
Ini karena proses ini yang menyediakan energi panas yang kemudian akan diterima pada reaksi endotermik di zona reduksi (Suparmin et al., 2024).

Oksidasi pada umumnya terjadi pada temperatur berkisar 700-1500°C, meskipun temperatur optimal yang sering ditemui adalah 800-1200°C (Suparmin et al., 2024). Oksigen yang masuk akan bereaksi dengan bahan yang mudah terbakar di dalam reaktor (Shahbeig et al., 2022). Reaksi ini kemudian menghasilkan produk berupa CO₂ dan H₂O (Shahbeig et al., 2022). Produk gas panas ini akan direduksi ketika kontak dengan arang (*char*) yang sudah terbentuk dalam proses pirolisis di zona reduksi (Gianardo Satria Primandanu & Ary Bachtiar Krishna Putra, 2022).

Temperatur tinggi yang dicapai pada proses ini juga akan memecah substansi tar (*tar cracking*) sehingga kandungan tar yang dihasilkan lebih rendah (Gianardo Satria Primandanu & Ary Bachtiar Krishna Putra, 2022). Terdapat sejumlah produk gas yang dihasilkan dari proses reduksi lanjutan, di antaranya berupa N₂, CO, H₂, CH₄, air, dan gas lainnya (Nur Chairat et al., 2021). Peningkatan temperatur oksidasi yang optimal juga berkontribusi pada peningkatan *cold gas efficiency* dan *exergy efficiency* (Tang et al., 2016). Berikut reaksi stoikiometri yang terjadi pada proses oksidasi (Rinovianto, 2012):



Gambar dibawah ini memperlihatkan alur kerja reaktor gasifikasi tipe downdraft. Pada desain ini, biomassa dan gas sama-sama mengalir ke bawah sehingga semua senyawa volatil hasil pemanasan dipaksa melewati lapisan arang panas. Aliran itu membuat tar banyak terurai, sehingga gas keluaran lebih “bersih”. Udara dimasukkan dari sisi reaktor untuk memicu pembakaran parsial, sedangkan panas yang terbentuk mengalir ke atas dan ke bawah (ditunjukkan panah merah) untuk menyuplai energi ke tahap pengeringan dan pirolisis serta mendorong reaksi pembentukan gas bahan bakar. Produk akhirnya adalah syngas (campuran CO, H₂, sedikit CH₄ dan CO₂) dengan sisa padat berupa arang dan abu di bagian dasar.



Gambar 2. 2 Tahapan Proses Gasifikasi

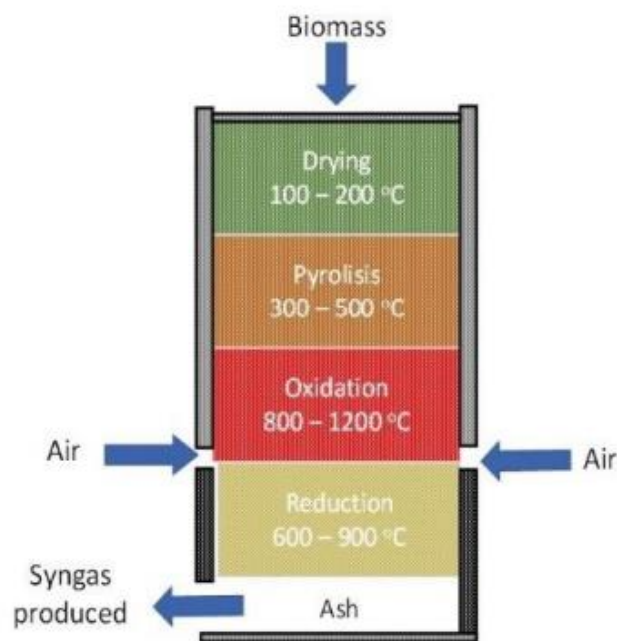
Sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.2, mekanisme kerja gasifier tipe *downdraft* berlangsung melalui empat tahapan sekuensial. Proses diawali di **zona** pengeringan (*drying*), di mana kadar air dalam biomassa diuapkan untuk mengoptimalkan efisiensi termal pada tahap selanjutnya. Material kemudian memasuki zona pirolisis dan mengalami dekomposisi termal tanpa kehadiran oksigen, menghasilkan residu padat (arang), tar, serta senyawa volatil. Produk pirolisis ini selanjutnya mengalir menuju **zona** oksidasi, tempat terjadinya reaksi pembakaran parsial yang bersifat eksotermik. Zona ini

tidak hanya berfungsi menyediakan suplai panas bagi keseluruhan reaktor, tetapi juga memicu perengkahan (*cracking*) tar akibat suhu tinggi. Pada tahap akhir di zona reduksi, gas panas berinteraksi dengan arang pijar melalui reaksi Boudouard, *water-gas*, dan *shift reaction*, yang mengonversi gas menjadi komponen utama *syngas* (CO dan H_2). Keunggulan konfigurasi ini terletak pada aliran volatil yang dipaksa melewati zona oksidasi dan reduksi bersuhu tinggi, sehingga *syngas* yang dihasilkan memiliki kandungan tar yang relatif rendah.

2.2.4 Downdraft Gasifier

Pemilihan jenis reaktor gasifikasi sangat krusial dalam menentukan kualitas *syngas* yang dihasilkan. Gasifier tipe *downdraft* (aliran ke bawah) merupakan teknologi yang paling banyak digunakan secara komersial, mencakup sekitar 75% dari pasar gasifikasi, disusul oleh *fluidized bed* dan *updraft* (Suparmin et al., 2023a). Dalam reaktor tipe *downdraft*, biomassa dan agen gasifikasi (udara) bergerak searah ke bawah (*co-current*). Konfigurasi ini memungkinkan gas hasil pirolisis melewati zona oksidasi bersuhu tinggi, yang secara efektif memecah partikel tar. Oleh karena itu, gasifier *downdraft* dikenal mampu menghasilkan *syngas* dengan kandungan tar yang lebih rendah dibandingkan dengan reaktor tipe *fluidized bed* atau *updraft* (Suparmin., 2024).

Secara operasional, proses di dalam reaktor *downdraft* melibatkan empat zona utama yang berurutan, yaitu pengeringan (*drying*), pirolisis, oksidasi, dan reduksi. Zona oksidasi memegang peranan penting karena suhu di zona ini dapat mencapai kisaran 700°C hingga 900°C atau lebih, yang mempengaruhi komposisi gas CO, CO₂, H₂, dan CH₄ yang dihasilkan (Suparmin., 2023) Stabilitas termal pada zona oksidasi ini sangat diperlukan untuk menjamin konversi karbon yang optimal serta nilai kalor gas yang tinggi. Sumber Gambar: (Suparmin et al., 2024)



Gambar 2. 3 Downdraft Gasifier

2.2.5 Parameter Operasi Gasifikasi

Dalam proses gasifikasi biomassa maupun limbah padat, terdapat sejumlah parameter operasi yang secara langsung memengaruhi kinerja konversi, komposisi gas produk (*syngas*), efisiensi karbon, dan kandungan tar atau residu padat. Empat parameter utama yang umumnya dianalisis adalah rasio ekuivalen (*Equivalence Ratio*, ER), rasio udara-bahan bakar (*Air Fuel Ratio*, AFR), jenis feedstock (bahan baku) dan temperatur oksidasi atau gasifikasi.

2.2.5.1 Kebutuhan Udara Teoritis

Pada proses pembakaran gasifikasi dibutuhkan bahan bakar dan oksigen. Namun untuk menggunakan oksigen murni pada gasifikasi merupakan pilihan yang mahal dan dapat menyebabkan suhu lokal yang tinggi di ruang bakar gasifier, yang berpotensi merusak pipa dan logam pembungkus ketel. Oleh karena itu, udara dipilih sebagai sumber oksigen karena biaya yang lebih rendah dan ketersediaannya yang melimpah. Meskipun udara mengandung sejumlah kecil gas mulia seperti neon dan xenon, secara umum, udara kering dianggap sebagai campuran antara gas nitrogen (N_2) dan oksigen (O_2)

Kandungan oksigen dan nitrogen dalam udara, baik berdasarkan volume maupun berat, sebagai berikut:

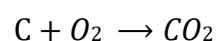
Berdasarkan berat: Oksigen = 23,2%, Nitrogen = 76,8%
Berdasarkan volume: Oksigen = 21%, Nitrogen = 79%

Sumber: (Prohaska et al., 2022)

Analisis pembakaran untuk perhitungan kebutuhan udara teoritis dapat dihitung menggunakan satuan berat gas molekul, yang biasa didapat dari Uji *Ultimate* dan *Proximate*.

Analisa Pembakaran Berdasarkan Berat:

Carbon + Oksigen $\rightarrow$ Karbondioksida



Untuk mendapatkan nilai kebutuhan oksigen teoritis yang sesungguhnya, maka perhitungan oksigen yang telah dihitung menggunakan persamaan reaksi pembakaran, perlu dikurangi dengan kandungan oksigen yang sudah ada dalam bahan bakar. Hal ini dikarenakan ketika menggunakan udara dalam proses pembakaran pada gasifikasi, oksigen yang terkandung dalam bahan bakar sudah berperan dalam reaksi pembakaran. Oleh sebab itu, jumlah udara teoritis yang diperlukan untuk membakar 1 kg bahan bakar dengan sempurna pada ketel gasifikasi adalah

$$\text{Kebutuhan Oksigen teoritis} \times \frac{100}{23,2} \quad (2.10)$$

$$Udara\ Teoritis = \frac{23,2}{100} \times (O_2\ diperlukan\ C + O_2\ diperlukan\ oleh\ H + O_2\ diperlukan\ oleh\ S)$$

Dimana:

C = % Carbon/Kg bahan bakar

H = % Hidrogen/Kg bahan bakar

O = % Oksigen/Kg bahan bakar

S = % Sulfur /Kg bahan bakar

2.2.5.2 Air-Fuel Ratio

Dalam operasional gasifikasi, parameter dasar yang menentukan rezim reaksi termokimia adalah jumlah udara yang disuplai relatif terhadap jumlah bahan bakar yang dikonsumsi. Parameter ini dikenal sebagai *Air Fuel Ratio* (AFR) (Suparmin et al., 2024). AFR didefinisikan sebagai perbandingan antara massa udara aktual yang masuk ke dalam reaktor dengan massa bahan bakar biomassa yang diumpankan.

Secara matematis, AFR_{actual} yang merupakan rasio dari laju alir massa udara $\dot{m}_{udara}$ terhadap laju alir massa biomassa $\dot{m}_{biomassa}$ dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$AFR_{actual} = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{biomassa}} \quad (2.11)$$

Dimana:

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

Laju aliran udara (*air flow rate*) memegang peranan penting karena secara simultan mempengaruhi laju produksi gas dan keseimbangan nitrogen dalam sistem (Suparmin et al., 2023). Untuk mengevaluasi efisiensi penggunaan udara, nilai AFR_{actual} ini harus dibandingkan dengan kebutuhan udara teoritis atau AFR stoikiometri $AFR_{stoichiometri}$. Nilai kebutuhan udara stoikiometri $AFR_{stoichiometri}$ dalam satuan kg udara/kg biomassa dihitung menggunakan persamaan yang merujuk pada analisis ultimat biomassa sebagai berikut (Suparmin et

al., 2023a):

$$AFR_{stoichiometri} = 0.1153C + 0.3434(H - 0.125O) + 0.0434S \quad (2.12)$$

Dimana:

- $AFR_{stoichiometri}$: Jumlah udara stoikiometri yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna ($kg_{udara}/kg_{biomass}$).
- C, H, O, S : Persentase massa unsur Karbon, Hidrogen, Oksigen, dan Sulfur dalam biomassa (%).

2.2.5.3 Equivalence Ratio

Untuk mempermudah analisis kinerja gasifikasi dan membandingkan kondisi operasi yang berbeda, parameter AFR dinormalisasi menjadi bentuk tak berdimensi yang disebut *Equivalence Ratio* (ER) (Suparmin et al., 2023a). ER didefinisikan sebagai rasio antara jumlah udara (oksigen) aktual yang digunakan dalam proses terhadap kebutuhan udara (oksigen) stoikiometri (Suparmin et al., 2023). Nilai ER berfungsi sebagai indikator utama untuk menentukan apakah proses yang terjadi di dalam reaktor adalah pembakaran sempurna ($ER \geq 1$) atau gasifikasi ($ER < 1$). Hubungan matematis untuk menentukan nilai ER dinyatakan dalam persamaan berikut (Suparmin et al., 2023):

$$ER = \frac{AFR_{actual}}{AFR_{stoichiometri}} \quad (2.13)$$

Dimana:

- ER : *Equivalence Ratio*
- AFR_{actual} : Jumlah udara aktual yang disuplai ke dalam proses gasifikasi ($kg_{udara}/kg_{biomass}$).
- $AFR_{stoichiometri}$: Jumlah udara stoikiometri dari perhitungan analisis ultimat ($kg_{udara}/kg_{biomass}$).

2.2.5.4 Nilai Kalor (*Heating Value*)

Nilai kalor *syngas* (LHV gas) merupakan indikator utama kualitas gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi. Nilai ini ditentukan oleh komposisi gas yang mudah terbakar, yaitu karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), dan metana (CH₄). Menurut (Tang et al., 2016), total energi kimia gas produk dihitung berdasarkan penjumlahan fraksi mol komponen gas dikalikan dengan LHV masing-masing komponen. Peningkatan temperatur operasi umumnya meningkatkan kandungan H₂ dan CO, yang secara langsung berdampak pada kenaikan LHV *syngas* hingga titik optimal tertentu (Gianardo Satria Primandanu & Ary Bachtiar Krishna Putra, 2022). Namun, jika temperatur terlalu tinggi melebihi batas optimal, nilai kalor dapat menurun kembali akibat berkurangnya kandungan metana dan hidrokarbon ringan lainnya (Aijun Wang et al., 2013).

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., 2023a).

$$\begin{aligned} HHV = & (0,3491 \times C) + (1,1783 \times H) + \\ & (0,1005 \times S) - (0,1034 \times O) - \\ & (0,0151 \times N) - (0,0211 \times A) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Dimana:

C: Fraksi Mol Karbon

H: Fraksi Mol Hidrogen

S: Fraksi Mol Sulfur

A: Fraksi Mol Abu

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

$$LHV = HHV + h.g \left(\frac{9H}{100} - \frac{M}{100} \right) \quad (2.15)$$

Dimana:

- *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 (%).

2.2.5.5 Temperatur Oksidasi

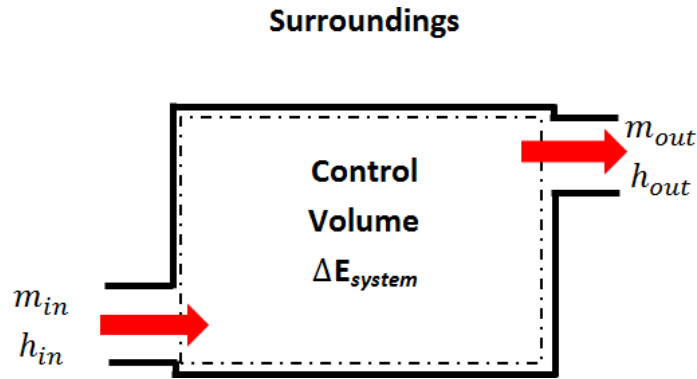
Temperatur pada zona oksidasi merupakan parameter paling berpengaruh terhadap kinetika reaksi dan kesetimbangan termodinamika dalam gasifier. Temperatur yang tinggi mendukung reaksi *steam reforming* dan *water-gas shift*, yang meningkatkan produksi hidrogen dan mengurangi kandungan tar dalam gas (Tang et al., 2016). Variasi temperatur udara inlet secara langsung mempengaruhi profil temperatur zona oksidasi (Gianardo Satria Primandanu & Ary Bachtiar Krishna Putra, 2022). Kenaikan temperatur oksidasi terbukti meningkatkan *Cold Gas Efficiency* dan efisiensi eksergi sistem karena konversi karbon yang lebih lengkap. Akan tetapi, perbedaan temperatur yang terlalu ekstrem antara zona reaksi dapat meningkatkan destruksi eksergi (irreversibilitas) akibat perpindahan panas, sehingga temperatur operasi harus dijaga pada rentang optimal untuk menyeimbangkan antara laju reaksi dan efisiensi termodinamika (Shahbeig et al., 2022). Dalam proses gasifikasi, temperatur oksidasi memegang peran krusial sebagai penggerak utama reaksi kimia di dalam reaktor. Temperatur ini muncul dari reaksi antara biomassa dengan agen (seperti udara atau uap air) yang menghasilkan energi panas untuk mendukung reaksi endotermik lainnya. Dalam perspektif analisis eksergi, temperatur oksidasi bukan sekadar angka panas, melainkan indikator "kualitas" energi. Semakin tinggi temperatur oksidasi, semakin besar potensi energi tersebut untuk diubah menjadi kerja berguna, yang secara langsung akan meningkatkan efisiensi eksergi sistem. Penggunaan agen gasifikasi yang dipanaskan terlebih dahulu (*high-temperature agent*) dapat memicu peningkatan temperatur pada zona oksidasi, yang pada

gilirannya akan memperbaiki komposisi syngas seperti hidrogen (H_2) dan karbon monoksida (CO), sehingga meminimalisir pemusnahan eksergi akibat irreversibilitas reaksi kimia.(Wu et al., 2014) Secara praktis, temperatur oksidasi dapat dimanipulasi atau divariasikan melalui beberapa parameter operasional, seperti mengatur temperatur pemanasan mula agen penggas (*preheating temperature*) atau dengan menyesuaikan rasio udara-bahan bakar (*Equivalence Ratio*). Dengan menaikkan suhu agen gasifikasi, misalnya dari 650 °C hingga 1600 °C, pergeseran efisiensi termodinamika sistem dapat diamati.(Wu et al., 2014a) Namun, terdapat titik keseimbangan atau temperatur optimal di mana efisiensi eksergi mencapai puncaknya. Berdasarkan hasil penelitian pada sistem gasifikasi biomassa suhu tinggi, efisiensi eksergi tertinggi mencapai sekitar 76,2% ditemukan pada temperatur oksidasi yang cukup tinggi di mana semua karbon dalam biomassa telah terkonversi sepenuhnya menjadi gas, yang sering disebut sebagai *Carbon Boundary Point* (Wu et al., 2014).

2.2.6 Hukum I Termodinamika

Hukum pertama termodinamika menyatakan bahwa energi bersifat kekal, energi tidak bisa dimusnahkan maupun diciptakan melainkan dapat diubah bentuk menjadi energi lain. Istilah ini disebut sebagai prinsip konservasi energi. Tiga variabel yang dilibatkan pada hukum pertama termodinamika, yaitu kalor, usaha dan perubahan energi dalam. Perpindahan kalor dan usaha yang masuk ataupun yang keluar dari sistem merupakan proses yang terjadi pada sistem termodinamika. Pernyataan umum dalam hukum pertama termodinamika yaitu, Kenaikan energi dalam pada sistem sebanding dengan jumlah energi panas yang masuk kedalam sistem dikurangi dengan kerja sistem terhadap lingkungan. (Cengel, 2015)

$$E_{in} - E_{out} - E_{loss} = \Delta E_{system} \quad (2.16)$$



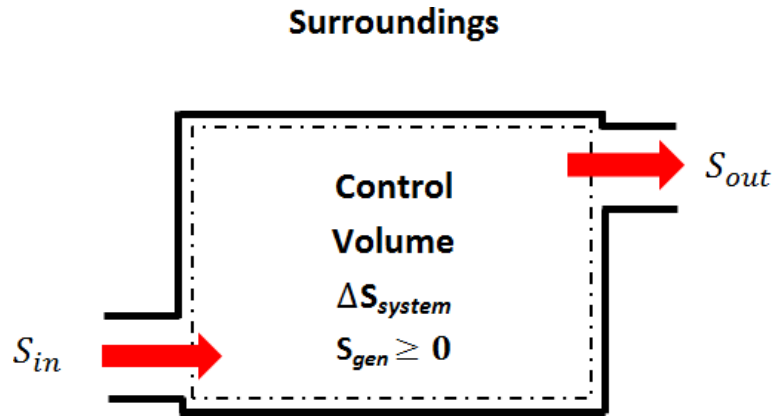
Gambar 2. 4 Kestimbangan Energi pada Control Volume

2.2.7 Hukum II Termodinamika

Hukum kedua termodinamika mengenalkan konsep entropi sebagai properti ekstensif dari suatu sistem termodinamika dan menyatakan bahwa energi hanya berjalan satu arah dan tidak reversibel atau bolak-balik. Energi dapat diartikan sebagai kemampuan suatu sistem dalam melakukan kerja, tetapi entropi yang menentukan seberapa besar kemampuan tersebut terdevaluasi. Entropi dianggap sebagai ukuran keacakan atau ketidakpastian dalam suatu sistem yang menentukan kemungkinan terjadi perubahan dalam sistem. Entropi semesta akan meningkat secara spontan dan akan tetap nilainya pada keadaan setimbang, karena alam semesta adalah sistem yang terisolasi maka, dapat diartikan nilai entropi pada suatu sistem terisolasi akan terus meningkat dan nilai maksimal akan dicapai dalam kesetimbangan. (Cengel, 2015)

Entropi berhubungan dengan besar eksergi yang dihasilkan dalam suatu sistem. Pembangkitan entropi merupakan ukuran besarnya irreversibilitas dan akan selalu ada dalam proses konversi energi. Semakin besar irreversibilitas, maka semakin besar generasi entropi. Semakin tinggi pembangkitan entropi, semakin besar pula jumlah eksergi yang dimusnahkan. Eksergi yang dimusnahkan tidak dapat dikembalikan.

$$S_{in} - S_{out} + S_{gen} = \Delta E_{system} \quad (2.17)$$



Gambar 2. 5 Keseimbangan entropi pada Control Volume

2.2.8 Energi

Analisis energi merupakan metode evaluasi sistem teknik yang berlandaskan pada Hukum Pertama Termodinamika, yaitu prinsip konservasi energi. Inti dari pendekatan ini adalah menelusuri kuantitas energi yang masuk dan keluar dari suatu sistem, baik dalam bentuk energi kimia, panas, maupun kerja mekanis. Namun, analisis energi tidak menyoroti aspek kualitas energi atau kemampuan intrinsiknya untuk melakukan kerja, sehingga fokusnya murni pada neraca kuantitatif (Cengel et al., 2018; Moran et al., 2019). Dalam konteks gasifikasi biomassa dengan udara, persamaan keseimbangan energi dapat diturunkan dari hukum termodinamika pertama (Martínez González et al., 2019; Nivas et al., 2024; Samimi et al., 2020).

$$E_{bio} + E_{air} = E_{syn} + E_{sen} + E_{char} + E_{tar} + E_{loss} \quad (2.17)$$

2.2.8.1 Energi Biomassa

Karena kontribusi energi dari udara relatif kecil, komponen Energi Udara umumnya diabaikan. Sebaliknya, Energi Biomassa menjadi komponen utama yang dihitung dalam satuan MJ (Abishek et al., 2024; T. Li et al., 2025).

$$E_{bio} = m_{bio}LHV_{bio} \quad (2.18)$$

2.2.8.2 Energi Syngas

Energi syngas E_{syn} pada dasarnya adalah energi termokimia yang tersimpan dalam gas hasil proses gasifikasi biomassa. Energi ini muncul dari keberadaan komponen gas yang bersifat mudah terbakar, terutama karbon monoksida (CO), hidrogen (H_2), metana (CH_4), serta hidrokarbon ringan (C_nH_m). Keempat komponen tersebut merupakan tulang punggung nilai kalor syngas dan menentukan sejauh mana syngas dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif (Basu, 2018; Zhang et al., 2015).

Dalam praktik analisis energi, besarnya kandungan energi syngas biasanya dinyatakan dalam bentuk *Lower Heating Value* (LHV) maupun *Higher Heating Value* (HHV). Kedua parameter ini dapat dihitung berdasarkan basis volume (MJ/Nm³) maupun basis massa (MJ/kg), sehingga fleksibel untuk digunakan sesuai kebutuhan analisis sistem energi. LHV lebih relevan untuk aplikasi pembakaran langsung, sedangkan HHV memberikan gambaran total energi termasuk kontribusi kondensasi uap air.

Energi syngas hasil gasifikasi biomassa, E_{syn} (MJ), dihitung dengan formulasi matematis yang menghubungkan komposisi fraksi mol gas hasil gasifikasi dengan nilai kalor masing-masing komponen. Pendekatan ini telah dikembangkan dan divalidasi dalam literatur mutakhir (T. Li et al., 2025), sehingga memberikan dasar kuantitatif yang kuat untuk menilai potensi energi syngas.

$$E_{syn} = V_{gas} LHV_{syn} \quad (2.19)$$

V_{gas} (Nm³) pada persamaan (5) dihitung dengan pendekatan :

$$V_{gas} = n_{gas} \times 22.414 \quad (2.20)$$

n_{gas} (kmol) dihitung dengan pendekatan (Basu, 2018; Turns, 2000):

$$n_{gas} = \frac{n_{C, gas}}{n_{C, per \text{ kmol gas}}} \quad (2.21)$$

$$n_{C,gas} = \frac{m_{C,gas}}{12} = \frac{1}{12} m_{bio} C_{mass} \eta_C \quad (2.22)$$

Fraaksi karbon biomassa C_{mass} menunjukkan proporsi kandungan karbon dalam bahan bakar biomassa. Parameter ini penting karena karbon adalah unsur utama yang berperan dalam pembentukan *syngas*.

Efisiensi konversi karbon η_C menggambarkan tingkat keberhasilan proses gasifikasi dalam mengubah karbon biomassa menjadi komponen gas yang mudah terbakar. Nilai η_C dihitung menggunakan korelasi empiris yang telah dikembangkan dalam literatur (Buentello-Montoya & Zhang, 2019).

$$\eta_C = 0.901 \pm 0.439[1 - \exp(-ER + 0.0003 T)] \quad (2.23)$$

Sedangkan LHV_{syn} (MJ/Nm³) pada persamaan (2.19) dihitung dengan rumus (Suparmin et al., 2023b; Zhang et al., 2019) :

$$LHV_{syn} = 0.12622 \text{ CO} + 0.10788 \text{ H}_2 + 0.35814 \text{ CH}_4 + 0.9163 \text{ C}_n\text{H}_m \quad (2.24)$$

2.2.8.3 Energi *Sensible Heat*

Energi sensibel, atau sering disebut *sensible heat*, merupakan bagian dari energi internal suatu sistem yang berhubungan langsung dengan perubahan temperatur tanpa disertai perubahan fase. Besarnya energi ini dapat diukur melalui perbedaan suhu (ΔT) dan dipengaruhi oleh massa, kapasitas panas spesifik (C_p), serta temperatur sistem (Dincer & Rosen, 2021; Moran et al., 2019). Dalam konteks proses gasifikasi biomassa, energi sensibel merujuk pada energi panas yang dibawa oleh aliran gas hasil (*syngas*), padatan seperti char, maupun biomassa itu sendiri, akibat temperaturnya yang lebih tinggi dibandingkan kondisi lingkungan. Nilai energi sensibel biasanya dihitung menggunakan korelasi empiris yang telah dikembangkan dalam literatur (Martínez González et al., 2019; Yan et al., 2015).

$$E_{sen} = m_{gas} \int_{T_o}^T C_{p,mix} dT \quad (2.25)$$

Ketika kapasitas panas campuran ($C_{p,mix}$) dievaluasi pada temperatur relatif

rendah, yakni di bawah 600 °C, pendekatan yang umum digunakan adalah mengasumsikan kapasitas panas masing-masing komponen gas ($C_{p,i}$, kJ/kg·K) bernilai konstan (Moran et al., 2019). Dengan asumsi tersebut, nilai $C_{p,mix}$ dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$C_{p,mix} = \sum y_i C_{p,i} \quad (2.26)$$

Dengan mengintegrasikan persamaan (2.25), maka E_{sen} (MJ) diberikan oleh:

$$E_{sen} = m_{gas} C_{p,mix} (T - T_0) \quad (2.27)$$

dimana T (K) adalah temperatur gas keluaran, dimana $c_{p,i}$ (kJ/kg.K) masing-masing gas di berikan oleh Tabel (2.2) Kapasitas Panas Spesifik (Cengel et al., 2018; Kotas, 2012; Moran et al., 2019):

Bilamana $C_{p,mix}$ dievaluasi pada temperatur tinggi atas 600°C, maka $C_{p,mix}$ dievaluasi menggunakan korelasi empiris yang diberikan oleh (Cengel et al., 2018):

$$c_{p,i} = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (2.28)$$

2.2.8.4 Kapasitas Panas Spesifik

Specific Heat atau panas spesifik didefinisikan sebagai energi yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu persatuan massa suatu zat sebesar satu derajat. Dimana, $C_{p,i}$ (kJ/kmol.K) diberikan oleh Tabel (Wu et al., 2014).

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

No	Komponen	c_p (kJ/kmol.K)
1	N ₂	$c_p = 39.060 - 521.79 \left(\frac{T}{100}\right)^{-1.5} + 1072.7 \left(\frac{T}{100}\right)^{-2} - 820.4 \left(\frac{T}{100}\right)^{-3}$
2	O ₂	$c_p = 25.48 + 1.52 \times 10^{-2}T - 0.07155 \times 10^{-5}T^2 + 1.312 \times 10^{-9}T^3$
3	H ₂ 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 ₂	$c_p = 22.26 + 5.981 \times 10^{-2}T - 3.501 \times 10^{-5}T^2 + 7.469 \times 10^{-9}T^3$
6	H ₂	$c_p = 29.11 - 0.1916 \times 10^{-2}T + 0.4003 \times 10^{-5}T^2 - 0.8704 \times 10^{-9}T^3$
7	CH ₄	$c_p = 19.89 + 5.024 \times 10^{-2}T + 1.269 \times 10^{-5}T^2 - 11.01 \times 10^{-9}T^3$
8	Char (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 ₆ H ₆ (Tar)	$-36.22 + 0.48475T - 31.75 \times 10^{-5}T^2 + 77.62 \times 10^{-9}T^3$

$c_{p,i}$ untuk setiap gas ideal diberikan oleh tabel (Moran et al., 2019)

Tabel 2. 3 Standar kapasitas panas $C_{p,i}$

Komponen	$c_{p,i}$ (kJ/kmol.K)
CO	29.1
CO ₂	37.1
H ₂	28.8
CH ₄	35.7
N ₂	29.0
O ₂	29.4
H ₂ O (g)	34.0
C ₂ H ₄	43.6
C ₃ H ₈	73.6

2.2.8.5 Energi Char

Energi char merujuk pada energi yang tersimpan di dalam residu padat (char) yang dihasilkan dari proses gasifikasi maupun pirolisis biomassa atau limbah padat perkotaan (MSW). Sumber utama energi ini berasal dari kandungan karbon terikat (*fixed carbon*) yang belum sepenuhnya terkonversi menjadi gas. Secara kuantitatif, energi char biasanya dinyatakan sebagai energi kimia berbasis nilai kalor bawah (LHV) atau nilai kalor atas (HHV). Selain itu, bila char keluar dari reaktor pada temperatur tinggi, energi sensibel yang terkandung di dalamnya juga dapat diperhitungkan (Basu, 2018; Dincer & Rosen, 2021). Perhitungan energi char E_{char} umumnya dilakukan menggunakan persamaan yang telah dirumuskan dalam literatur (Dincer & Rosen, 2021; Turns, 2000).

$$E_{char} = E_{char,ch} + E_{char,ph} \quad (2.28)$$

Dimana $E_{char,chem}$ diberikan oleh (Patel et al., 2017):

$$E_{char,ch} = m_{char}LHV_{char} \quad (2.29)$$

Mengingat char sekitar 75 % berbentuk karbon, maka LHV_{char} (MJ/kg) diambil pendekatan 28.10 MJ/kg, sedangkan m_{char} dihitung dengan korelasi empirik :

$$m_{char} = m_{bio}(1 - \eta_C)C_{mass} \quad (2.30)$$

$E_{char,ph}$ pada persamaan (2.28) dihitung dengan rumus (Karamarkovic & Karamarkovic, 2010a; Phounglamcheik et al., 2022)

$$E_{char,ph} = m_{char} \int_{T_0}^T c_{p,char}(T) dT \quad (2.31)$$

Bilamana, $c_{p,char} = a + bT$, dengan $a=0.92$ dan $b=0.0021$, maka $E_{char,sens}$ diberikan oleh (Phounglamcheik et al., 2022)

$$E_{char,ph} = m_{char} \left[0.92(T - T_0) + \frac{0.0021}{2}(T^2 - T_0^2) \right] \quad (2.32)$$

dimana T adalah temperatur pada zona reduksi.

2.2.8.6 Energi *Heat Loss*

Energi kehilangan panas (heat loss) adalah bagian energi yang terlepas dari sistem termal ke lingkungan akibat adanya perbedaan temperatur antara sistem dan sekitarnya. Energi ini tidak berkontribusi langsung terhadap produk utama yang diinginkan, seperti syngas, melainkan hilang melalui mekanisme perpindahan panas konduksi, konveksi, maupun radiasi dari dinding reaktor, pipa, atau peralatan pendukung (Çengel et al., 2018; Moran et al., 2019). Dalam kasus gasifikasi dengan reaktor tipe downdraft, jumlah tar yang terbentuk sangat kecil sehingga energi tar E_{tar} biasanya diabaikan. Oleh karena itu, energi kehilangan E_{loss} dihitung menggunakan pendekatan neraca energi sebagaimana dijelaskan dalam literatur (Balakheli et al., 2026).

$$E_{loss} = E_{bio} - E_{syn} - E_{sen} - E_{char} \quad (2.33)$$

Energi kehilangan panas E_{loss} dalam kasus ini mencakup dua komponen utama: pertama, panas yang hilang dari reaktor gasifikasi pada setiap zona proses; kedua, panas yang terbuang selama tahap pendinginan gas. Kedua mekanisme ini berkontribusi terhadap total energi yang tidak dapat dimanfaatkan secara langsung dalam pembentukan produk utama (Çengel et al., 2018; Moran et al., 2019).

2.2.8.7 Efisiensi Energi

Efisiensi energi dapat dipahami sebagai ukuran kemampuan suatu sistem dalam mengubah energi masukan menjadi energi keluaran yang benar-benar bermanfaat. Konsep ini menunjukkan seberapa besar proporsi energi input yang berhasil dimanfaatkan, sementara sisanya hilang dalam bentuk kehilangan panas (heat loss), energi sensibel yang tidak termanfaatkan, maupun energi residu seperti char dan tar (Çengel et al., 2018; Moran et al., 2019). Dalam konteks gasifikasi biomassa, efisiensi energi biasanya didefinisikan sebagai rasio antara energi yang terkandung dalam syngas terhadap energi biomassa yang digunakan, sebagaimana dijelaskan dalam literatur (Mukeru et al., 2025; Umar et al., 2021).

$$\eta_{en} = CGE = \frac{E_{syn}}{E_{bio}} \times 100\% \quad (2.34)$$

Sedangkan *Hot Gas Efficiency* diberikan oleh (Martínez González et al., 2019):

$$HGE = \frac{E_{syn} + E_{sens}}{E_{bio}} \quad (2.35)$$

2.2.9 Eksergi

Eksergi merupakan besaran yang menggambarkan kemampuan maksimum suatu sistem untuk melakukan kerja ketika berada dalam kondisi kesetimbangan dengan lingkungan yang disebut sebagai *dead state* ($T_0 = 298.15 \text{ K}$ dan $P_0 = 1 \text{ atm}$). Konsep ini lahir dari Hukum II Termodinamika, sehingga berbeda dengan energi yang bersifat kekal menurut Hukum I. Dalam suatu proses nyata, kerja maksimum tersebut tidak pernah dapat dicapai sepenuhnya akibat adanya irreversibility yang muncul dalam bentuk gesekan, transfer panas pada perbedaan temperatur, keterbatasan kinetika reaksi, maupun ketidaksempurnaan pencampuran. Dalam konteks analisis termodinamika, eksergi mewakili potensi kerja yang dapat diekstraksi dari suatu aliran atau sistem sebelum akhirnya mencapai keadaan referensi ($T_0 = 298.15 \text{ K}$ dan $P_0 = 1 \text{ atm}$) sebagaimana didefinisikan dalam berbagai studi eksergi modern. Dalam gasifikasi biomassa, analisis eksergi sangat penting karena mampu menunjukkan seberapa besar energi biomassa yang benar-benar dimanfaatkan menjadi syngas atau secara keseluruhan, kerja berguna. Eksergi dapat menjadi parameter analisa yang tajam dalam menilai kualitas suatu proses konversi energi. Pendekatan ini digunakan dalam penelitian (Tang., 2016) , (Aijun Wang., 2013) , dan (Shahbeig., 2022)

Secara umum, total eksergi aliran digambarkan sebagai:

$$e = e_{ph} + e_{ch} \quad (2.18)$$

Eksergi total suatu aliran dapat dinyatakan sebagai gabungan antara eksergi fisik dan eksergi kimia.

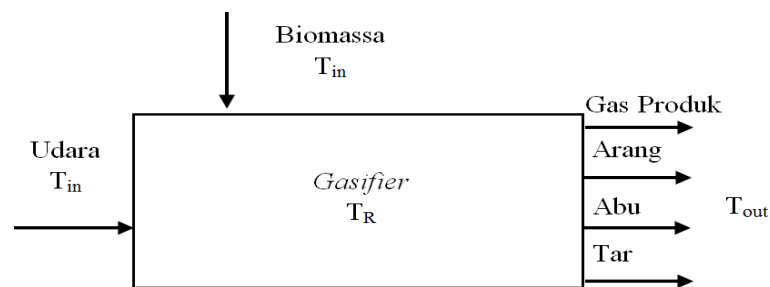
2.2.9.1 Kesetimbangan Eksergi pada proses Gasifikasi

Pada proses gasifikasi biomassa, eksergi menjadi alat analitis yang sangat

penting karena sifatnya yang tidak konservatif. Meskipun energi total terjaga atau kekal sesuai Hukum I Termodinamika, nilai eksergi akan senantiasa menurun sepanjang proses berlangsung akibat adanya kerugian internal seperti destruksi eksergi (*Irreversibility*) maupun kerugian eksternal (*losses*) yang timbul dari panas hilang dan emisi atau selisih eksergi masuk dan keluar. Oleh karena itu, kesetimbangan eksergi (*exergy balance*) selalu dinyatakan sebagai:

$$\sum E_{in} = \sum E_{out} + E_{loss} + I \quad (2.19)$$

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



Gambar 2. 6 Skematik Proses Gasifikasi

Sedangkan proses gasifikasi yang terjadi di dalam *gasifier* dijelaskan dalam Gambar 2.5 dimana udara dan biomassa dengan temperatur masuk sama dengan temperatur lingkungan atau T_{in} dan pada komponen keluar seperti gas produk, arang, abu dengan temperatur T_{out} .

Kesetimbangan eksergi secara keseluruhan dirumuskan sebagai berikut:

$$Ex_{destroyed} = I = Irreversibility \quad (2.20)$$

$$Ex_{biomass} + Ex_{air} = Ex_{syngas} + Ex_{sensible} + Ex_{char} + I$$

2.2.9.2 Eksergi *Sensible*/Fisik

Eksergi *sensible* menggambarkan potensi kerja suatu aliran yang disebabkan oleh perbedaan temperatur dan tekanan relatif terhadap kondisi referensi lingkungan. Dalam teks utama, eksergi *sensible* dihitung menggunakan persamaan (Tang et al., 2016):

$$Ex_{total} = (h_i - h_o) - T_o(s_i - s_o) + x_i(ex_i^{ch} + RT_o \ln x_i) \quad (2.21)$$

Dimana:

$$Ex_{ph} = (h_i - h_o) - T_o(s_i - s_o)$$

$$Ex_{ch} = x_i(ex_i^{ch} + RT_o \ln x_i)$$

Rumus total eksergi pada komponen dengan menggunakan *specific heat* pada eksergi *sensible* adalah sebagai berikut:

$$Ex_{total} = \int_{T_o}^T Cp dT - T_o \left(\int_{T_o}^T \frac{Cp}{T} dT \right) + \sum_i x_i(ex_i^{ch} + RT_o \ln x_i) \quad (2.22)$$

Dimana :

Ex_{ch} = Eksergi kimia spesifik

Ex_{ph} = Eksergi *Physical*

h_i = Nilai entalpi akhir

h_o = Entalpi dalam kesetimbangan awal

s_i = Nilai Entropi akhir

s_o = Entropi dalam kesetimbangan awal

x_i = Fraksi molar pada komponen gas “i” dalam campuran gas

i ex^{ch} = Standar eksergi *Chemical* pada komponen gas

R = Nilai konstanta gas ideal (8,314472 kJ/K.mol.K)

c_p = Panas spesifik tekanan konstan (KJ/Kg.K)

Peningkatan temperatur syngas mempengaruhi kenaikan eksergi fisik secara

signifikan, karena perbedaan kondisi terhadap lingkungan menjadi lebih besar (Shahbeig et al., 2022).

2.2.9.3 Eksergi Kimia

Eksergi kimia muncul karena perbedaan komposisi kimia aliran terhadap lingkungan. Syngas biasanya mengandung komponen dengan nilai eksergi kimia tinggi seperti CO, H₂, dan CH₄. Persamaan eksergi kimia dijabarkan sebagai berikut (Tang et al., 2016):

$$e_{ch} = \sum_i y_i e_{ch,i}^0 + RT_0 \sum_i y_i \ln y_i \quad (2.23)$$

Komponen pertama, $\sum_i y_i e_{ch,i}^0$, adalah penjumlahan *eksergi kimia standar* tiap species pada kondisi standar (nilai $e_{ch,i}^0$ biasanya diperoleh dari tabel atau literatur). Komponen kedua, $RT_0 \sum_i y_i \ln y_i$, adalah istilah koreksi akibat pencampuran (mixing term) untuk gas ideal. Adapun penjabaran yang lebih rinci sebagai berikut (Tang et al., 2016):

$$e_{ch} = \sum_i (y_i \bar{\epsilon}_i) + \bar{R} T_0 \sum_i y_i \ln y_i \quad (2.24)$$

Dimana:

$\bar{\epsilon}_i$ adalah *standard chemical exergy per mole* untuk species i (kJ/mol). Nilai dan cara perolehan/dasar untuk beberapa species utama (CO, H₂, CH₄, CO₂, N₂) dimuat dalam tabel *National Institute of Standards and Technology* (NIST) (Tang et al., 2016). Sedangkan $\bar{R}$ adalah konstanta gas universal dibagi dengan bobot molekul campuran. Untuk menghitung eksergi total dari syngas yang dihasilkan, diperlukan data mengenai eksergi kimia standar dari masing-masing komponen gas. Nilai ini menunjukkan potensi kerja kimia yang terkandung dalam setiap zat berdasarkan komposisi unsur penyusunnya. Berikut adalah tabel referensi eksergi kimia spesifik yang sering dirujuk dalam penelitian gasifikasi suhu tinggi: (Wu et al., 2014)

Tabel 2. 4 Nilai Eksergi Kimia Spesifik pada Komponen Gas

No	Komponen	$ex_i^{ch} (kJ/kmol)$
1.	N ₂	720
2.	O ₂	3.970
3.	H ₂ O	9.500
4.	CO	275.100
5.	CO ₂	19.870
6.	H ₂	236.100
7.	CH ₄	831.650
8.	C ₂ H ₂	1.265.800
9.	C ₂ H ₆	1.495.480
10.	Char (arang)	410.260
11.	Abu	110.000
12.	C ₆ H ₆	3.303.600

2.2.9.4 Dead State

Analisis eksergi selalu membutuhkan titik acuan yang disebut sebagai *dead state* atau keadaan mati. Kondisi ini mendefinisikan suatu keadaan di mana sistem berada dalam kesetimbangan termodinamika sempurna dengan lingkungan sekitarnya, sehingga sistem tersebut tidak lagi memiliki kemampuan untuk menghasilkan kerja (eksnerginya bernilai nol). Dalam perhitungan teknis, *dead state* biasanya merujuk pada temperatur standar sebesar 298,15 K dan tekanan standar sebesar 101,325 kPa. Penentuan *dead state* sangat penting karena eksergi pada dasarnya adalah ukuran jarak atau perbedaan potensial antara kondisi sistem saat ini dengan kondisi lingkungannya; tanpa *dead state* yang jelas, kualitas energi dari suatu proses gasifikasi tidak dapat diukur secara akurat (Tang et al., 2016).

2.2.8.6 Eksergi Biomassa

Biomassa sebagai eksergi input, memiliki eksergi kimia maupun eksergi fisik, namun, eksergi fisik pada biomassa relatif kecil, maka pada perhitungan eksergi fisik biomassa, diabaikan. Eksergi kimia daripada biomassa dapat dirumuskan sebagai

berikut (Tang et al., 2016).:

$$Ex_{biomassa} = m_{biomassa} \cdot \beta \cdot LHV_{biomassa} \quad (2.25)$$

$$\beta = \frac{1.0412 + 0.216 \left(\frac{H}{C}\right) - 0.24990 \left(\frac{O}{C}\right) \left[1 + 0.7884 \left(\frac{H}{C}\right)\right] + 0.0450 \left(\frac{N}{C}\right)}{1 - 0.3034 \left(\frac{O}{C}\right)} \quad (2.26)$$

Keterangan:

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

β = Faktor korelasi biomassa

$m_{biomassa}$ = Laju aliran biomassa (kg/s)

2.2.8.7 Eksergi *Agent*

Eksergi *agent*, merupakan eksergi yang terdapat pada udara yang dipasok kedalam reaktor melalui diatributor. Komposisi udara yang masuk, diasumsikan dengan 21% O₂ dan 79% N₂, nilai eksergi pada udara, dapat dirumuskan sebagai berikut: (Wu et al., 2014b):

$$Ex_{udara}^{tot} = \sum x_i \left(\int_{T_o}^T c_p dT - T_o \left(\int_{T_o}^T \frac{c_p}{T} dT \right) \right) + \sum_i x_i (ex_i^{ch} + RT_o \ln x_i) \quad (2.27)$$

2.2.8.8 Eksergi pada *Syngas* atau gas produk

Eksergi *output* yang dihasilkan dari *input* bahan bakar biomassa, dan *agent* udara dari proses gasifikasi pada reaktor berupa, H₂, N₂, CH₄, CO, CO₂, nilai eksergi daripada produk gas dihasilkan, dapat dirumuskan dengan:

$$x_{gas}^{tot} = \sum x_i \left(\int_{T_o}^T c_p dT - T_o \left(\int_{T_o}^T \frac{c_p}{T} dT \right) \right) + \sum_i x_i (ex_i^{ch} + RT_o \ln x_i) \quad (2.28)$$

2.2.8.9 Eksergi pada Arang (Char)

Eksergi pada Arang, hasil gasifikasi dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$Ex_{char}^{tot} = \left(\int_{T_o}^T c_p dT - T_o \left(\int_{T_o}^T \frac{c_p}{T} dT \right) \right) + x_i (ex_i^{ch} + RT_o \ln x_i) \quad (2.29)$$

2.2.9 Efisiensi Eksergi

Efisiensi eksergi merupakan parameter yang digunakan untuk menilai sejauh mana suatu proses gasifikasi mampu mempertahankan potensi kerja yang terkandung dalam biomassa menjadi produk-produk energi pada keluaran reaktor. Tidak seperti efisiensi energi konvensional yang hanya membandingkan besarnya energi masuk dan keluar, efisiensi eksergi memperhitungkan sejauh mana energi tersebut dapat dikonversi menjadi kerja berguna.

Efisiensi eksergi didefinisikan sebagai perbandingan antara total eksergi produk yang dihasilkan pada keluaran reaktor terhadap total eksergi masukan yang berasal dari biomassa dan agen gasifikasi (Tang et al., 2016). Total eksergi produk mencakup gabungan antara eksergi kimia dan eksergi fisik dari gas hasil gasifikasi, tar, abu ringan (*fly ash*), maupun uap air pada kondisi keluaran.

Secara matematis, efisiensi eksergi total dinyatakan sebagai:

$$\eta_{ex} = \frac{e_{gas}^{tot} + e_{tar}^{tot} + e_{fa}^{tot} + e_{water}^{tot}}{e_{Biomass} + e_{agent}} \quad (2.32)$$

Dimana:

- e_{gas}^{tot} : total eksergi (kimia + fisik) syngas,
- e_{tar}^{tot} : total eksergi tar,
- e_{fa}^{tot} : total eksergi fly ash,
- e_{water}^{tot} : total eksergi uap air pada keluaran,
- $e_{Biomass}$: eksergi biomassa,
- e_{agent} : eksergi udara (oksidan) yang masuk ke gasifier.

2.2.10 Destruksi Eksergi

Destruksi eksergi terjadi karena adanya proses-proses yang tidak reversibel (irreversibel) di dalam reaktor gasifikasi. Penyebab utama irreversibilitas ini meliputi reaksi kimia spontan (seperti oksidasi dan reduksi), perpindahan panas pada perbedaan temperatur yang besar, serta pencampuran aliran fluida. Putra dan Pariaman (2020) menjelaskan bahwa analisis eksergi mampu mengidentifikasi lokasi,

jenis, dan besarnya kerugian termal ini. Besarnya irreversibilitas dalam sistem gasifikasi sangat dipengaruhi oleh parameter operasional yang diterapkan. Primandanu dan Putra (2022) dalam studi eksperimentalnya menemukan bahwa peningkatan *Equivalence Ratio* (ER) dan temperatur udara inlet dapat memperbesar laju irreversibilitas sistem. Hal ini disebabkan oleh semakin banyaknya media udara yang masuk dan perubahan intensitas reaksi pembakaran, yang mengakibatkan peningkatan entropi dan penurunan efisiensi eksergi sistem secara keseluruhan. Pada kasus ini Ex_{dest} dihitung dengan pendekatan kesetimbangan exergy yang diberikan oleh (Buentello-Montoya & Zhang, 2019):

$$Ex_{dest} = Ex_{bio} - Ex_{syn} - Ex_{sen} - Ex_{char} - Ex_{heat} \quad (2.33)$$

2.2.11 Sankey Diagram

Diagram Sankey merupakan representasi visual aliran energi atau eksergi dalam suatu sistem yang menggambarkan hubungan antara energi masuk, energi keluar, distribusi energi antar komponen, serta energi yang hilang selama proses konversi, dengan ketebalan aliran yang proporsional terhadap besarnya nilai energi atau eksergi yang mengalir masuk (Schmidt, 2008). Ketika dikombinasikan dengan analisis eksergi, Sankey Diagram dapat menggambarkan kuantitas energi, kualitas energi dan potensi kerja yang hilang akibat proses irreversibel (Gonzalez Hernandez et al., 2018). Dalam sistem konversi energi gasifikasi biomassa, Diagram Sankey digunakan untuk memvisualisasikan distribusi energi dari biomassa menuju produk gas (syngas), char, tar, abu, dan *losses* termal, yang dapat menjadi dasar analisis efisiensi, destruksi eksergi, dan penentuan kondisi operasi optimal.