

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomassa sebagai Energi Terbarukan

Biomassa merupakan sumber energi terbarukan yang berasal dari material organik seperti limbah pertanian, residu kehutanan, limbah agroindustri, serta tanaman energi yang dapat diperbaharui secara alami melalui proses biologis. Secara umum, biomassa tersusun atas komponen lignoselulosa berupa hemiselulosa, selulosa, dan lignin dengan kandungan unsur utama karbon (C), hidrogen (H), dan oksigen (O) yang berperan dalam menentukan potensi energi yang dapat dihasilkan dari biomassa tersebut (Bi et al., 2020; Mularski and Li, 2023; Sikarwar et al., 2016; Syrodoy et al., 2021; Wang et al., 2025). Berbagai jenis biomassa yang banyak tersedia antara lain biomassa kayu (*wood biomass*), residu pertanian seperti jerami dan sekam, limbah agroindustri seperti ampas tebu dan kulit kopi, serta biomassa non-kayu seperti rumput energi dan mikroalga (Guo and Wang, 2023; Manrique et al., 2019; Nazos et al., 2022; Pecate et al., 2019; Rodriguez and Gordillo, 2011; Sonjaya et al., 2025). Perbedaan jenis biomassa ini menyebabkan variasi karakteristik fisik dan kimia, seperti komposisi air, kandungan abu, komposisi volatil, serta kandungan karbon tetap yang secara langsung memengaruhi performa energi dan efisiensi konversi (Alyson et al., 2018). Biomassa dengan kandungan lignin yang tinggi cenderung memiliki nilai kalor yang lebih besar dibandingkan biomassa dengan kandungan hemiselulosa yang dominan, sementara komposisi air dan abu yang tinggi dapat menurunkan kualitas bahan bakar (Nazos et al., 2022).

Karakteristik biomassa sebagai bahan bakar umumnya dianalisis melalui pendekatan *proximate* dan *ultimate analysis*. Analisis *proximate* meliputi kandungan *moisture*, *volatile matter*, *fixed carbon*, dan *ash* yang berperan penting dalam menentukan sifat pembakaran dan reaktivitas biomassa (Nazos et al., 2022; Wang et al., 2025). Biomassa mentah umumnya memiliki kandungan *volatile matter* yang tinggi serta *fixed carbon* yang relatif rendah, sehingga menghasilkan reaktivitas tinggi namun nilai kalor yang masih terbatas. Sementara itu, analisis *ultimate* yang mencakup komposisi unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O),

dan nitrogen (N) menunjukkan bahwa biomassa memiliki kandungan oksigen yang tinggi dibandingkan bahan bakar fosil, yang menyebabkan nilai kalor lebih rendah (Jaganathan et al., 2017; Lan et al., 2019; Mularski and Li, 2023; Nazos et al., 2022; Wang et al., 2025). Beberapa karakteristik biomassa berdasarkan analisis *proximate* dan *ultimate* ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Karakteristik Biomassa Berdasarkan Analisis *Proximate* dan *Ultimate*
(Sumber: Nazos et al., 2022)

Biomass	Raw/ Torrefied	Temperature (°C)	Time (min)	Proximate Analysis (wt.%)				Ultimate Analysis (wt.%)			
				Moisture	Volatile Matter	Fixed Carbon	Ash	C	H	O	N
Rice straw	Raw	-	-	-	76.56	14.02	9.48	39.61	5.83	43.80	1.21
	Torrefied	300	-	-	52.00	32.70	15.31	49.90	4.61	28.43	1.77
Rice husk	Raw	-	-	-	70.41	15.79	13.80	38.62	5.67	41.38	0.48
	Torrefied	300	-	-	51.42	28.91	19.68	46.43	4.60	28.91	0.58
Coffee husk	Raw	-	-	2.7	77.7	17.9	1.7	48.5	5.9	40.6	2.8
	Torrefied	300	60	1.4	63.5	31.8	3.3	61.2	4.8	15.3	3.5
Spent coffee grounds	Raw	-	-	3.3	81.2	14.6	0.9	50	6.7	39	2.3
	Torrefied	300	60	1.2	67.8	29	2	69.5	6	19	3.2
Wheat straw	Raw	-	-	7.33	65.43	16.20	11.04	49.3	5.18	44.66	0.80
	Torrefied	500 °C/ min	-	2.50	58.57	23.90	14.90	53.90	4.90	40.82	0.67
Groundnut stalks	Raw	-	-	3.78	74.83	16.70	4.69	34.52	9.80	51.50	1.16
	Torrefied	500 °C/ min	-	2.0	70.86	19.68	21.59	41.20	8.70	47.70	1.19
Rice husk	Raw	-	-	7.44	56.13	20.45	15.98	42.39	5.77	50.10	1.17
	Torrefied	300	-	4.63	14.13	38.09	43.15	70.84	3.07	24.49	1.55
Miscanthus	Raw	-	-	9.2	83.9	3.9	2.9	46.2	3.9	45	0.8
	Torrefied	300	-	4.8	56	25.4	6	50.6	4.2	34.5	4.2
Hops (<i>Humulus lupulus</i>)	Raw	-	-	11.8	82.9	1.9	3.3	42.3	4.8	36.8	2.4
	Torrefied	300	-	9.8	66.7	14.4	8.9	46.3	4.1	22.6	2.8
Mixed waste wood	Raw	-	-	8.9	78.4	9.5	3.1	46.5	5.5	44.3	0.4
	Torrefied	300	-	4.7	65.3	23.1	6.8	57.8	2.2	32.3	0.6
Oak waste wood	Raw	-	-	7.9	80.4	11.1	0.6	46.9	5.9	46.1	0.3
	Torrefied	300	-	5.5	62.4	27.3	4.9	60.8	3.2	32.5	0.5

Berdasarkan Tabel 2.1 di atas, sebagian besar biomassa memiliki kandungan *fixed carbon* dan *volatile matter* yang tinggi. Sebagai contoh, biomassa kulit kopi yang memiliki nilai tertinggi pada analisis *proximate* dan *ultimate*, yang mengindikasikan bahwa biomassa tersebut memiliki reaktivitas termokimia yang baik. Oleh karena itu, karakteristik biomassa kulit kopi sangat sesuai untuk dikonversi melalui teknik gasifikasi, dimana nilai volatilitas yang tinggi dapat membentuk gas mampu bakar (*syngas*) selama tahap pirolisis dan reduksi (Manrique et al., 2019; Rodriguez and Gordillo, 2011).

2.1.1 Biomassa Kulit Kopi

Biomassa kulit kopi merupakan limbah agroindustri yang dihasilkan dari proses pengolahan biji kopi dengan proporsi sekitar 12% dari total berat buah kopi, sehingga jumlahnya sangat melimpah dan berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan apabila tidak dimanfaatkan secara optimal (Manrique et al., 2019). Namun demikian, karakteristik fisik seperti komposisi air, bentuk partikel yang tidak seragam, serta densitas curah yang rendah menjadi tantangan dalam pemanfaatannya secara langsung. Dari sisi sifat termokimia, kulit kopi termasuk biomassa lignoselulosa dengan kandungan volatil yang tinggi dan komposisi abu yang relatif rendah, sehingga memiliki reaktivitas yang baik dalam proses konversi energi (Manrique et al., 2019; Nazos et al., 2022; Rodriguez and Gordillo, 2011). Karakteristik ini umumnya dievaluasi melalui analisis *proximate* dan *ultimate* sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2 Analisis *Proximate* dan *Ultimate* Biomassa Kulit Kopi (Sumber: Manrique et al., 2019)

proximate analyses			
analyses	standard	% wet bases	% dry bases
total moisture (wt %)	ASTM D 3302	8.88	
volatile (wt %)	ASTM D 3175	75.85	83.24
ash (wt %)	ASTM D 3174	0.79	0.87
fixed carbon (wt %)	ASTM D 3172	14.48	15.89
HHV ^a (kJ/kg)	ASTM D 5865	15,926	17,477
LHV ^b (kJ/kg)	ASTM D 5865	17,322	19,008
ultimate analyses			
analyses	standard	% wet bases	% dry bases
carbon (wt %)	ASTM D 5373	44.95	49.33
hydrogen (wt %)	ASTM D 5373	5.34	5.86
nitrogen (wt %)	ASTM D 5373	0.60	0.66
sulfur (wt %)	ASTM D 4239	0.03	0.04
oxygen (wt %)	ASTM D 5373	39.41	43.24

^aHHV: higher heating value. ^bLHV: lower heating value.

Berdasarkan Tabel 2.2, biomassa kulit kopi menunjukkan kandungan *volatile matter* yang sangat tinggi (83,24%), yang mengindikasikan bahwa

material ini mudah terdekomposisi secara termal dan menghasilkan fraksi gas yang signifikan selama tahap pirolisis. Sementara itu, kandungan *fixed carbon* sebesar 15,89% berperan dalam mempertahankan reaksi lanjutan pada fase padatan, khususnya pada tahap oksidasi dan reduksi. Kandungan abu yang rendah (0,87%) menjadi keuntungan karena dapat meminimalkan potensi pembentukan *slagging* dan *fouling* pada sistem konversi termal (Nazos et al., 2022). Dari sisi analisis *ultimate*, kandungan karbon yang relatif tinggi (49,33%) menunjukkan potensi energi yang baik dan berkontribusi terhadap nilai kalor biomassa, sedangkan kandungan oksigen yang tinggi (43,24%) merupakan karakteristik umum biomassa yang cenderung menurunkan nilai kalor dibandingkan bahan bakar fosil.

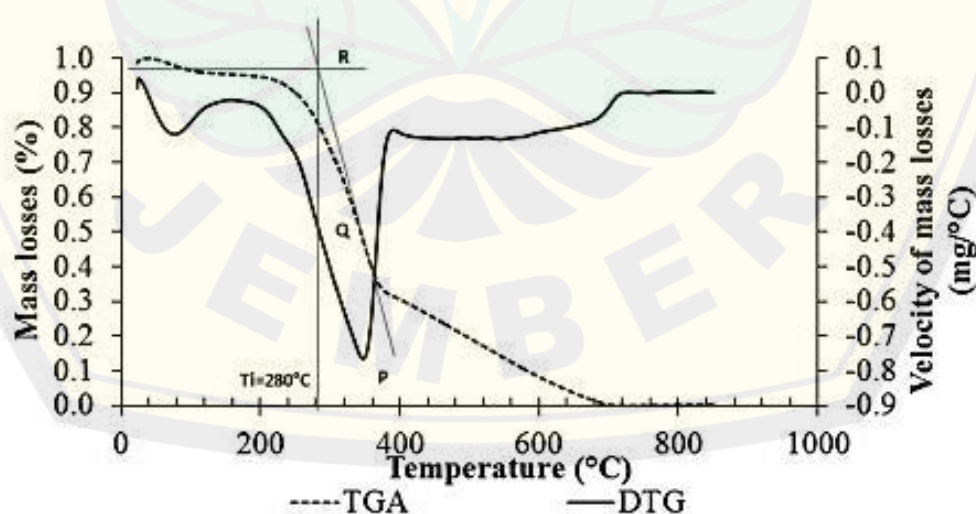
Selain karakteristik kimia, nilai kalor merupakan parameter penting dalam mengevaluasi potensi energi suatu biomassa. Biomassa kulit kopi diketahui memiliki nilai kalor dalam kisaran sekitar 16–19 MJ/kg, yang dipengaruhi oleh kandungan air serta komposisi unsur kimianya (Manrique et al., 2019; Nazos et al., 2022). Rentang nilai kalor tersebut menunjukkan bahwa kulit kopi memiliki kualitas energi yang cukup kompetitif di antara biomassa lignoselulosa lainnya. Dengan nilai kalor yang memadai serta didukung oleh kandungan volatil yang tinggi, kulit kopi menunjukkan potensi yang baik untuk diaplikasikan dalam proses konversi termokimia seperti gasifikasi, karena mampu menghasilkan gas sintesis (*syngas*) yang dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif.

2.1.2 Dekomposisi Termal Kulit Kopi

Dekomposisi termal biomassa kulit kopi merupakan proses perubahan struktur kimia akibat pemanasan yang berlangsung melalui tiga tahapan utama, yaitu pengeringan (*drying*), devolatilisasi (*devolatilization*), dan pembentukan arang (*char formation*) (Manrique et al., 2019; Rodriguez and Gordillo, 2011). Pada tahap awal, komposisi air dalam biomassa menguap pada temperatur rendah, kemudian diikuti proses pirolisis yang menguraikan komponen volatil menjadi gas dan uap organik. Selanjutnya, terbentuk residu padatan berupa *char* yang mengalami reaksi lanjutan pada temperatur lebih tinggi. Proses ini dipengaruhi

oleh struktur lignoselulosa, dimana hemiselulosa, selulosa, dan lignin terdegradasi pada rentang temperatur yang berbeda, serta menunjukkan bahwa biomassa memiliki reaktivitas tinggi terutama pada tahap pelepasan senyawa volatil (Bi et al., 2020; Couto et al., 2013; Lan et al., 2019; Mularski and Li, 2023; Nazos et al., 2022; Sikarwar et al., 2016).

Perilaku dekomposisi termal biomassa kulit kopi sangat dipengaruhi oleh rentang temperatur operasional yang menentukan tahapan reaksi yang terjadi. Pada temperatur sekitar 100-180°C, proses yang dominan adalah penguapan kadar air (*drying*). Ketika temperatur meningkat pada kisaran 180-400°C, hemiselulosa dan selulosa mulai terdegradasi secara intensif, menghasilkan pelepasan senyawa volatil dalam jumlah besar. Selanjutnya, pada temperatur di atas 400-500°C, lignin mulai terurai secara perlahan dan menghasilkan residu padatan berupa *char* yang lebih stabil (Couto et al., 2013; Manrique et al., 2019; Rodriguez and Gordillo, 2011). Pada rentang temperatur tinggi ini, reaksi lanjutan seperti oksidasi dan reduksi *char* dapat berlangsung, terutama dalam kondisi gasifikasi, sehingga temperatur berperan penting dalam menentukan distribusi produk dekomposisi. Untuk mengetahui perilaku dekomposisi termal biomassa kulit kopi yang diperoleh melalui *thermogravimetric analysis* (TGA) dan *derivative thermogravimetry* (DTG), dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Dekomposisi Termal Biomassa Kulit Kopi (Sumber: Manrique et al., 2019)

Berdasarkan Gambar 2.1, pengaruh temperatur terhadap *mass loss* biomassa kulit kopi dapat diamati melalui analisis termogravimetri (TGA), yang menunjukkan bahwa kehilangan massa terjadi secara bertahap seiring peningkatan temperatur. Pada rentang temperatur sekitar 100-180°C terjadi penurunan massa awal yang berkaitan dengan penguapan komposisi air. Penurunan massa paling signifikan terjadi pada kisaran 180–380 °C, yang menggambarkan proses devolatilisasi dimana sebagian besar *volatile matter* terurai dan dilepaskan dalam bentuk gas. Setelah melewati temperatur tersebut, laju kehilangan massa cenderung menurun dan mendekati konstan, yang menunjukkan bahwa sebagian besar komponen volatil telah habis dan tersisa residu berupa *char* yang lebih stabil secara termal. Pola ini menunjukkan bahwa temperatur memiliki peran penting dalam menentukan perilaku dekomposisi dari biomassa kulit kopi.

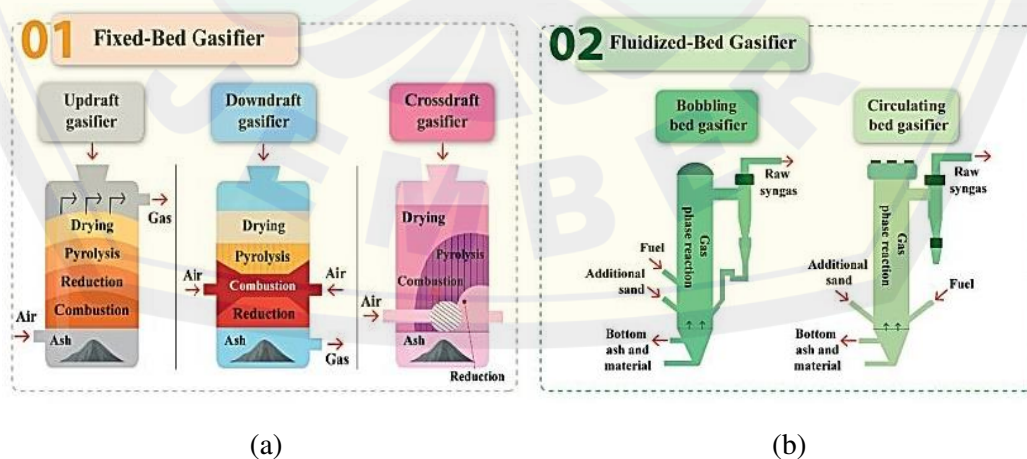
2.2 Gasifikasi Biomassa Kulit Kopi

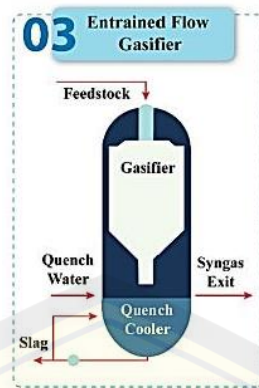
Gasifikasi biomassa kulit kopi merupakan proses konversi termokimia menjadi gas mampu bakar (*syngas*) melalui reaksi parsial dengan oksidator terbatas, seperti udara, uap air, atau campurannya, pada temperatur tinggi. Proses gasifikasi berlangsung secara bertahap dan melibatkan beberapa zona reaksi, yaitu pengeringan ($\pm 100^\circ\text{C}$), devolatilisasi (200–500°C), oksidasi yang menghasilkan panas reaksi, serta reduksi pada temperatur lebih tinggi (umumnya 700–1000°C). Produk utama dari proses ini adalah *syngas* yang didominasi oleh hidrogen (H_2) dan karbon monoksida (CO), serta mengandung komponen lain seperti metana (CH_4), karbon dioksida (CO_2), nitrogen (N_2), dan sejumlah kecil pengotor seperti tar dan partikulat (Couto et al., 2013; Kayiba, 2022; Mularski and Li, 2023; Qin et al., 2012; Wang et al., 2025). Jika dibandingkan dengan pembakaran sempurna yang berorientasi pada produksi panas, proses gasifikasi menghasilkan bahan bakar gas dengan nilai kalor tertentu yang dapat dimanfaatkan lebih lanjut, seperti kompor, pembangkitan listrik, bahan bakar mesin pembakaran dalam, maupun sebagai bahan baku dalam proses konversi energi dan kimia lanjutan (Kirsanovs et al., 2016; Li et al., 2016).

2.2.1 Tipe Reaktor Gasifikasi

Beberapa tipe reaktor gasifikasi yang umum digunakan antara lain *fixed bed* (*downdraft*, *updraft*, dan *crossdraft*), *fluidized bed* (*bubbling* dan *circulating*), serta *entrained flow gasifier* (Akbarian et al., 2022). Ketiga jenis reaktor ini memiliki prinsip kerja yang berbeda dalam hal aliran fluida, kontak antara fase padat dan gas, serta kondisi operasi yang digunakan, sehingga memengaruhi performa proses gasifikasi secara keseluruhan (Couto et al., 2013; Ismail and El-Salam, 2017; Jaganathan et al., 2017; Lan et al., 2019; Pecate et al., 2019; Qin et al., 2012; Wang et al., 2025).

Setiap tipe reaktor memiliki keunggulan dan keterbatasan tersendiri, misalnya pada *fixed bed gasifier* umumnya menghasilkan *syngas* dengan kandungan tar yang relatif rendah, namun memiliki keterbatasan dalam fleksibilitas terhadap ukuran dan jenis biomassa (Ismail and El-Salam, 2017; Jaganathan et al., 2017). Sementara itu, *fluidized bed gasifier* (*FBG*) menawarkan distribusi temperatur yang lebih merata, perpindahan panas dan massa yang lebih baik, serta kemampuan untuk mengolah berbagai jenis biomassa dengan ukuran partikel yang lebih bervariasi (Lan et al., 2019; Pecate et al., 2019; Wang et al., 2025). Di sisi lain, *entrained flow gasifier* mampu menghasilkan *syngas* dengan kualitas tinggi dan konversi yang lebih lengkap, namun memerlukan bahan baku dengan ukuran partikel sangat halus sehingga meningkatkan kompleksitas dari proses gasifikasi itu sendiri (Qin et al., 2012).





(c)

Gambar 2.2 Tipe Reaktor Gasifikasi; a) *Fixed Bed Gasifier*, b) *Fluidized Bed Gasifier*, c) *Entrained Flow Gasifier* (Sumber: Akbarian et al., 2022)

Berdasarkan perbedaan karakteristik yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, dapat dilakukan analisis karakteristik dari berbagai tipe *gasifier*. Ringkasan karakteristik dari berbagai tipe *gasifier* serta kaitannya dengan proses pembakaran biomassa (*initial ignition*) disajikan pada Tabel 2.3 berikut.

Tabel 2.3 Karakteristik Berbagai Tipe *Gasifier* terhadap *Initial Ignition*

Tipe <i>Gasifier</i>	<i>Gasifier Agent</i>	Kadar Syngas yang Dominan	Karakteristik Utama	Proses Pembakaran Biomassa
<i>fixed bed (Updraft)</i>	Udara, Uap dan O ₂	CO, H ₂ , dan CH ₄ dominan, tar tinggi	Temperatur rendah, efisiensi termal tinggi (Ismail & El-Salam, 2017)	Tar yang sangat tinggi menyebabkan <i>initial ignition</i> tidak stabil (Jaganathan et al., 2017)
<i>fixed bed (Downdraft)</i>	Udara, Uap dan O ₂	CO dan H ₂ dominan, tar rendah	Temperatur tinggi, Efisiensi termal sangat tinggi, <i>tar cracking</i> internal (Akbarian et al., 2022; Couto et al., 2013)	<i>Initial ignition</i> lebih stabil karena produksi tar yang rendah (Jaganathan et al., 2017; Kirsanovs et al., 2016)
<i>fixed bed (Crossdraft)</i>	Udara	CO, H ₂ , CH ₄ , dan CO ₂ dominan, tar rendah	Temperatur tinggi di area tertentu, efisiensi termal rendah (Akbarian et al., 2022)	<i>Initial ignition</i> cepat, namun kurang stabil dalam waktu yang lama (Jaganathan et al., 2017; Kirsanovs et al., 2016)

Tipe Gasifier	Gasifier Agent	Kadar Syngas yang Dominan	Karakteristik Utama	Proses Pembakaran Gasifikasi
<i>Bubbling Fluidized Bed</i>	Udara, Uap, dan Campuran	CO dan H ₂ dominan, tar rendah-sedang	Temperatur seragam dan homogen ($\pm 800\text{--}900^\circ\text{C}$), efisiensi tinggi (Baron et al., 2018)	<i>Initial ignition</i> yang stabil diakibatkan oleh proses homogenisasi temperatur (Baron et al., 2018; Syrodoy et al., 2021)
<i>Circulating Fluidized Bed</i>	Udara/Uap	CO dan H ₂ sangat dominan, tar rendah	Temperatur tinggi dan merata, efisiensi sangat tinggi (Couto et al., 2013)	Proses <i>initial ignition</i> yang berlanjut dan temperatur proses yang homogen (Pecate et al., 2019)
<i>Entrained Flow</i>	Uap / O ₂	CO dan H ₂ sangat dominan, tar sangat rendah	Temperatur sangat tinggi ($\sim 1400^\circ\text{C}$), efisiensi tinggi (Qin et al., 2012)	Proses <i>initial ignition</i> yang sangat mudah

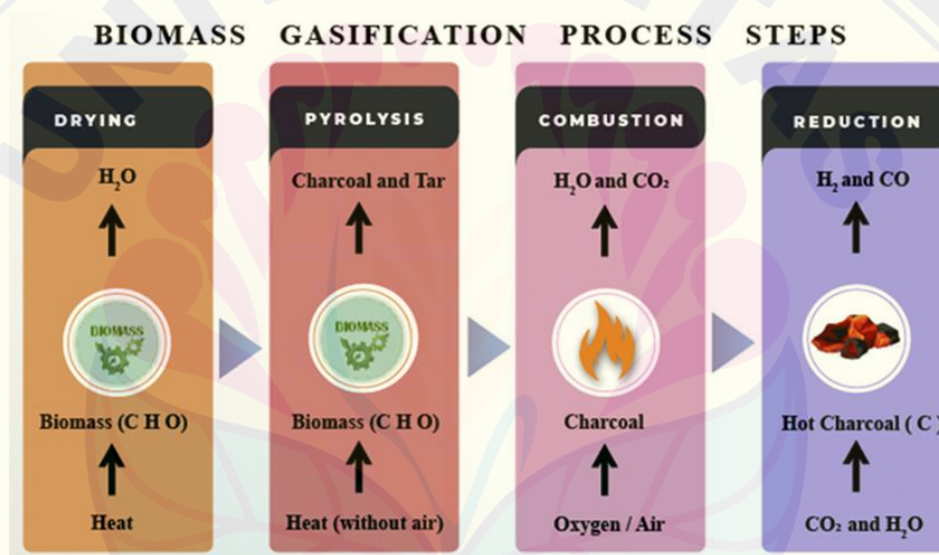
Berdasarkan Tabel 2.3, terlihat bahwa perbedaan tipe *gasifier* memberikan pengaruh signifikan terhadap temperatur operasi, efisiensi termal, pembentukan tar, serta kadar *syngas* yang dihasilkan. Dalam konteks ini, *fluidized bed gasifier* menjadi fokus utama karena memiliki distribusi temperatur yang relatif seragam (sekitar $800\text{--}900^\circ\text{C}$), sehingga mampu menghasilkan efisiensi termal yang tinggi dengan pembentukan tar yang lebih rendah dibandingkan *fixed bed* (Baron et al., 2018; Couto et al., 2013). Kondisi temperatur yang homogen juga mendukung reaksi gasifikasi yang lebih stabil, menghasilkan *syngas* dengan komposisi CO dan H₂ yang cukup tinggi dan merata. Hal ini menjadikan *fluidized bed* unggul dalam menjaga kestabilan proses dibandingkan tipe *gasifier* lainnya.

Pada kadar *syngas* yang dihasilkan, dapat menjelaskan proses pembakaran (*initial ignition*) dari biomassa. *Syngas* dengan kandungan CO dan H₂ yang tinggi serta tar yang rendah akan lebih mudah terbakar dan memiliki *ignition time* yang lebih singkat. Dalam konteks ini, penggunaan *burner chamber* menjadi penting sebagai tempat terjadinya proses pembakaran dengan menyediakan zona temperatur tinggi dan pencampuran yang baik antara *syngas* dan udara. *Burner chamber* berperan dalam menstabilkan nyala awal, terutama pada kondisi *syngas* dengan kualitas rendah atau masih mengandung tar, sehingga

proses transisi dari fase penyalaan menuju proses gasifikasi yang stabil dapat berlangsung lebih efektif.

2.2.2 Tahapan Proses Gasifikasi

Proses gasifikasi berlangsung melalui beberapa tahapan reaksi yang terjadi secara berurutan pada zona temperatur yang berbeda di dalam reaktor gasifikasi. Tahapan proses yang terjadi meliputi pengeringan (*drying*), pirolisis (*pyrolysis*), oksidasi (*oxidation*), dan reduksi (*reduction*) (Couto et al., 2013; Hussain et al., 2023; Kayiba, 2022). Adapun tahapan proses termokimia yang terjadi dalam proses gasifikasi dapat dilihat pada Gambar 2.3.

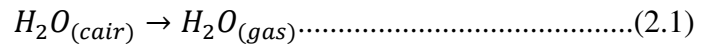


Gambar 2.3 Tahapan Proses Gasifikasi (Sumber: Hussain *et al.*, 2023)

Berdasarkan Gambar 2.3 di atas, tahapan proses gasifikasi dapat diuraikan sebagai berikut:

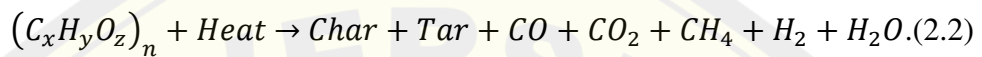
a. Tahap Pengeringan (*drying*)

Tahapan pengeringan merupakan langkah awal dalam proses gasifikasi biomassa, dimana kelembaban dalam bahan bakar dihilangkan melalui pemanasan hingga sekitar 100°C tanpa terjadi reaksi kimia signifikan melainkan terjadi proses fisika, yaitu penguapan air (H_2O) yang terkandung dalam biomassa. Secara proses dapat dituliskan sebagai:



b. Tahap Pirolisis (*pyrolysis*)

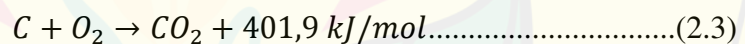
Tahap pirolisis dalam proses gasifikasi merupakan fase awal dimana biomassa mengalami dekomposisi termal pada suhu antara 250-500 °C dengan oksigen terbatas, menghasilkan produk utama berupa arang/karbon padat (*char*), tar, dan gas volatil seperti CO, CO₂, CH₄, dan H₂ (Hussain *et al.*, 2023). Adapun reaksi yang terjadi yaitu:



c. Tahap Oksidasi (*oxidation*)

Tahap oksidasi dalam proses gasifikasi biomassa merupakan fase eksotermik dimana sebagian bahan bakar bereaksi dengan oksigen atau udara terbatas, sehingga menghasilkan panas yang diperlukan untuk mendukung reaksi endotermik selanjutnya seperti reduksi dan pirolisis (Couto *et al.*, 2013; Hussain *et al.*, 2023). Reaksi yang terjadi antara lain:

1) Reaksi Oksidasi Total



2) Reaksi Oksidasi Parsial



3) Reaksi Hidrogen dan Oksigen

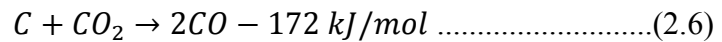


d. Tahap Reduksi (*reduction*)

Pada tahap reduksi, terjadi proses endotermik dimana karbon padat/arang (*char*) bereaksi dengan agen gasifikasi seperti uap air (H₂O) dan karbon dioksida (CO₂) untuk menghasilkan *syngas* yang kaya akan karbon

monoksida (CO) dan hidrogen (H₂) (Hussain *et al.*, 2023). Reaksi utama yang terjadi antara lain:

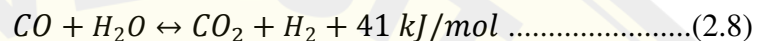
1) Reaksi Boudouard



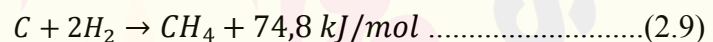
2) Reaksi *Water-Gas / Char Reaction*



3) Reaksi *Water-Gas Shift*



4) Reaksi *Methanation*



Berdasarkan reaksi reduksi di atas, dapat diketahui bahwa kesetimbangan reaksi dipengaruhi oleh beberapa parameter yaitu temperatur, rasio oksidator, dan waktu tinggal gas di dalam reaktor. Oleh karena itu, peningkatan temperatur akan mendorong terbentuknya gas CO dan H₂ melalui reaksi Boudouard dan *Water-Gas*, sedangkan temperatur yang lebih rendah cenderung meningkatkan pembentukan gas metana (CH₄).

2.3 Parameter Proses Awal Gasifikasi

Proses awal gasifikasi (*starter*) dipengaruhi oleh beberapa parameter penting yang menentukan keberhasilan penyalaan dan kestabilan menuju proses gasifikasi, di antaranya adalah suplai energi awal melalui sistem *premix* udara-LPG, pengaturan *Air-Fuel Ratio* (AFR), serta pengaruh temperatur pada reaktor terhadap kadar *syngas*. Temperatur awal yang dihasilkan dari *burner* sangat krusial karena akan menentukan laju dekomposisi biomassa dan keberlangsungan reaksi gasifikasi, dimana temperatur yang lebih tinggi cenderung meningkatkan pembentukan gas CO dan H₂ melalui reaksi reduksi seperti *Boudouard* dan

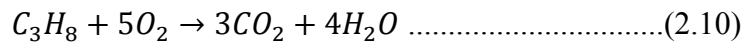
Water–Gas (Couto et al., 2013; Hussain et al., 2023). Dalam hal ini, penggunaan *burner chamber* berfungsi sebagai sumber panas awal yang mentransfer energi ke dalam *bed* biomassa secara bertahap dan terkontrol, sehingga membantu menciptakan kondisi termal yang stabil untuk mendukung proses *initial ignition* dan transisi menuju pembentukan *syngas*.

Berdasarkan konsep *premix* udara–LPG, karakteristik performa *burner chamber* sangat ditentukan oleh *Air-Fuel Ratio (AFR)* yang mengontrol temperatur *bed*, distribusi panas ke dalam *bed*, hingga *burning rate* yang dihasilkan pada proses pembakaran awal biomassa (Baron et al., 2018; Deng et al., 2019; Yakovenko et al., 2023). Pada fase *initial ignition*, panas dari *burner* harus cukup untuk melampaui energi aktivasi devolatilisasi hemiselulosa dan selulosa, sebagaimana dijelaskan dalam analisis kinetika biomassa (Rodriguez and Gordillo, 2011), sehingga pelepasan volatil dan pembentukan *char* dapat berlangsung efektif. Temperatur yang dicapai di area *burner chamber* juga memengaruhi distribusi campuran gas dan udara melalui pergeseran kesetimbangan reaksi pada temperatur tinggi (Rodriguez and Gordillo, 2011). Dalam konfigurasi *fluidized bed*, intensitas pencampuran udara dan LPG mempercepat transfer panas dari *burner* menuju biomassa (Lan et al., 2019), sehingga desain dan pengaturan *AFR* pada *burner chamber* menjadi faktor krusial dalam menentukan kecepatan kenaikan temperatur *bed*, stabilitas transisi pembakaran biomassa menuju gasifikasi, serta keberhasilan proses *starter* secara keseluruhan.

2.3.1 *Premix* Udara-LPG berdasarkan *Air-Fuel Ratio (AFR)*

Pembakaran *premix* udara–LPG pada sistem *fluidized bed* didasarkan pada prinsip pencampuran homogen antara bahan bakar gas dan udara sebelum proses penyalaan. *Air-Fuel Ratio (AFR)* menjadi parameter kunci yang menentukan fase pembakaran, apakah berada pada kondisi *lean* (kelebihan udara), setimbang, atau *rich* (kelebihan bahan bakar) (Alyson et al., 2018; Badawy et al., 2022; Kirsanovs et al., 2016). Secara teoritis, *AFR* yang setimbang ditentukan berdasarkan persamaan reaksi pembakaran sempurna komponen utama LPG

(propana dan butana). Sebagai pendekatan umum, untuk propana (C_3H_8), reaksi setimbang dinyatakan sebagai:



Dengan mempertimbangkan bahwa udara mengandung $\pm 21\%$ O_2 secara volumetrik, maka kebutuhan udara teoritis dapat dihitung dan dikonversi menjadi *AFR* setimbang berbasis massa. Pada kondisi *lean* (*AFR* aktual < *AFR* setimbang), temperatur *bed* cenderung lebih rendah tetapi stabilitas pembakaran meningkat, sedangkan pada kondisi *rich* (*AFR* aktual > *AFR* setimbang), temperatur *bed* dapat meningkat namun berpotensi menghasilkan pembakaran tidak sempurna dan pembentukan CO. Studi pembakaran *premix* udara-LPG dalam *fluidized bed* menunjukkan bahwa terdapat temperatur kritis yang menyebabkan perpindahan zona reaksi ke dalam *bed*, yang sangat dipengaruhi oleh rasio udara dan bahan bakar (Baron et al., 2018; Lan et al., 2019).

Secara kuantitatif, *AFR* dapat dihitung berdasarkan perbandingan laju aliran massa udara terhadap laju aliran massa bahan bakar, yaitu:

$$AFR = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{bahan\ bakar}} \dots\dots\dots(2.11)$$

Jika laju aliran diukur dalam basis volumetrik (misalnya menggunakan *flowmeter* untuk mengukur aliran udara dan LPG), maka diperlukan konversi ke laju aliran massa menggunakan hubungan:

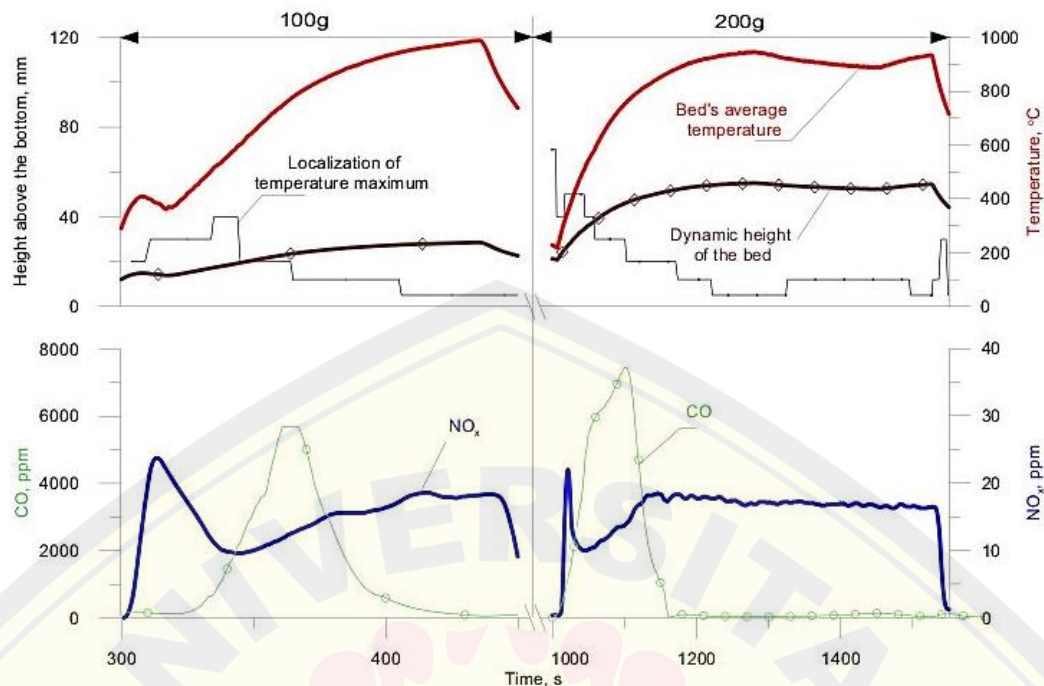
$$\dot{m} = Q \cdot \rho \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana, ρ adalah densitas fluida (kg/m^3) dan $\dot{Q}$ adalah laju aliran massa (m^3/s). Pada sistem *fluidized bed gasifier*, kondisi operasi yang dominan adalah *excess air* dalam batas tertentu untuk menjaga kestabilan temperatur awal tanpa menyebabkan pembakaran sempurna seperti pada kondisi *rich* atau setimbang, sehingga variasi *Air-Fuel Ratio* (*AFR*) pada kondisi *lean fuel* didasarkan pada pertimbangan karakteristik proses gasifikasi yang memerlukan

suplai oksigen terbatas untuk menghasilkan *syngas* secara optimal (Rodriguez and Gordillo, 2011). Penggunaan *AFR lean* pada tahap *starter* dengan *premix* udara–LPG bertujuan untuk menghasilkan panas yang cukup guna memicu proses *initial ignition* dan devolatilisasi biomassa. Selain itu, beberapa studi menunjukkan bahwa peningkatan rasio udara pada batas *lean* dapat memperbaiki distribusi temperatur dan meningkatkan kestabilan proses pada reaktor *fluidized bed*, meskipun kelebihan udara yang terlalu tinggi dapat menurunkan temperatur reaksi dan memperlambat pembentukan *syngas* (Alyson et al., 2018; Deore et al., 2023; Fierro et al., 2023). Oleh karena itu, variasi *AFR* dalam rentang *lean* hingga *ultra-lean* dipilih untuk mengkaji secara spesifik pengaruh tingkat kelebihan udara terhadap dinamika pembakaran biomassa menuju proses gasifikasi.

2.3.2 Pengaruh *Premix* udara–LPG terhadap *Initial Ignition*

Proses pembakaran biomassa (*initial ignition*) pada sistem gasifikasi merupakan tahapan transisi yang ditandai oleh peningkatan temperatur *bed* hingga mencapai titik dekomposisi termal biomassa. *Premix* udara–LPG berperan penting dalam proses ini karena menyediakan sumber energi awal yang stabil dan terkontrol untuk memicu pembakaran. Penggunaan *premix* gas menghasilkan kenaikan temperatur yang cepat pada fase awal, sehingga mempercepat proses pemanasan dan devolatilisasi biomassa hingga tercapai kondisi penyalaan. Selain itu, pencampuran udara dan LPG yang homogen memungkinkan distribusi panas yang lebih merata di dalam reaktor, sehingga meningkatkan kestabilan nyala dan mempercepat transisi dari fase pembakaran menuju pembentukan *syngas* (Baron et al., 2018). Variasi kondisi *premix*, khususnya rasio udara–bahan bakar juga memengaruhi intensitas pembakaran dan evolusi gas yang ditunjukkan oleh peningkatan konsentrasi CO sebagai indikator awal gasifikasi (Rodriguez and Gordillo, 2011). Dengan demikian, *premix* udara–LPG tidak hanya berfungsi sebagai pemicu *ignition*, tetapi juga sebagai pengendali dinamika temperatur dan kestabilan proses awal gasifikasi. Peran *premix* udara–LPG dalam proses pembakaran biomassa dapat dianalisis melalui Gambar 2.4 berikut:



Gambar 2.4 Pengaruh *Premix* udara–LPG terhadap *Initial Ignition Biomass* (Sumber: Baron *et al.*, 2018)

Berdasarkan Gambar 2.4, *Premix* udara–LPG berperan penting dalam proses *initial ignition biomass*, dimana temperatur meningkat dengan cepat pada awal pembakaran, sedangkan posisi temperatur maksimum (*localization of temperature maximum*) berpindah ke arah atas reaktor yang ditunjukkan oleh perubahan *height above the bottom*, sehingga menunjukkan bahwa zona pembakaran bersifat dinamis selama proses fluidisasi. Pada massa bed 200 g, temperatur rata-rata *bed* lebih stabil dibandingkan massa bed 100 g karena kapasitas penyimpanan panas yang lebih besar sehingga distribusi kalor menjadi lebih merata. Selain itu, perubahan tinggi *bed* (*dynamic height of the bed*) menunjukkan adanya pergerakan partikel akibat proses fluidisasi, sedangkan konsentrasi CO dan NO_x berubah mengikuti reaksi pembakaran yang terjadi sehingga dapat diindikasikan sebagai awal terbentuknya *syngas*. Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa *premix* udara–LPG tidak hanya mempercepat kenaikan temperatur awal, tetapi juga memengaruhi distribusi panas dan transisi dari fase pembakaran menuju gasifikasi.

2.3.3 Pengaruh Temperatur Proses terhadap *Initial Ignition*

Temperatur proses merupakan parameter kunci dalam pembakaran biomassa (*initial ignition*) karena secara langsung memengaruhi laju pemanasan, devolatilisasi, serta awal terjadinya reaksi oksidasi dan reduksi (Jaganathan et al., 2017). Pada temperatur yang cukup tinggi, biomassa akan lebih cepat melepaskan senyawa volatil yang mudah terbakar sehingga mempercepat terbentuknya nyala api dan meningkatkan kestabilan pembakaran awal. Sebaliknya, temperatur yang rendah cenderung memperlambat proses pemanasan dan pelepasan gas volatil, sehingga menyebabkan keterlambatan *ignition* dan ketidakstabilan reaksi (Baron et al., 2018). Oleh karena itu, pengendalian temperatur awal menjadi krusial untuk memastikan proses penyalaan berlangsung cepat, merata, dan mampu mendukung transisi menuju tahap gasifikasi.

Kondisi ini sejalan dengan Gambar 2.4 di atas, dimana temperatur proses terbukti berperan penting dalam menentukan keberhasilan pembakaran biomassa. Kenaikan temperatur yang cepat pada fase awal menunjukkan bahwa suplai energi dari *premix* udara-LPG mampu memicu pemanasan dan devolatilisasi secara efektif. Seiring meningkatnya temperatur, distribusi panas dalam *bed* menjadi lebih stabil, terutama pada massa biomassa yang lebih besar (200 gram) yang memiliki kapasitas panas lebih tinggi sehingga mendukung kestabilan proses. Selain itu, temperatur yang tinggi mendorong peningkatan konsentrasi CO sebagai indikasi awal pembentukan *syngas*, sementara NO_x cenderung muncul di awal dan menurun seiring pergeseran reaksi dari oksidasi ke reduksi. Hal ini menunjukkan bahwa temperatur tidak hanya memengaruhi kecepatan *ignition*, tetapi juga menentukan kestabilan proses dan transisi menuju gasifikasi.

2.4 Karakteristik *Syngas*

Kadar *syngas* memiliki karakteristiknya masing-masing, hal itu dipengaruhi oleh jenis biomassa yang digunakan, tipe *gasifier*, dan kondisi proses awal gasifikasi. Adapun kadar *syngas* yang dihasilkan dari berbagai tipe *gasifier* dapat dilihat pada Tabel 2.4.

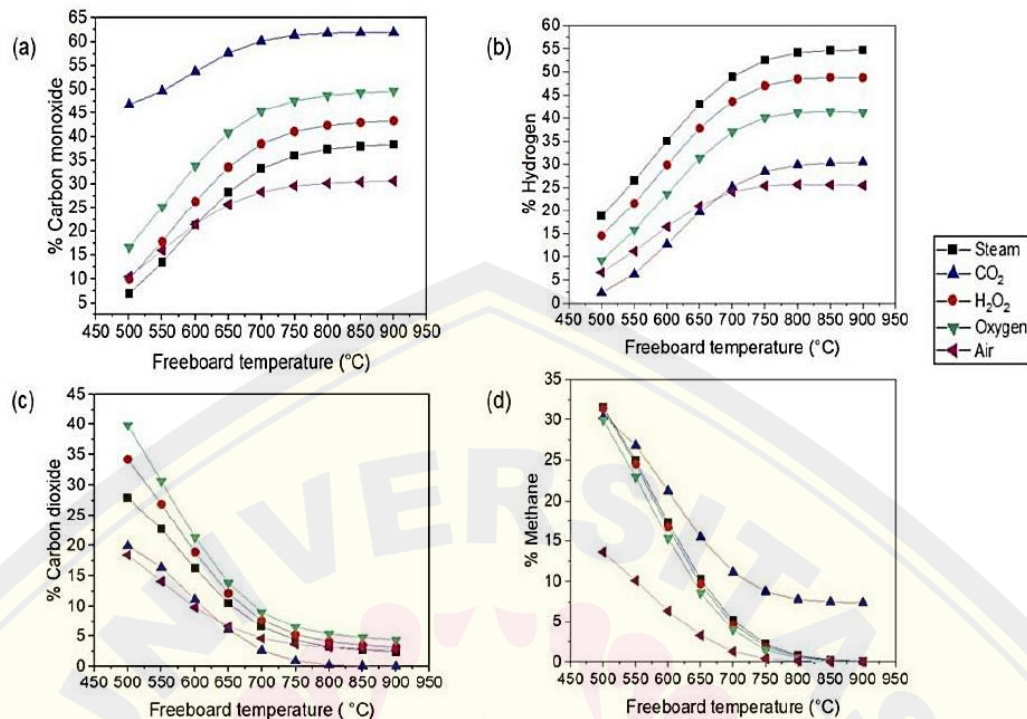
Tabel 2.4 Kadar *Syngas* dari Beberapa Tipe *Gasifier* (Sumber: Couto *et al.*, 2013)

Gasifier	Gas composition (vol. %, dry)					HHV (MJ/m ³)
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	
Bubbling fluidized bed	9	14	20	7	50	5.4
Updraft	11	24	9	3	53	5.5
Downdraft	17	21	13	1	48	5.7

Berdasarkan Tabel 2.4, kadar *syngas* memengaruhi nilai kalor yang dihasilkan selama proses gasifikasi. Kadar *syngas* seperti CO, H₂, dan CH₄ menjadi faktor utama dalam menentukan kualitas energi gas yang dihasilkan. Pada proses pembakaran biomassa (*initial ignition*), karakteristik *syngas* tersebut berperan sebagai indikator keberhasilan transisi menuju *partial combustion*. Kondisi ini berkaitan dengan *starter-off*, dimana fraksi gas CO, H₂, dan CH₄ yang cukup tinggi memungkinkan proses gasifikasi berlangsung stabil tanpa bantuan bahan bakar tambahan (Jaganathan *et al.*, 2017).

2.4.1 Karakteristik *Syngas* terhadap Temperatur Proses

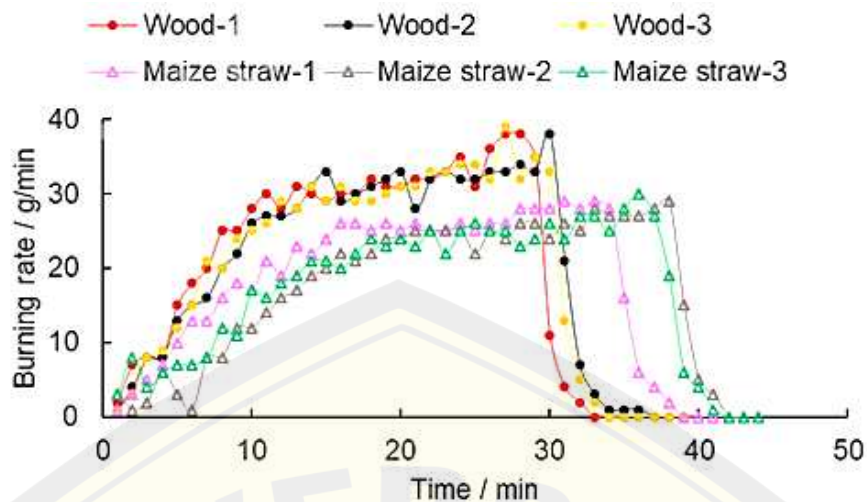
Secara umum, peningkatan temperatur akan meningkatkan laju reaksi termokimia, khususnya reaksi reduksi seperti reaksi *Boudouard* dan reaksi *Water-Gas*, sehingga mendorong peningkatan konsentrasi gas mudah terbakar seperti karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H₂), serta menurunkan kandungan karbon dioksida (CO₂) (Kayiba, 2022). Selain itu, pada temperatur tinggi (di atas ±700 °C), kualitas *syngas* cenderung meningkat dengan dominasi CO dan H₂ serta berkurangnya pembentukan tar. Namun demikian, kondisi temperatur juga sangat berkaitan dengan tahap awal penyalan (*initial ignition*) biomassa dalam proses gasifikasi, dimana temperatur yang cukup tinggi diperlukan untuk memicu reaksi oksidasi awal sehingga menghasilkan panas yang mampu mempertahankan reaksi berkelanjutan di dalam reaktor. Apabila temperatur awal tidak tercapai, proses devolatilisasi dan reaksi reduksi tidak berlangsung optimal, yang pada akhirnya memengaruhi kadar *syngas* yang dihasilkan (Baron *et al.*, 2018; Ismail & El-Salam, 2017). Untuk mengetahui persentase *syngas* yang dihasilkan dalam rentang temperatur tertentu, dapat dilihat pada Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.5 Persentase Syngas terhadap Temperatur Gasifikasi (Sumber: Kayiba, 2022)

2.5 Burning Rate

Burning rate (laju pembakaran) merupakan parameter penting yang merepresentasikan kecepatan konsumsi massa biomassa selama proses pembakaran maupun tahap awal gasifikasi. Secara teoritis, *burning rate* ditentukan oleh interaksi antara kinetika reaksi kimia dan proses perpindahan panas serta massa di sekitar partikel bahan bakar. Pada biomassa lignoselulosa, tahapan devolatilisasi dan oksidasi *char* memiliki energi aktivasi berbeda yang memengaruhi laju konversi karbon (Rodriguez and Gordillo, 2011). Studi hubungan dinamis *burning rate* menunjukkan bahwa laju pembakaran tidak bersifat konstan, melainkan berubah terhadap waktu sebagai respons terhadap variasi temperatur dan distribusi oksigen (Deng *et al.*, 2019). Dalam konteks gasifikasi, peningkatan temperatur mempercepat reaksi heterogen seperti oksidasi parsial dan reaksi Boudouard, sehingga meningkatkan laju konsumsi karbon (Ismail & El-Salam, 2017). *Burning rate* dapat dianalisis berdasarkan Gambar 2.7.



Gambar 2.6 Analisis *Burning Rate* pada Proses Gasifikasi (Sumber: Deng *et al.*, 2019)

Berdasarkan Gambar 2.7, terlihat bahwa laju pembakaran meningkat secara signifikan pada tahap awal, kemudian mencapai kondisi puncak, dan selanjutnya menurun hingga mendekati nol seiring habisnya bahan bakar. Pola ini menunjukkan adanya tiga fase utama, yaitu fase pemanasan awal, fase pembakaran intensif, dan fase penurunan reaksi. Kenaikan laju pembakaran yang cepat pada awal proses mengindikasikan reaktivitas termal yang tinggi, sedangkan kestabilan pada fase puncak mencerminkan kondisi pembakaran yang optimal (Yakovenko *et al.*, 2023). Dalam hal ini, *burning rate* juga berperan penting pada tahap *initial ignition biomass*, dimana laju pembakaran awal yang tinggi dapat mempercepat tercapainya kondisi *starter-off* dan mendukung keberlangsungan proses gasifikasi secara stabil.

Secara kuantitatif, *burning rate* dapat dinyatakan sebagai laju perubahan massa bahan bakar terhadap waktu, yaitu:

$$BR = \frac{dm}{dt} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana, *m* adalah massa biomassa dan *t* adalah waktu pembakaran biomassa. Pada analisis eksperimental, nilai *dm/dt* dapat diperoleh dari kurva kehilangan massa terhadap waktu (Baron *et al.*, 2018).

2.6 Studi Literatur

Sebagai dasar penentuan parameter penelitian yang dilakukan, berikut beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian ini tercantum pada Tabel 2.4 berikut.

Tabel 2.5 Studi Literatur

Parameter	(Baron et al., 2018)	(Lan et al., 2019)	Sumber (Guo and Wang, 2023)	(Ismail and El-Salam, 2017)	(Deng et al., 2019)	Penelitian Ini
Parameter Penelitian						
Jenis Studi	Eksperimental	Eksperimental	Eksperimental	Eksperimental	Eksperimental	Eksperimental
Tipe Reaktor	<i>Bubbling Fluidized Bed</i>	<i>Fluidized Bed</i>	<i>Fixed-Bed</i>	<i>Updraft Fixed-Bed Gasifier</i>	<i>Forced-Draft Gasifier Stove</i>	<i>Moving Fluidized Bed</i>
Biomassa	-	Serbuk Kayu Pinus	<i>Madake and Moso Bamboo</i>	Wood Pellet	Wood and Maize Straw Pellet	Kulit Kopi
Laju Aliran Udara (LPM)	99,6 LPM	-	0,1 LPM	125 LPM	80 LPM	Rentang flowrate
Laju Aliran LPG (LPM)	1,98 LPM	-	-	-	-	Rentang flowrate
Air Fuel Ratio (AFR)	-	-	-	-	-	Diteliti
Equivalence Ratio (ER)	-	0,15-0,25	-	0,2 – 0,35	-	Pendekatan AFR
Ukuran Biomassa (mm)	-	< 6 mm	< 0,25 mm	12 mm	8 mm	Dikontrol
Feedrate Biomassa (g/min)	-	166,67 g/min	-	666,67 g/min	-	Dikontrol
Temperatur Bed (°C)	700 – 1000 °C	650, 700, 750, 800, 850 °C	-	< 600 °C	-	Diteliti
Ignition Time (s)	1500 – 3500 s	-	-	3600 s	-	Diteliti
Burning Rate (g/min)	-	-	-	-	15-20 g/min	Diteliti
Kadar syngas						
H ₂ (%vol)	-	7-13%	-	0,63 – 2,7%	-	Diteliti (parameter starter-off)
CO (%vol)	-	14-20%	-	11,2 -14,6%	-	Diteliti (parameter starter-off)
CH ₄ (%vol)	-	5-7%	-	1,27 – 1,9%	-	Diteliti (parameter starter-off)

Berdasarkan Tabel 2.4, beberapa penelitian telah berhasil menganalisis terkait dengan pengaruh *equivalence ratio* (ER) terhadap temperatur *bed*, kadar *syngas*, dan *burning rate*. Hal ini terlihat pada penelitian Baron et al. (2018) yang

berfokus pada karakteristik pembakaran awal dalam *bubbling fluidized bed* dengan pengaturan aliran udara dan LPG berdasarkan berat biomassa yang digunakan, sementara Lan *et al.* (2019) dan Guo & Wang (2023) lebih fokus kepada pengaruh jenis biomassa dan ukuran partikel terhadap distribusi temperatur dan efisiensi konversi pada *fluidized bed* dan *fixed bed*. Ismail & El-Salam (2017) mengkaji pengaruh *equivalence ratio* (ER) dan kondisi operasi pada *updraft fixed bed* terhadap komposisi gas, sedangkan Deng *et al.* (2019) meneliti performa *downdraft gasifier* dengan variasi bahan baku biomassa dan parameter operasi terhadap *burning rate* dan kualitas *syngas*. Secara umum, kelima studi tersebut lebih menekankan pada kondisi operasi tunak (*steady state*) dan optimasi parameter konvensional, sementara aspek dinamika pembakaran biomassa (*initial ignition*) khususnya pengaturan *Air-Fuel Ratio* (AFR) pada sistem *premix* udara-LPG dalam reaktor *moving fluidized bed* berbahan baku kulit kopi, belum dikaji secara mendalam.

2.7 Hipotesis

Variasi *Air-Fuel Ratio* (AFR) pada *starter premix* udara-LPG diduga memengaruhi *ignition time*, kadar *syngas* (H_2 , CO, dan CH_4), serta *burning rate* pada proses pembakaran awal biomassa. Kondisi AFR yang *lean fuel* diduga menghasilkan kenaikan temperatur *bed* yang lebih cepat serta distribusi panas yang lebih merata akibat keseimbangan suplai oksigen dan energi pembakaran, yang pada akhirnya mendukung percepatan *initial ignition*, mendorong pembentukan *syngas*, dan *burning rate* biomassa lebih rendah. Sebaliknya, kondisi AFR yang *ultra-lean fuel* diperkirakan menurunkan intensitas pembakaran serta berdampak pada ketidakstabilan temperatur *bed* sehingga *burning rate* menjadi lebih tinggi dan perubahan zona reaksi akibat ketidakseimbangan energi awal pembakaran, sehingga memperlambat *initial ignition* dan transisi menuju proses gasifikasi (*starter-off*).