

# Studi Teoritis Karakteristik Termal Pembakaran Biomassa Tanaman Energi pada Berbagai Kondisi Udara dalam Tungku Adiabatik

## Theoretical Study of Thermal Characteristics of Energy Crop Biomass Combustion Under Various Air Conditions in an Adiabatic Furnace

Haris Mawardi<sup>1</sup>, Edy Hartulistiyoso<sup>1\*</sup>, Muhamad Yulianto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical and Biosystem Engineering, Faculty of Agricultural Technology, IPB University, Bogor, Indonesia.

Email\*): edyhartulistiyoso@apps.ipb.ac.id

Received:  
23 June 2024

Revised:  
16 September 2024

Accepted:  
17 September 2024

Published:  
29 September 2024

DOI:  
10.29303/jrpb.v12i2.659

ISSN 2301-8119, e-ISSN  
2443-1354

Available at

<http://jrpb.unram.ac.id/>

**Abstract:** Combustion is an energy conversion method involving the reaction of fuel and oxygen to generate heat. Coal remains predominant in Indonesia's energy mix, contributing to over 50% of global CO<sub>2</sub> emissions. Efforts to reduce these emissions include using renewable energy sources like biomass, with current potential in energy crop biomass such as gamal and sengon wood. However, the thermal characteristics of burning gamal and sengon wood have not been extensively studied. This paper discusses the theoretical thermal characteristics of gamal and sengon wood combustion through numerical simulation using a combustion equilibrium model in an adiabatic furnace under stoichiometric, *excess air*, and *excess fuel* conditions. Thermodynamic calculations will be validated against experimental data. The simulation results show that the thermal characteristics of gamal combustion are superior to those of sengon. Adjustments in air supply can impact combustion quality, where *excess air* is often necessary to mitigate environmental factors disrupting theoretical stoichiometric combustion. Optimal combustion conditions are achieved at equivalence ratios of 1.3 for gamal and sengon. Validation using Mean Absolute Percentage Error (MAPE) indicates low error values (8,55%) affirming the model's ability to predict thermal characteristics accurately.

**Keywords:** combustion air; energy crops; numerical simulation; thermal characteristics

**Abstrak:** Pembakaran adalah metode konversi energi dengan mereaksikan bahan bakar dan oksigen untuk menghasilkan panas. Saat ini batubara masih mendominasi sumber energi di Indonesia yang menyumbang lebih dari 50% emisi CO<sub>2</sub> global. Upaya mengurangi emisi ini salah satunya dengan penggunaan energi terbarukan seperti biomassa, dimana energi biomassa yang sedang berpotensi saat ini adalah produk biomassa tanaman energi seperti kayu gamal dan sengon. Penggunaan tanaman energi tersebut sebagai penyedia termal melalui proses pembakaran masih belum pernah dikaji, sehingga paper ini akan membahas karakteristik termal pembakaran kayu gamal dan sengon secara teoritis melalui simulasi numerik pembakaran. Simulasi menggunakan model kesetimbangan pembakaran pada tungku adiabatik dengan kondisi stoikiometri, kelebihan udara (*excess air*), dan kelebihan bahan bakar (*excess fuel*) dengan perhitungan – perhitungan termodinamika yang nantinya akan divalidasi dengan data eksperimental. Hasil simulasi menunjukkan karakteristik termal pembakaran gamal lebih unggul dibandingkan sengon. Penambahan dan pengurangan udara dari kondisi optimum dapat mengurangi kualitas pembakaran, namun secara aktual penggunaan udara berlebih diperlukan untuk mengantisipasi faktor lingkungan yang mengganggu pembakaran stoikiometri teoritis. Kondisi optimum pembakaran dicapai pada saat rasio ekuivalen gamal dan sengon masing-masing 1,3.

Hasil validasi menggunakan MAPE menunjukkan nilai error yang rendah (8,55%) sehingga model pembakaran yang digunakan mampu memprediksi karakteristik termal dengan sangat baik.

**Kata kunci:** karakteristik termal; simulasi numerik; tanaman energi; udara pembakaran

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Pembakaran merupakan metode konversi energi paling sederhana dimana bahan bakar akan direaksikan dengan oksigen sehingga akan menguraikan senyawa-senyawa yang terkandung didalamnya dan melepaskan panas. Dalam aplikasinya, energi yang dihasilkan dari pembakaran dapat langsung dimanfaatkan oleh beberapa sektor mulai dari rumah tangga, pertanian, transportasi hingga industri. Sektor Industri menjadi sektor yang paling banyak mengkonsumsi energi untuk melakukan operasionalnya, sebesar 3.691.993 terajoule, atau sekitar 53,4% dari total konsumsi energi di Indonesia (BPS, 2023b). Energi ini berupa energi panas hasil pembakaran yang dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik, pengeringan bahan-bahan industri atau sebagai pemanas ruangan. Pembangkit listrik merupakan pemanfaatan pertama daripada energi panas, dengan batubara menduduki >50% energi primer dalam pembangkitan energi panas yang kebutuhan yang selalu meningkat setiap tahunnya akan sejalan dengan konsumsinya (Kementerian ESDM, 2023). Dalam prosesnya, pembakaran batubara akan menghasilkan lebih dari 50% emisi CO<sub>2</sub> global (BPS, 2023a). Upaya pengurangan emisi CO<sub>2</sub> telah dilakukan salah satunya dengan menggunakan energi baru dan terbarukan (EBT) seperti energi biomassa, energi yang berasal dari material organik seperti tanaman, hewan dan limbah organik (Ang et al., 2022) yang bersifat ramah lingkungan karena prinsip karbon netral (Becker et al., 2020).

Saat ini potensi energi biomassa di Indonesia mengalami peningkatan setiap tahunnya dengan jumlah produksi energi biomassa sebesar 911.907 terajoule pada tahun 2022, namun masih sangat jauh jika dibandingkan dengan batubara sebesar 17.267.940 terajoule. Sektor rumah tangga menduduki pemanfaatan terbesar dari energi biomassa, disusul oleh industri (BPS, 2023b) Salah satu upaya pemerintah dalam mendorong penggunaan energi biomassa adalah melalui penggalakan hutan tanaman energi. Hutan tersebut merupakan upaya pencadangan kawasan hutan produksi yang khusus digunakan untuk menghasilkan energi (Kementerian ESDM, 2019). Dua diantara beberapa komoditas tanaman energi yang dibudidayakan adalah gamal, dan sengon. Tanaman tersebut memiliki produktivitas yang cukup baik dengan yield sebanyak 20-65 m<sup>3</sup>/ha/th (Krisnawati et al., 2011; Rusolono et al., 2018) sehingga berpotensi untuk digunakan baik sebagai energi primer maupun co-firing dengan batubara.

Saat ini karakteristik termal dari pembakaran kayu gamal dan sengon sebagai sumber energi masih belum dikaji sehingga perlu dilakukan studi mengenai potensi energi yang dapat dimanfaatkan melalui proses pembakaran. Sebagai langkah awal, studi teoritis perlu dilakukan untuk memprediksi bagaimana karakteristik termal pembakaran pada kondisi paling ideal di dalam sebuah tungku adiabatik, yaitu tungku yang mengabaikan perpindahan panas keluar dan masuk lingkungan, pada beberapa kondisi udara pembakaran yang nantinya akan divalidasi dengan data pembakaran eksperimental untuk mengevaluasi model simulasi yang dilakukan. Paper ini berkontribusi dalam mempelajari karakteristik termal pada pembakaran gamal dan sengon pada sebuah tungku adiabatik melalui hukum-hukum termodinamika yang berlaku. Selain itu juga didiskusikan prediksi kondisi pembakaran

optimum melalui penentuan penggunaan udara berlebih (*excess air*) dari air fuel ratio (AFR) stoikiometri yang merupakan faktor kunci untuk mencapai pembakaran sempurna (Al-Arkawazi, 2019).

### Tujuan

Tujuan dari paper ini adalah untuk menentukan dan mengevaluasi karakteristik termal pembakaran biomassa tanaman energi (gamal, dan sengon) secara teoritis pada tungku adiabatik dengan berbagai kondisi udara pembakaran melalui simulasi numerik menggunakan hukum termodinamika yang berlaku sebelum dilakukan pembakaran secara aktual pada tungku.

## METODE PENELITIAN

### Alat dan Bahan

Alat yang digunakan terdiri dari laptop serta aplikasi Microsoft Excel 2020 untuk melakukan simulasi numerik. Adapun bahan dalam penelitian ini berupa data analisis proksimat dan ultimat *sawdust* dari kayu gamal dan sengon yang telah diuji di Balai Pendidikan dan Pelatihan Tambang Bawah Tanah, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Provinsi Sumatera Barat (Tabel 1).

**Tabel 1.** Data hasil analisis proksimat dan ultimat

Karakteristik	Metode	Gamal	Sengon
HHV (kJ/kg)	ASTM D 5865-19	17.882,82	17.911,7
LHV (kJ/kg)	persamaan (13)	16.741,65	16.297,01
Karakteristik Proksimat			
% Kadar Air (MC)	ASTM D3302-19	12,54	20,77
% Kadar Abu (AC)	ASTM D3174-12	2,88	1,47
% Zat Terbang (VM)*	<i>by difference</i>	66,36	61,22
% Karbon Tetap (FC)	ASTM D3172-13	18,22	16,54
Karakteristik Ultimate			
%wt Karbon (C)	ASTM D5373-21	48,84	50,31
%wt Hidrogen (H)	ASTM D5373-21	5,02	5,04
%wt Nitrogen (N)	ASTM D5373-21	1,49	1,49
%wt Oksigen (O)**	<i>by difference</i>	42,92	40,08
%wt Sulfur (S)	ASTM D4239-18	0,26	0,2

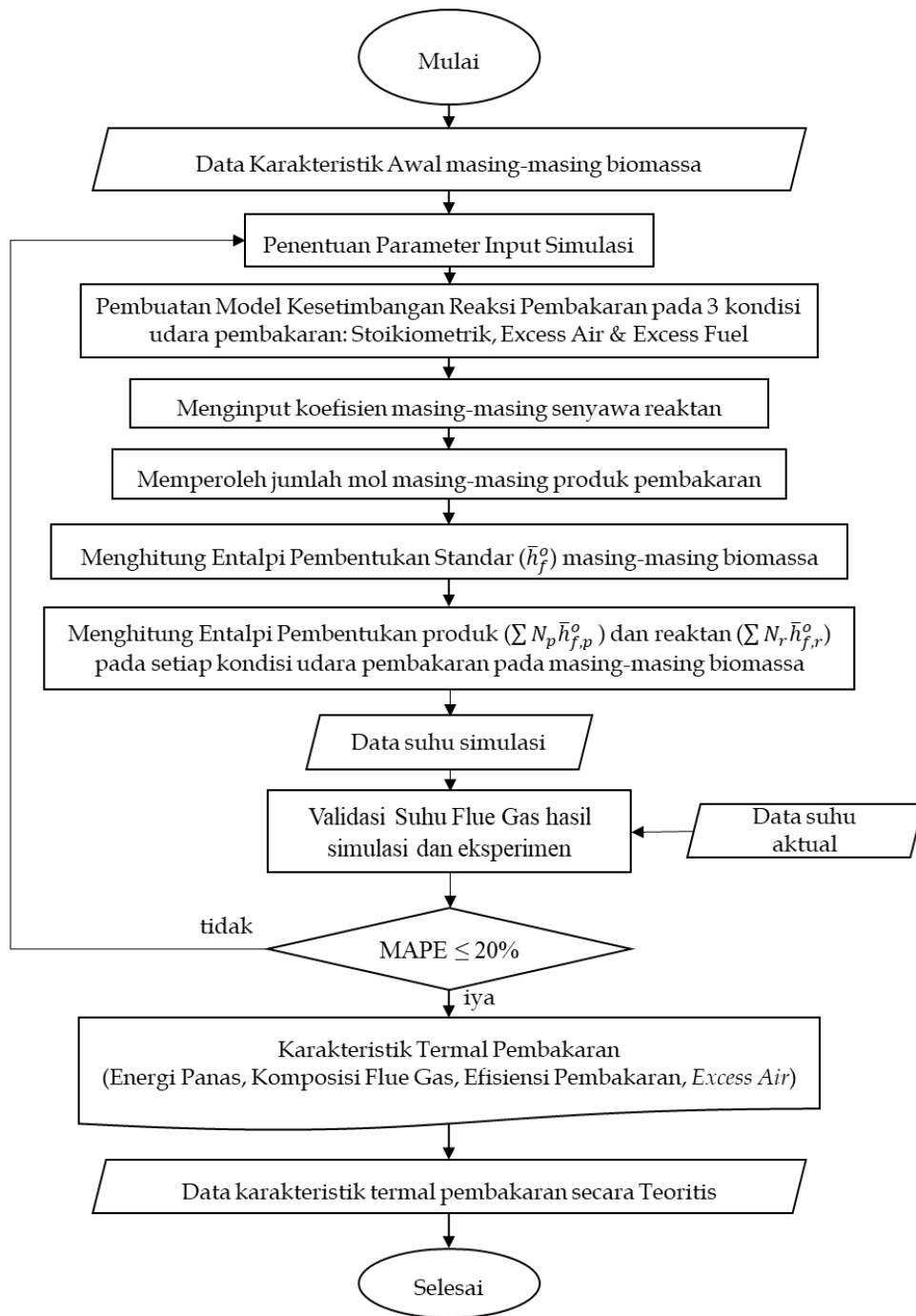
Keterangan: \*VM = 100-(MC+AC+FC); \*\*O = 100-(AC+C+H+N+S)

### Metode

Studi teoritis pembakaran dilakukan dengan mensimulasikan pembakaran gamal dan sengon menggunakan model reaksi kesetimbangan pembakaran pada 3 kondisi udara: stoikiometri ( $\lambda=1$ ), *excess air* ( $\lambda=1,1-2,5$ ) dan *excess fuel* ( $\lambda=0,50-0,99$ ) dengan interval percobaan 0,01 sehingga diperoleh 151 data numerik pada masing-masing biomassa. Simulasi pembakaran dilakukan secara numerik menggunakan perangkat Microsoft Excel 2020 dengan memodelkan pembakaran dalam sebuah tungku adiabatik dengan beberapa asumsi:

1. Simulasi Pembakaran dilakukan dalam tungku adiabatik sehingga kehilangan panas diabaikan.
2. Udara merupakan gas ideal yang terdiri atas 21% oksigen dan 79% nitrogen.
3. Udara dan bahan bakar input berada pada kondisi lingkungan standar dan kadar air kurang dari 15% saat masuk tungku pembakaran.
4. Kadar air bahan bakar yang digunakan adalah kadar air *as received* setelah bahan bakar dikeringkan secara konvensional.

5. Pemodelan untuk menghitung suhu flue gas keluar didasarkan pada tungku pembakaran biomassa yang dibuat oleh Yulianto et al (2017).
6. Pembakaran sempurna (stoikiometri) secara teoritis pada saat  $\lambda=1$ .
7. Flue gas keluaran dari pembakaran biomassa mengacu pada Paraschiv et al., (2020), terdiri dari:
  - a. Untuk *excess fuel* ( $\lambda < 1$ ): CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>
  - b. Untuk stoikiometri ( $\lambda = 1$ ): CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>
  - c. Untuk *excess air* ( $\lambda > 1$ ): CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>



Gambar 1. Diagram Alir dan Calculation Methods Simulasi Pembakaran

Adapun Parameter input yang digunakan dalam perhitungan model adalah sebagai berikut:

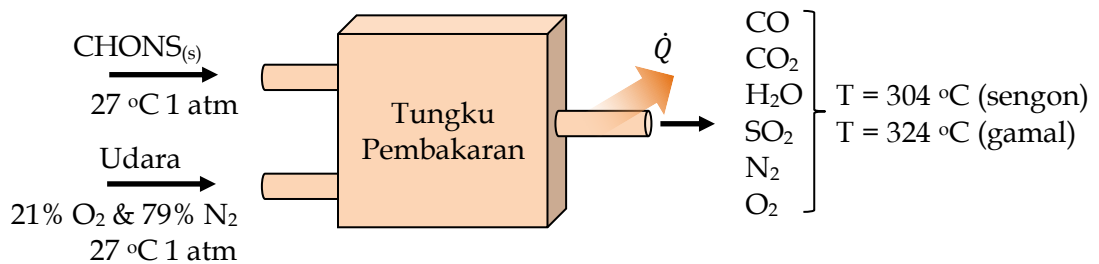
Tabel 2. Parameter Input Simulasi

Parameter	Nilai	Unit
Nilai Kalor (LHV)	16,3 (s); 16,7 (g)	MJ/kg
Suhu keluar flue gas ( $T_{fg}$ )*	304 (s); 324 (g)	°C
Suhu bahan bakar masuk	27	°C
Suhu udara masuk	27	°C
Tekanan Lingkungan	1	atm

keterangan : s = sengon; g = gamal; \* = data eksperimental

**Skema Pembakaran dalam Tungku**

Tungku pembakaran merupakan tempat berlangsungnya reaksi kimia antara bahan bakar dan udara pembakaran yang mengandung oksigen sehingga menghasilkan *fluegas* yang membawa panas dengan skema pada Gambar 2. Adapun suhu output flue gas sengon dan gamal merupakan hasil eksperimen menggunakan tungku yang sudah dibuat oleh Yulianto et al (2017) dengan nilai 304 °C (sengon) dan 324 °C (gamal).

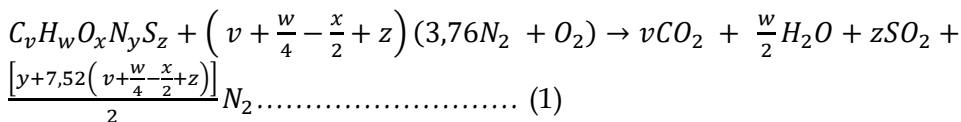


Gambar 2. Skema Pembakaran

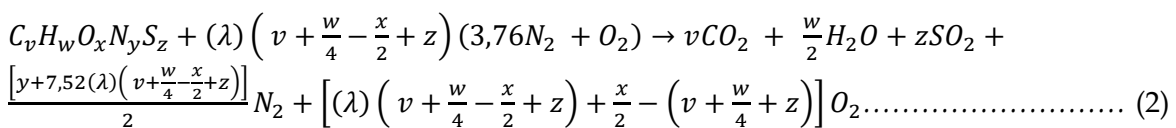
**Model Kestimbangan Pembakaran**

Model kesetimbangan pada proses pembakaran dibangun dengan mereaksikan komponen Karbon (C), Hidrogen (H), Oksigen (O), Nitrogen (N), dan Sulfur (S) yang terkandung dalam biomassa dengan udara pembakaran pada rasio ekuivalen ( $\lambda$ ) 0,5 - 2 menjadi produk-produk pembakaran pada *flue gas*.

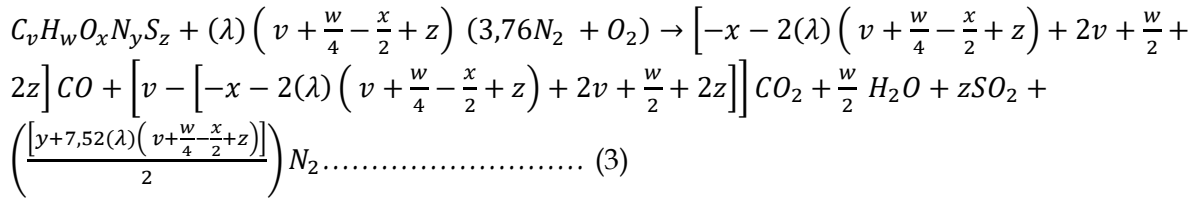
Model kesetimbangan pembakaran pada kondisi stoikiometri ( $\lambda=1$ ) (Boateng, 2016) :



Pada kondisi kelebihan udara (*excess air*) muncul gas O<sub>2</sub> pada *flue gas*, sehingga dari Persamaan 1 dapat diturunkan model kesetimbangan pembakaran dengan *excess air* ( $\lambda>1$ ):



Saat jumlah udara kurang dari stoikiometri (*excess fuel*), sebagian komponen karbon membentuk gas CO sehingga dapat diturunkan model kesetimbangan pembakaran dengan *excess fuel* ( $\lambda<1$ ) dari Persamaan 1:



Untuk menghitung AFR (*Air-fuel ratio*) stoikiometri maka perlu mengalikan setiap mol senyawa dengan massa molekul relatif (MR) nya pada persamaan:

$$AFR = \frac{\dot{m}_u}{\dot{m}_{bb}} = \frac{\left( v + \frac{w}{4} - \frac{x}{2} + z \right) (3,76+1) (MR_{udara})}{\dot{m}_{bb}} \dots\dots\dots (4)$$

- Di mana:
- v,w,x,y,z = mol masing-masing senyawa (kmol)
  - λ = rasio ekuivalen udara pembakaran
  - $\dot{m}_u$  = laju aliran massa udara pembakaran(kg/s)
  - $\dot{m}_{bb}$  = laju aliran massa bahan bakar (kg/s)
  - MR = massa molekul relatif

**Perhitungan Flue Gas yang Dihasilkan**

Beberapa *flue gas* yang dihasilkan dari pembakaran diantaranya CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> (Paraschiv et al., 2020) dapat diketahui laju aliran massa masing-masing produk yang terbentuk menggunakan persamaan:

$$\dot{m}_{prod} = \dot{N}_{prod} * MR_{prod} \dots\dots\dots (5)$$

Adapun laju aliran volume yang terbentuk dihitung menggunakan persamaan:

$$\dot{V}_{prod} = \frac{\dot{m}_{prod}}{\rho_{prod}} \dots\dots\dots (6)$$

Persentase volume produk yang dihasilkan dapat dicari menggunakan persamaan:

$$\%V_{prod} = \frac{\dot{V}_{prod}}{\dot{V}_{flue\ gas}} \cdot 100\% \dots\dots\dots (7)$$

- Di mana:
- $\dot{m}_{prod}$  = laju aliran massa produk *flue gas* (kg/jam)
  - $\dot{N}_{prod}$  = laju aliran mol produk *flue gas* (kmol/jam)
  - $\dot{V}_{prod}$  = laju aliran volume produk *flue gas* (m<sup>3</sup>/jam)
  - $\rho_{prod}$  = massa jenis produk *flue gas* (kg/m<sup>3</sup>)
  - %V<sub>prod</sub> = persentase produk *flue gas* (%)
  - $\dot{V}_{flue\ gas}$  = laju aliran volume *flue gas* (m<sup>3</sup>/jam)

**Prosedur Termodinamika Pada Perhitungan Energi Pembakaran**

Prosedur perhitungan energi pembakaran dalam simulasi ini mengacu pada Hukum-1 Termodinamika tentang kekekalan energi yang diekspresikan dalam persamaan (Çengel & Boles, 2015):

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{sistem} \dots\dots\dots (8)$$

Pada saat proses pembakaran, terjadi perubahan susunan kimia bahan bakar menjadi produk pembakaran dengan menyusun kembali atom dan elektron didalamnya sehingga

terjadi pelepasan energi yang biasa dikenal dengan entalpi pembentukan ( $\bar{h}_f^o$ ) (Moran et al., 2014). Energi panas yang dilepaskan dapat dinyatakan dengan laju energi panas yaitu jumlah energi panas ( $Q_{out}$ ) yang mengalir setiap laju aliran massa bahan bakar ( $\dot{m}_{BB}$ ) yang disimbolkan dengan  $\dot{Q}_{out}$  (Çengel & Boles, 2015) yang diperoleh dari persamaan:

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_{BB} \cdot Q_{out} \dots \dots \dots (9)$$

Nilai energi panas ( $Q_{out}$ ) dalam sebuah tungku diperoleh dari selisih entalpi pembentukan produk (p) dan reaktan (r) dalam persamaan:

$$Q_{out} = \sum N_p (\underbrace{\bar{h}_f^o + \bar{h}_{T_{out}} - \bar{h}_{T_{in}}}_p) - \sum N_r (\underbrace{\bar{h}_f^o + \bar{h}_{T_{in}} - \bar{h}_{T_{out}}}_r) \dots \dots \dots (10)$$

Entalpi sensibel gas produk      Entalpi sensibel gas reaktan

Nilai entalpi pembentukan standar biomassa ( $\bar{h}_{f,CHONS}^o$ ) dapat dihitung berdasarkan persamaan entalpi pembakaran ( $\bar{h}_c$ ) berikut:

$$\bar{h}_c = \sum N_p \bar{h}_{f,p}^o - \sum N_r \bar{h}_{f,r}^o \dots \dots \dots (11)$$

Dimana nilai mutlak dari entalpi pembakaran sama dengan nilai kalor bahan bakar ( $LHV_{CHONS}$ ) (Çengel & Boles, 2015) sehingga diperoleh persamaan:

$$|\bar{h}_c| = LHV_{CHONS} \dots \dots \dots (12)$$

Untuk mengkonversi nilai Higher Heating Value (HHV) menjadi Lower Heating Value (LHV) perlu memperhatikan panas laten penguapan air baik dari kandungan air bahan bakar (kadar air) maupun dari kandungan hidrogen dalam bahan bakar menggunakan persamaan:

$$LHV = HHV - (m * h_{fg})_{H_2O \text{ produk}} \dots \dots \dots (13)$$

Dengan mensubstraksi  $\sum N_r \bar{h}_{f,r}^o$  dari Persamaan 12 maka didapatkan persamaan untuk menghitung entalpi pembentukan biomassa CHONS:

$$\bar{h}_{f,CHONS}^o = \sum N_p \bar{h}_{f,p}^o - LHV_{CHONS} \dots \dots \dots (14)$$

Data entalpi sebagai input perhitungan energi panas disajikan pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Data entalpi senyawa pembakaran (Çengel & Boles, 2015; Kang & McKetta, 1961)

Senyawa	$\bar{h}_f^o$	$\bar{h}_{27^\circ C}$	$\bar{h}_{304^\circ C}$	$\bar{h}_{324^\circ C}$
	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kmol
CHONS (Biomassa)	[Persamaan 14]	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	8736	17178,1	17833
N <sub>2</sub>	0	8723	16872	17472,7
H <sub>2</sub> O <sub>(g)</sub>	-241820	9966	19570	20293,1
CO <sub>2</sub>	-393520	9431	21196,9	22138,1
SO <sub>2</sub>	-296800	-446,6	38537,9	41351,4
CO	-110530	8723	16610,4	17519,8

Energi berguna ( $\dot{Q}_g$ ) merupakan energi yang dapat dimanfaatkan dari tungku, diperoleh dari persamaan:

$$\dot{Q}_g = \dot{Q}_{out} \cdot \eta_T \dots \dots \dots (15)$$

Suhu flue gas yang dihasilkan diperoleh dari persamaan panas sensible udara berikut:

$$T_{out} = \left( \frac{\dot{Q}_g}{\dot{m}_u \cdot c_{p_u}} \right) + T_{in} \dots\dots\dots (16)$$

Efisiensi pembakaran dapat dicari menggunakan persamaan:

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}_{BB} \cdot HHV} \dots\dots\dots (17)$$

Di mana:

- $E_{in} - E_{out}$  = perpindahan energi melalui panas, kerja dan massa (kJ)
- $\Delta E_{sistem}$  = Perubahan energi (kJ)
- $\dot{Q}_{out}$  = Laju energi panas (kW)
- $Q_{out}$  = Energi panas (kJ)
- $t$  = waktu pembakaran (s)
- $N$  = jumlah mol senyawa (kmol)
- $\bar{h}_f^\circ$  = Entalpi pembentukan standar (kJ/kmol)
- $\bar{h}$  = Entalpi pembentukan pada suhu T
- $\bar{h}_c$  = Entalpi pembakaran (kJ/kg)
- $LHV_{CHONS}$  = Lower Heating Value (kJ/kg)
- $\eta_c$  = Efisiensi pembakaran (%)
- $\eta_T$  = Efisiensi tungku (%)
- $\dot{m}_{BB}$  = Laju bahan bakar (kg/s)
- $\dot{m}_u$  = Laju udara pembakaran (kg/s)
- $m_{H_2O}$  = massa air yang diuapkan (kg)
- $h_{fg_{H_2O}}$  = entalpi laten penguapan air (kJ/kg)
- $C_{p_u}$  = Kalor spesifik udara (kJ/kg°C)
- $T_{out}$  = Suhu flue gas (°C)
- $T_{in}$  = Suhu udara pembakaran (°C)
- $HHV$  = Higher Heating Value (kJ/kg)

**Prosedur Validasi Simulasi Pembakaran**

Hasil pengamatan suhu flue gas pembakaran digunakan untuk memvalidasi suhu flue gas yang dihasilkan dari simulasi menggunakan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) dengan persamaan:

$$MAPE = \sum_{t=1}^n \left| \frac{y_t - \hat{y}_t}{\hat{y}_t} \right| \times 100\% \dots\dots\dots (18)$$

Di mana:

- $y_t$  = nilai aktual pada periode t
- $\hat{y}_t$  = nilai forecast pada periode t

Standar eror dari validasi simulasi mengacu pada Sidqi & Sumitra (2019), disajikan dalam Tabel 4, apabila validasi bernilai baik maka model simulasi dapat digunakan untuk menentukan parameter-parameter lainnya.

**Tabel 4.** Standar MAPE

<i>MAPE</i>	Keterangan
<10%	Sangat Baik
10-20%	Baik
20-50%	Layak
>50%	Buruk



## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Studi Teoritis Proses Pembakaran Biomassa

Proses pembakaran biomassa melibatkan reaksi kimia antara setiap unsur C, H, O, N dan S yang terkandung didalam gamal dan sengon dengan udara yang menghasilkan gas-gas produk pembakaran dan energi panas. Rumus kimia dari gamal dan sengon dibangkitkan untuk membangun model pembakaran dan menghitung kebutuhan udara pembakaran (AFR) serta memprediksi flue gas dan energi panas yang dihasilkan (Paraschiv et al., 2020) Jumlah udara yang dibutuhkan untuk berlangsungnya reaksi pembakaran dinyatakan dalam perbandingan antara udara-bahan bakar (AFR) yang diperoleh dari Persamaan 4 disajikan pada Tabel 5.

**Tabel 5.** Rumus Kimia Biomassa

Tanaman Energi	Rumus Kimia (kmol/kg)	AFR <sub>stoikiometri</sub> (kg/kg)
Gamal	$C_{0,0407}H_{0,0502}O_{0,0268}N_{0,0011}S_{0,0000813}$	5,57
Sengon	$C_{0,0419}H_{0,0504}O_{0,0251}N_{0,0011}S_{0,0000625}$	5,74

Nilai AFR kayu gamal dan sengon tidak berbeda jauh dengan nilai AFR pada kayu *Eucalyptus* yang memiliki kandungan CHONS serupa (Nega et al., 2022). Pada kondisi stoikiometri, semua komponen CHONS pada biomassa bereaksi dengan oksigen membentuk  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$ ,  $N_2$  (*inert*) serta tidak ada oksigen yang tersisa didalam *flue gas* yang disajikan pada Tabel 6.

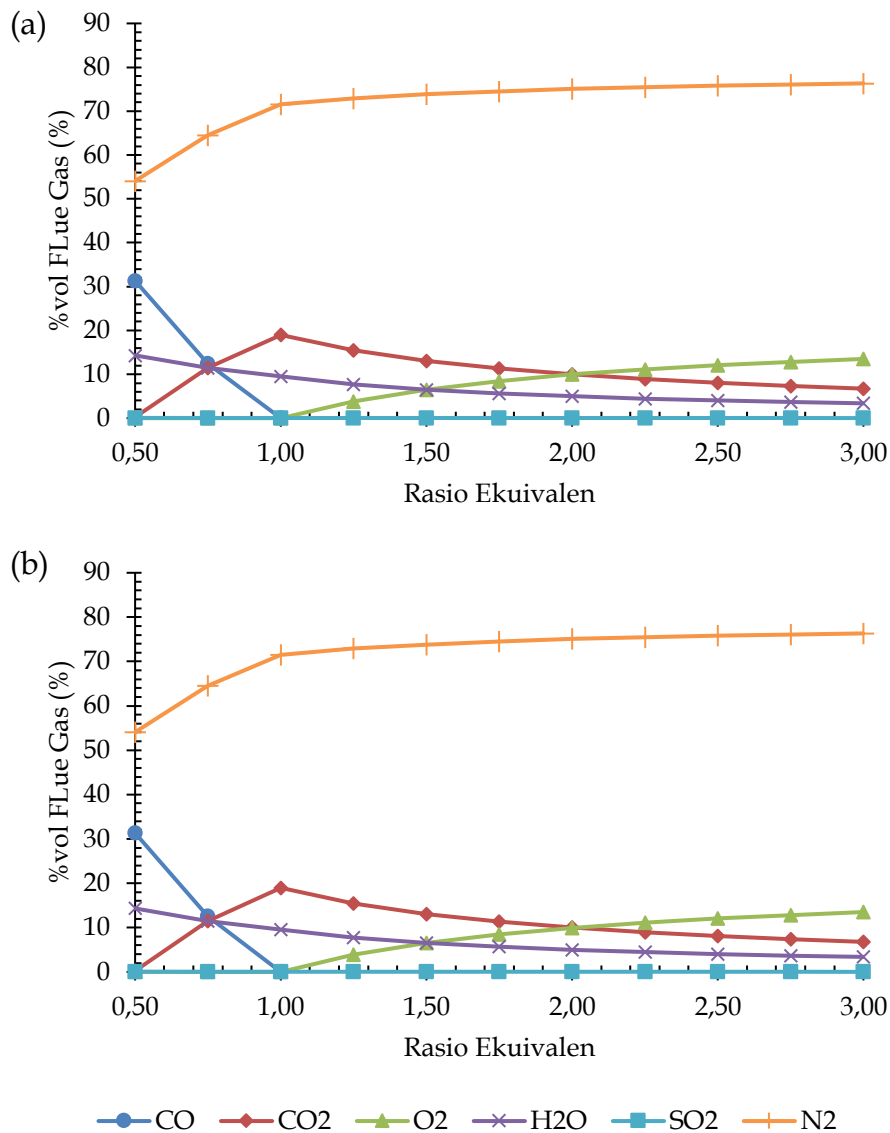
**Tabel 6.** Produk Pembakaran Pada Kondisi Stoikiometri

Produk Pembakaran	Reaksi	Jumlah Produk (kmol)	
		Gamal	Sengon
$CO_{2(g)}$	$C_{(s)}+O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$	0,04070	0,0419
$H_2O_{(g)}$	$H_{2(g)}+\frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(g)}$	0,02510	0,0252
$SO_{2(g)}$	$S_{(s)}+O_{2(g)} \rightarrow SO_{2(g)}$	0,00008	0,0001
$N_{2(g)}$	$N_{2(g)} \rightarrow N_{2(g)}$	0,15228	0,1570

Jumlah produk yang disajikan pada Tabel 6 diperoleh dari persamaan pembakaran stoikiometri pada Persamaan 1. Pembakaran pada kondisi stoikiometri tidak menghasilkan gas CO sebagai indikator pembakaran belum sempurna maupun gas  $O_2$  sebagai indikator udara berlebih sehingga tidak disajikan dalam Tabel 6. Aktualnya, pembakaran sempurna pada saat kondisi stoikiometri hampir tidak dapat dicapai dikarenakan beberapa faktor seperti pencampuran udara-bahan bakar, kinerja tungku dan kondisi lingkungan (Farahbod et al., 2014) sehingga diperlukan tambahan suplai oksigen untuk menghilangkan gas CO yang terbentuk dan meningkatkan efisiensi pembakaran (Elorf & Sarh, 2019). Perlu diperhatikan bahwa penambahan oksigen dalam sistem yang terlalu banyak akan menghasilkan gas  $O_2$  dan  $N_2$  yang akan menyerap panas hasil pembakaran sehingga menurunkan efisiensi pembakaran (Fan et al., 2021).

### Komposisi Flue Gas

Gambar 3 menunjukkan komposisi flue gas dari pembakaran gamal, dan sengon berdasarkan kesetimbangan reaksi pembakaran. Komposisi flue gas pada biomassa gamal, dan Sengon identik satu sama lain. Hal ini dikarenakan komposisi kimia pada ketiga biomassa tidak jauh berbeda (Tabel 1).



Gambar 3. Komposisi Flue Gas pada: (a) Gamal dan (b) Sengon

Tren komposisi flue gas akibat penambahan udara pembakaran menunjukkan fenomena sebagai berikut: pada saat kondisi *excess fuel* ( $\lambda < 1$ ) gas CO terbentuk akibat pembakaran yang tidak sempurna, jumlah oksigen dalam tungku tidak cukup untuk mengubah semua komponen karbon menjadi CO<sub>2</sub>, sehingga sebagian menjadi gas CO, gas yang sering dijumpai dalam proses gasifikasi (Asadullah, 2014). Gas ini merupakan gas yang dapat terbakar ketika bereaksi dengan udara (Majstorović et al., 2020) yang disebut juga *syngas* (Ciccone et al., 2024). Oleh karena itu kehadiran gas ini menandakan proses pembakaran belum sepenuhnya selesai atau belum sempurna. Penambahan oksigen dalam udara pembakaran berangsur menurunkan konsentrasi CO dan meningkatkan konsentrasi CO<sub>2</sub> (Deraman et al., 2019).

Pada saat kondisi stoikiometri ( $\lambda = 1$ ), gas CO sudah tidak ditemukan didalam flue gas dan seluruh karbon bereaksi dengan oksigen menjadi CO<sub>2</sub>, menunjukkan pembakaran yang sempurna. Penambahan udara secara terus menerus mengakibatkan pembakaran memasuki kondisi *excess air* ( $\lambda > 1$ ) dimana pada kondisi ini CO<sub>2</sub> tidak diproduksi lagi akibat sudah tidak ada lagi karbon yang dapat dibakar dan oksigen dapat dijumpai pada flue gas (Vallero, 2019).

Fenomena tersebut mengakibatkan konsentrasi CO<sub>2</sub> berangsur menurun seiring penambahan *excess air*.

Gas N<sub>2</sub> bersifat *inert* sehingga dengan penambahan udara hanya akan meningkatkan konsentrasinya dalam flue gas. SO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O berdasarkan model pembakaran pada Persamaan 1, 2 dan 3 hanya dipengaruhi oleh jumlah mol sulfur dan hidrogen dalam biomassa sehingga memiliki volume dalam flue gas yang konstan. Penambahan udara pembakaran akan berangsur menurunkan konsentrasi SO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O (Tan et al., 2014). Konsentrasi SO<sub>2</sub> yang terbentuk dalam flue gas sangat kecil (konsentrasi maksimal pada gamal 0,06% dan sengon 0,05%) sehingga dalam grafik posisi SO<sub>2</sub> mendekati 0.

### Excess Air Optimum

Secara aktual, hampir tidak mungkin sebuah pembakaran mencapai puncak efisiensinya saat  $\lambda = 1$  dikarenakan beberapa faktor seperti kondisi pencampuran udara-bahan bakar, kinerja tungku dan kondisi lingkungan sehingga masih terbentuk gas CO dalam flue gas (Farahbod et al., 2014). Penambahan *excess air* dilakukan untuk melanjutkan pembakaran gas CO menjadi CO<sub>2</sub> sehingga didapatkan peningkatan efisiensi pembakaran akibat peningkatan persentase volume CO<sub>2</sub>. Menurut Vallero (2019) dan The Engineering ToolBox, (2003a), CO<sub>2</sub> adalah indikator efisiensi pembakaran dimana semakin meningkat persentase volume CO<sub>2</sub> dalam flue gas maka semakin meningkat efisiensinya. Untuk mendapatkan persentase volume CO<sub>2</sub> yang maksimum, dibutuhkan *excess air* sejumlah tertentu. TSI (2004) juga menjelaskan bahwa penggunaan bahan bakar yang paling efektif terjadi saat konsentrasi CO<sub>2</sub> dalam flue gas maksimum. Hal ini terjadi saat jumlah O<sub>2</sub> tercukupi untuk mengkonversi seluruh karbon dalam bahan bakar menjadi CO<sub>2</sub>, dalam artian seluruh oksigen habis bereaksi dengan karbon. Dari pernyataan tersebut dapat disintesis bahwa ketika terdapat bahan bakar yang memiliki persentase volume CO<sub>2</sub> yang sama, maka memungkinkan bahwa bahan bakar tersebut memiliki kebutuhan O<sub>2</sub> dalam persentase yang sama untuk mencapai pembakaran yang efisien. Kebutuhan *excess air* dapat diprediksi dengan membandingkan konsentrasi CO<sub>2</sub> bahan bakar yang akan dicari dengan konsentrasi CO<sub>2</sub> bahan bakar yang telah diketahui *excess air*nya. Tabel 7 menyajikan persentase volume CO<sub>2</sub> maksimum dan *excess air* optimum saat kondisi stoikiometri pada berbagai jenis bahan bakar: gas alam, propana butana, bahan bakar minyak, batubara bituminous dan antrasit dari Vallero (2019) dan The Engineering ToolBox, (2003b) serta kayu gamal dan sengon dari perhitungan simulasi.

**Tabel 7.** Persentase volume CO<sub>2</sub> dan *excess air* optimum pada beberapa bahan bakar yang telah diketahui

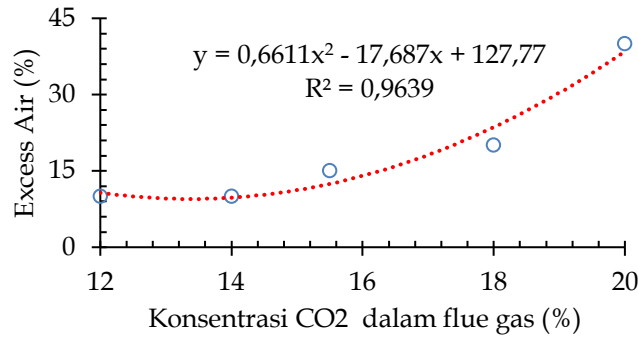
	Gas Alam	Propane Butane	BB Minyak	Batubara Bitumen	Gamal	Sengon	Batubara Antrasit
Vol CO <sub>2</sub> (%)*	12	14	15,5	18	18,96 <sup>a</sup>	18,99 <sup>a</sup>	20
<i>Excess air</i> (%) **	10	10	15	20	-	-	40

\* : Vallero (2019)

\*\* : (The Engineering ToolBox, 2003b)

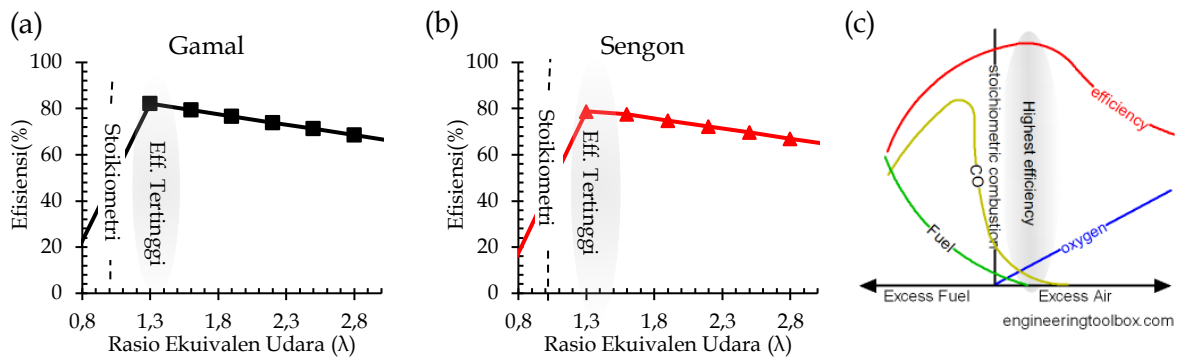
a : data simulasi pada kondisi stoikiometri

Persentase volume CO<sub>2</sub> pada pembakaran kayu gamal dan sengon berada diantara batubara bituminous dan antrasit. Berdasarkan data pada Tabel 7 maka dapat digambarkan grafik hubungan antara persentase CO<sub>2</sub> yang dihasilkan selama pembakaran dengan *excess air* yang dibutuhkan untuk mencari kebutuhan *excess air* pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Hubungan antara %CO<sub>2</sub> dengan kebutuhan %Excess air

Persamaan regresi pada gambar 4 memiliki error yang sangat rendah sehingga dapat digunakan untuk menentukan *excess air* optimum pada pembakaran gamal dan sengon. Dengan asumsi kondisi tungku pembakaran dan operasi pembakaran yang sama dengan The Engineering ToolBox (2003a) serta tidak ada gas O<sub>2</sub> yang terbentuk di flue gas (pembakaran sempurna), maka diperoleh *excess air* pada gamal dan sengon masing-masing 30% atau  $\lambda=1,3$ . *Excess air* optimum menunjukkan kondisi udara pembakaran saat efisiensi pembakaran maksimum, artinya terdapat pergeseran kurva efisiensi pembakaran dari yang awalnya secara teoritis efisiensi pembakaran maksimum terjadi saat  $\lambda = 1$  namun akibat faktor-faktor yang telah disebutkan Farahbod et al., (2014) efisiensi tertinggi pada gamal dan sengon masing-masing bergeser ke  $\lambda=1,3$ . Hal ini sesuai dengan pernyataan Nussbaumer, (2003) bahwa nilai *excess air* pada proses pembakaran biomassa yang memungkinkan berada pada rentang  $\lambda = 1,2 - 1,5$ . Sangat jarang penggunaan *excess air* pada  $\lambda > 2$ . Wang et al., (2015) memperoleh efisiensi pembakaran optimum pada *hardwood* menggunakan 30% *excess air* atau  $\lambda = 1,3$ .



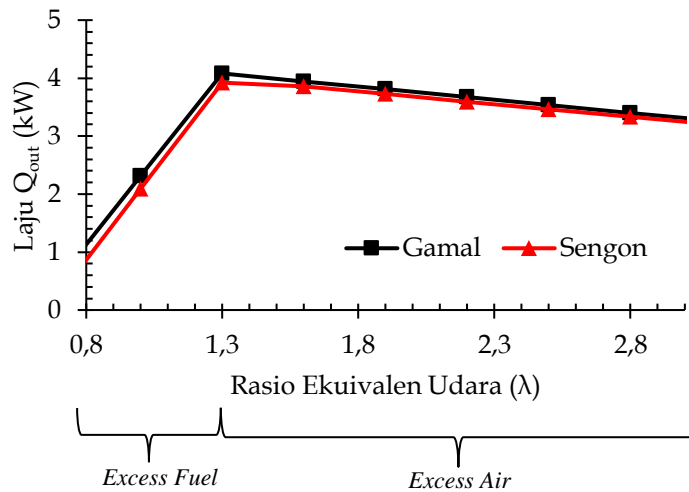
Gambar 5. Kurva Efisiensi Pembakaran Pada Kondisi Aktual (a) Gamal (b) Sengon, (c) Kurva Efisiensi Pembakaran Aktual menurut Vallero (2019)

Gambar 5a dan 5b menunjukkan grafik hubungan penggunaan udara pembakaran yang dinyatakan dalam rasio ekuivalen dengan efisiensi pembakaran yang dihasilkan pada gamal dan sengon dengan nilai efisiensi maksimum gamal 82,16% dan sengon 80,04%. Konsentrasi CO<sub>2</sub> pada *flue gas* memiliki hubungan erat dengan efisiensi pembakaran yang dihasilkan (Antar & Robert, 2024; Ercan et al., 2016). Namun terdapat penyesuaian dari pergeseran kurva efisiensi akibat penggunaan *excess air* sehingga puncak dari efisiensi tidak berada pada konsentrasi CO<sub>2</sub> tertinggi ( $\lambda=1$ ) melainkan saat mencapai *excess air* optimum, namun penambahan udara berlebih secara terus menerus setelah *excess air* optimum akan berangsur-angsur menurunkan efisiensi pembakaran (Vallero, 2019). Pengurangan udara pembakaran dari kondisi optimum juga akan berdampak pada penurunan nilai efisiensi pembakaran sebagian bahan bakar belum terbakar secara sempurna yang ditandai dengan

terbentuknya gas CO (Çengel & Boles, 2015), sedangkan penambahan udara diatas kondisi optimum akan meningkatkan konsentrasi O<sub>2</sub> yang berakibat banyak panas yang hilang dikarenakan oksigen berlebih tidak berperan dalam proses pembakaran yang mengurangi energi panas yang dihasilkan (Munir et al., 2014). Simulasi numerik yang dilakukan telah mampu menggambarkan bagaimana dampak dari penggunaan udara bahan bakar terhadap efisiensi pembakaran yang dihasilkan. Secara umum, kayu gamal memiliki efisiensi pembakaran yang lebih tinggi dibandingkan sengon walaupun dengan selisih yang tidak berbeda jauh. Walaupun begitu, pemilihan bahan bakar dengan efisiensi lebih tinggi dalam skala besar akan memberikan keuntungan dalam penghematan energi.

**Laju Energi Panas**

Secara teoritis, energi panas yang dihasilkan dari pembakaran ditentukan dari selisih antara jumlah entalpi dari reaktan dan produk. Nilai entalpi pembentukan standar ( $\bar{h}_{f,CHONS}^o$ ) dari reaktan yang dalam hal ini gamal dan sengon dihitung menggunakan Persamaan 14 dan diperoleh masing-masing -45.499,11 kJ/kmol dan -52.886,34 kJ/kmol. Nilai (-) pada entalpi menunjukkan bahwa senyawa tersebut melepaskan panas (eksoterm). Nilai ini digunakan untuk menghitung laju energi panas yang dihasilkan menggunakan Persamaan 10. Hasil perhitungan laju energi panas yang dihasilkan pada masing-masing kondisi udara pembakaran disajikan pada Gambar 6.



**Gambar 6.** Laju Energi panas ( $\dot{Q}_{out}$ ) untuk setiap kg bahan bakar per jam

Laju energi panas maksimum yang dapat dilepaskan dari pembakaran gamal dan sengon per kg per jam berturut-turut adalah 4,08 kW dan 3,92 kW pada kondisi *excess air* optimum. Dalam hal ini, nilai kalor sangat menentukan besarnya energi panas yang dihasilkan (Aniszewska & Gendek, 2014). Nilai kalor (LHV) yang dikandung gamal lebih tinggi dibandingkan sengon (tabel 1) sehingga laju energi yang dihasilkan lebih besar. Nilai LHV digunakan sebagai acuan karena tidak memperhitungkan energi yang dilepaskan oleh kondensasi uap air yang terbentuk. Berbeda halnya kalau yang dijadikan acuan adalah nilai HHV, nilai ini sangat dipengaruhi oleh kandungan air dan hidrogen pada bahan bakar dikarenakan semakin banyak kandungan air dan hidrogen pada bahan bakar maka semakin banyak kebutuhan kalor laten penguapannya sehingga akan menurunkan nilai HHV nya (Komilis et al., 2014; Lee & Lau, 2017). Efek dari penambahan udara pembakaran pada kedua bahan bakar menunjukkan fenomena yang sama dengan efisiensi pembakarannya. Pada kondisi *excess fuel*, nilai energi panas menunjukkan tren kenaikan yang tajam hingga puncaknya terjadi saat *excess air* optimum yang diasumsikan pembakaran mendekati kondisi

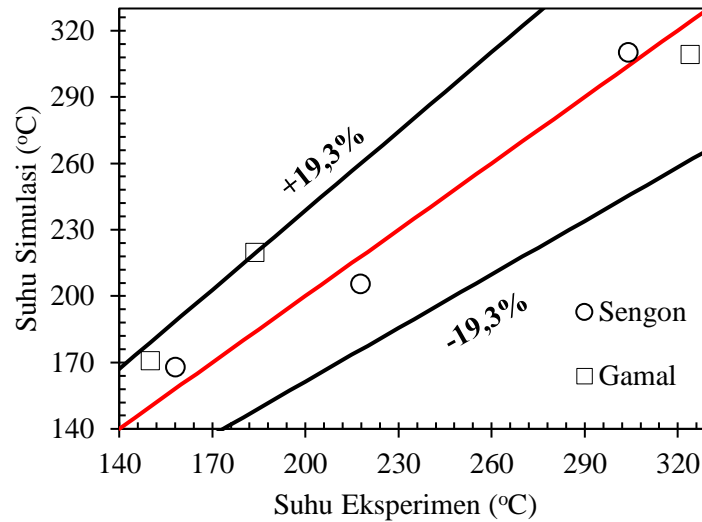
stoikiometri pada titik tersebut. Setelah melewati puncak *excess air* optimum, penambahan udara akan berangsur-angsur menurunkan energi panas secara perlahan. Hal ini sesuai dengan penelitian Shinde & Karunamurthy (2023) bahwa peningkatan *excess air* akan menurunkan daya yang dihasilkan secara perlahan. Dalam ilmu termodinamika, fenomena ini dipengaruhi oleh persentase kandungan flue gas yang terbentuk pada Gambar 3 dan besaran entalpi pada Tabel 3. Jumlah karbon dioksida akan konstan setelah semua karbon dalam bahan bakar habis, akibatnya persentasenya dalam *flue gas* menurun dan konsentrasi oksigen serta nitrogen meningkat seiring bertambahnya *excess air*. Hal ini mengakibatkan besarnya perubahan entalpi menurun dikarenakan nilai entalpi oksigen dan nitrogen lebih rendah daripada karbon dioksida. Nilai perubahan entalpi menunjukkan besarnya energi yang dapat diserap/dilepaskan (Nilsson & Niedderer, 2014) sehingga semakin rendah nilai perubahan entalpi (dalam pembakaran perubahan entalpi bersifat eksotermik) maka energi panas yang dapat dilepaskan semakin rendah.

### Validasi Model Simulasi Pembakaran

Model simulasi pembakaran yang telah dibangun divalidasi dengan data eksperimental untuk mengetahui persentase error yang terjadi. Parameter yang divalidasi adalah suhu keluaran flue gas secara simulasi dan eksperimen pada tungku yang dibuat oleh Yulianto et al., (2017) menggunakan 3 variasi laju bahan bakar (2,5; 3,75, dan 5 kg/jam) pada laju udara konstan (70 kg/jam) sehingga terbentuk 3 nilai AFR. Input target suhu pada simulasi disesuaikan dengan hasil suhu eksperimen masing-masing perlakuan. Suhu keluar *flue gas* secara simulasi diperoleh dari perhitungan menggunakan Persamaan 16 dengan memasukkan variabel efisiensi tungku yang digunakan diketahui sebesar 41,46% (Yulianto et al., 2017) untuk memperoleh kondisi yang sama dengan eksperimen. Hasil simulasi dan eksperimen pembakaran gamal dan sengon disajikan pada Tabel 8. Validasi berupa analisis error dari hasil simulasi dan eksperimen menggunakan MAPE pada Persamaan 18 disajikan pada Gambar 7. Hasil validasi pada pembakaran sengon dan gamal memiliki kesalahan yang rendah dengan nilai MAPE 8,55% dengan nilai error terbesar 19,3% yang disajikan pada Gambar 7, sehingga model pembakaran yang digunakan masuk ke kategori sangat baik hingga baik. Model pembakaran yang dibuat dapat digunakan untuk mensimulasikan parameter-parameter termal pembakaran yang lain.

**Tabel 8.** Suhu keluaran *flue gas* secara simulasi dan eksperimen

AFR	Suhu Flue Gas (°C)			
	Gamal		Sengon	
	Simulasi	Eksperimen	Simulasi	Eksperimen
14	308,96	324,23	310,04	304,09
19	219,42	183,9	205,36	217,8
28	170,49	150,19	167,79	158,19



Gambar 7. Validasi suhu flue gas simulasi dan eksperimen

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Kayu gamal, dan sengon merupakan tanaman energi yang mengandung unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S), dan dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan. Studi teoritis melalui simulasi numerik pembakaran telah mampu menunjukkan karakteristik termal pembakaran kayu gamal dan sengon yang merupakan komoditas tanaman energi pada penggunaan berbagai kondisi udara pembakaran. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa pada kondisi optimum, gamal memiliki karakteristik termal pembakaran yang lebih baik daripada sengon dengan efisiensi pembakaran 82,16% dan laju energi panas 4,08 kW sedangkan sengon 80,04% dan 3,92 kW. Walaupun kedua bahan bakar memiliki potensi untuk digunakan sebagai sumber energi, penggunaan kayu gamal dalam skala besar akan memberikan keuntungan dalam penghematan energi. Simulasi numerik pada berbagai kondisi udara pembakaran menunjukkan pengaruh yang signifikan dalam penambahan dan pengurangan udara dari kondisi stoikiometri yang dapat menurunkan performa pembakarannya. Kondisi terbaik didapatkan pada saat penambahan *excess air* dari gamal dan sengon masing-masing 30% (atau rasio ekuivalen 1,3). Hasil validasi model pembakaran yang digunakan diperoleh akurasi yang sangat baik dengan nilai MAPE 8,55% sehingga model pembakaran dapat digunakan untuk menentukan parameter-parameter pembakaran tanaman energi lainnya.

### Saran

Perlu dilakukan percobaan menggunakan bahan bakar dengan karakteristik awal yang nilai kalor yang berbeda signifikan untuk menunjukkan performa model pembakaran dengan lebih detail.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada Osaka Foundation melalui PPLH IPB University 2023 dengan nomor proyek PPJ-261200-232452 yang telah mendanai penelitian ini untuk mengevaluasi konsumsi energi spesifik dalam produksi *sawdust* dengan membandingkan proses produksi 4 langkah dan 2 langkah, serta melanjutkan penggunaan *sawdust* kayu ini dalam produksi pelet dan penggunaannya sebagai bahan bakar energi dalam Sistem Siklus Rankine Organik

(ORC). Terimakasih juga kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) Indonesia yang telah memberikan beasiswa kepada penulis pertama.

## PENDANAAN

Penelitian ini didanai oleh Osaka Foundation melalui PPLH IPB University 2023 dengan nomor proyek PPJ-261200-232452 untuk mengevaluasi konsumsi energi spesifik dalam produksi *sawdust* dengan membandingkan proses produksi 4 langkah dan 2 langkah, serta melanjutkan penggunaan *sawdust* kayu ini dalam produksi pelet dan penggunaannya sebagai bahan bakar energi dalam Sistem Siklus Rankine Organik (ORC).

## CONFLICT OF INTEREST

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dengan pihak mana pun. Pemberi dana tidak memiliki peran dalam desain penelitian; dalam pengumpulan, analisis, atau interpretasi data; dalam penulisan naskah; atau dalam keputusan untuk mengumumkan hasil penelitian. Penulis menyatakan bahwa artikel ilmiah ini bebas dari plagiarisme.

## DAFTAR REFERENSI

- Al-Arkawazi, S. A. F. (2019). Analyzing and predicting the relation between air-fuel ratio (AFR), lambda ( $\lambda$ ) and the exhaust emissions percentages and values of gasoline-fueled vehicles using versatile and portable emissions measurement system tool. *SN Applied Sciences*, 1(11), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1392-5>
- Ang, T., Salem, M., Kamarol, M., Shekhar, H., Alhuyi, M., & Prabakaran, N. (2022). A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions. *Energy Strategy Reviews*, 43(November 2021), 100939. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100939>
- Aniszewska, M., & Gendek, A. (2014). Comparison of heat of combustion and calorific value of the cones and wood of selected forest trees species. *Forest Research Papers*, 75(3), 231-236. <https://doi.org/10.2478/frp-2014-0022>
- Antar, E., & Robert, E. (2024). Thermodynamic analysis of small-scale polygeneration systems producing natural gas, electricity, heat, and carbon dioxide from biomass. *Energy*, 290(June 2023), 130278. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130278>
- Asadullah, M. (2014). Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 201-215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.074>
- Becker, S., Bouzdine-chameeva, T., & Jaegler, A. (2020). The carbon neutrality principle: A case study in the French spirits sector. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122739. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122739>
- Boateng, A. A. (2016). Combustion and Flame. In *Rotary Kilns* (pp. 107-143). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803780-5.00006-x>
- BPS. (2023a). *Neraca Arus Energi Dan Neraca Emisi Gas Rumah Kaca Indonesia 2017-2021*. <https://www.bps.go.id/publication/2023/06/28/ccdf82fff5e589f7ec285169/neraca-arus-energi-dan-neraca-emisi-gas-rumah-kaca-indonesia-2017-2021.html>
- BPS. (2023b). *Neraca Energi Indonesia 2018-2022* (Vol. 25).
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Ciccone, B., Murena, F., Ruoppolo, G., Urciuolo, M., Brachi, P., Ciccone, B., Murena, F., Ruoppolo, G., Urciuolo, M., & Brachi, P. (2024). Methanation of syngas from biomass gasification: small-scale plant. *Applied Thermal Engineering*, 122901. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122901>
- Deraman, M. R., Abdul Rasid, R., Othman, M. R., & Suli, L. N. M. (2019). Co-gasification of



- coal and empty fruit bunch in an entrained flow gasifier: A process simulation study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 702(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/702/1/012005>
- Elorf, A., & Sarh, B. (2019). Excess air ratio effects on flow and combustion characteristics of pulverized biomass (olive cake). *Case Studies in Thermal Engineering*, 13(December 2018), 100367. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.100367>
- Ercan, U., Kallioğlu, M. A., Avcı, A. S., Karakaya, H., & Düz, H. (2016). Investigation of Combustion Efficiency in Flue Gases Batman City Example Investigation of Combustion Efficiency in Flue Gases : Batman City Example. *8th International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE), March*.
- Fan, H., Feng, J., Hu, W., Li, W., & Gao, J. (2021). Effect of excess air coefficient on the combustion characteristics of a multi-stage dual swirl burner. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2009/1/012076>
- Farahbod, F., Farahmand, S., Bagheri, N., & Bashi, S. M. (2014). Role of membrane in concentrate of oxygen: Experimental study of thermal efficiency of combustion process by concentrated oxygen. *Organic Chemistry An Indian Journal*, 10(7), 251-262. <https://www.tsijournals.com/articles/role-of-membrane-in-concentrate-of-oxygen-experimental-study-of-thermal-efficiency-of-combustion-process-by-concentrated-.pdf>
- Kang, T. L., & McKetta, J. J. (1961). Thermodynamic properties of sulfur dioxide. *AIChE Journal*, 7(3), 418-422. <https://doi.org/10.1002/aic.690070315>
- Kementerian ESDM. (2019). *Optimalkan Hutan Tanaman Energi, Pemerintah Dorong Pembangunan PLTBm di Pulau Halmahera*. Direktorat Jenderal EBTKE. <https://www.esdm.go.id/id/berita-unit/direktorat-jenderal-ebtke/optimalkan-hutan-tanaman-energi-pemerintah-dorong-pembangunan-pltbm-di-pulau-halmahera>
- Kementerian ESDM. (2023). *Capaian Kinerja Sektor ESDM Tahun 2022*. 36.
- Komilis, D., Kissas, K., & Symeonidis, A. (2014). Effect of organic matter and moisture on the calorific value of solid wastes: An update of the Tanner diagram. *Waste Management*, 34(2), 249-255. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.023>
- Krisnawati, H., Varis, E., Kallio, M., & Kanninen, M. (2011). *Paraserianthes falcataria* (L.) Nielsen: Ekologi, silvikultur dan produktivitas. In *Center for International Forestry Research*. <https://doi.org/10.17528/cifor/003482>
- Lee, J. S., & Lau, A. K. (2017). *Clarifying the uses of heating values*. 1-9. <https://doi.org/10.14288/1.0343474>
- Majstorović, A., Babić, V., & Todić, M. (2020). Carbon monoxide in the process of uncontrolled combustion - Occurrence, hazards and first aid. *Journal of Physics: Conference Series*, 1426(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1426/1/012008>
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2014). Fundamentals Of Engineering Thermodynamics. In *Journal of Engineering Education* (Vol. 83, Issue 4). <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.1994.tb00126.x>
- Munir, A., Alvi, J. Z., Qasim, S., & Ghafoor, A. (2014). Performance evaluation of a biomass boiler on the basis of heat loss method and total heat values of steam. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 51(1), 209-215.
- Nega, T., Habtu, N. G., Tesfaye, A., Melesse, G. T., & Aswossie, E. (2022). Biomass energy conversion in a gasifier for injera baking mitad application. *Heliyon*, 8(12), e12128. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12128>
- Nilsson, T., & Niedderer, H. (2014). Undergraduate students' conceptions of enthalpy, enthalpy change and related concepts. *Chemistry Education Research and Practice*, 15(3), 336-353. <https://doi.org/10.1039/c2rp20135f>
- Nussbaumer, T. (2003). *Combustion and Co-combustion of Biomass : Fundamentals , Technologies , and Primary Measures for Emission Reduction* †. 1510-1521.
- Paraschiv, L. S., Serban, A., & Paraschiv, S. (2020). Calculation of combustion air required for

- burning solid fuels (coal / biomass / solid waste) and analysis of flue gas composition. *Energy Reports*, 6(September), 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.016>
- Rusolono, T., Asycarya, D., & Lindboe, H. H. (2018). Biomass for Energy Prefeasibility Study. *Danida: Enviromental Support Programme*, 1–93. [www.eaea.dk](http://www.eaea.dk)
- Shinde, B. J., & Karunamurthy. (2023). Effect of *excess air* ratio and ignition timing on performance , emission and combustion characteristics of high speed hydrogen engine. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1161/1/012006>
- Sidqi, F., & Sumitra, I. D. (2019). Forecasting Product Selling Using Single Exponential Smoothing and Double Exponential Smoothing Methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 662(3). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/662/3/032031>
- Tan, L., Li, S., Li, W., SHou, E., & Lu, Q. (2014). Effects of Oxygen Staging and Excess Oxygen on O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Combustion with a High Oxygen Concentration in a Circulating Fluidized Bed. *Energy and Fuels*, 28(3), 2069–2075. <https://doi.org/dx.doi.org/10.1021/ef500051c>
- The Engineering ToolBox. (2003a). *Combustion Efficiency and Excess Air*. [https://www.engineeringtoolbox.com/boiler-combustion-efficiency-d\\_271.html](https://www.engineeringtoolbox.com/boiler-combustion-efficiency-d_271.html)
- The Engineering ToolBox. (2003b). *Optimal Combustion Processes - Fuel vs. Excess Air*. [https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-combustion-efficiency-d\\_167.html](https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-combustion-efficiency-d_167.html)
- TSI. (2004). *Combustion Analysis Basics: An Overview of Measurements, Methods and Calculctions Used in Combustion Analysis*. <https://tsi.com/getmedia/02417ee5-cccc-4dc7-80bc-f7f10924d20a/CA-basic-2980175?ext=.pdf>
- Vallero, D. A. (2019). Thermal reactions. In D. A. Vallero (Ed.), *Air Pollution Calculations* (pp. 207–218). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814934-8.00009-0>
- Wang, Y., Shao, Y., Darko, M., & Whalen, J. K. (2015). Exploring switchgrass and hardwood combustion on *excess air* and ash fouling / slagging potential : Laboratory combustion test and thermogravimetric kinetic analysis. *ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT*, 97, 409–419. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.070>
- Yulianto, M., Agustina, S. E., Hartulistiyoso, E., Nelwan, L. O., & Nurlela. (2017). Study of temperature characterization of agricultural waste in the development of stove for combine heat power. *AIP Conference Proceedings*, 1826. <https://doi.org/10.1063/1.4979247>