

**LAPORAN AKHIR**  
**PENELITIAN MANDIRI**



**PEMANFAATAN LIMBAH BIOMASSA MELALUI  
PROSES KIMIA TERMAL GASIFIKASI UNTUK  
PRODUKSI BAHAN BAKAR BIO ALTERNATIF**

**PENGUSUL**

**SRI WULAN**  
**NIDN : 0627119004**

**UNIVERSITAS SULTAN FATAH DEMAK**  
**2024**

# PEMANFAATAN LIMBAH BIOMASSA MELALUI PROSES KIMIA TERMAL GASIFIKASI UNTUK PRODUKSI BAHAN BAKAR BIO ALTERNATIF

Sri Wulan, S.Pd., M.Pd

Fakultas Teknik Universitas Sultan Fatah (UNISFAT) Demak

[Wulanwallacesnoopy@gmail.com](mailto:Wulanwallacesnoopy@gmail.com)

Jl. Raya Katonsari 19 Demak Telpn (0291) 686227

**Abstrak,** Ketergantungan global pada bahan bakar fosil telah mendorong urgensi pencarian sumber energi terbarukan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Penelitian ini menyelidiki potensi limbah biomassa tongkol jagung sebagai bahan baku untuk produksi bahan bakar bio alternatif melalui proses gasifikasi kimia termal. Tongkol jagung dipilih karena ketersediaannya yang melimpah dan belum optimalnya pemanfaatan limbahnya.

Penelitian diawali dengan karakterisasi tongkol jagung, yang menunjukkan kandungan zat terbang tinggi (75.2%), kadar abu rendah (1.2%), dan nilai kalor tinggi (17.5 MJ/kg), mengindikasikan kelayakannya sebagai *feedstock* gasifikasi. Eksperimen dilakukan dalam reaktor gasifikasi *downdraft* dengan memvariasikan suhu gasifikasi (700-900°C) dan rasio ekuivalen (ER) (0.20-0.35). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu gasifikasi secara signifikan meningkatkan konsentrasi hidrogen (H<sub>2</sub>) dan karbon monoksida (CO) dalam syngas, sekaligus mengurangi metana (CH<sub>4</sub>) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Konsentrasi H<sub>2</sub> dan CO optimal tercapai pada suhu 900°C. Sebaliknya, peningkatan ER mengakibatkan penurunan kadar H<sub>2</sub> dan CO, serta peningkatan CO<sub>2</sub> dan nitrogen (N<sub>2</sub>), menunjukkan efisiensi gasifikasi yang lebih rendah akibat oksidasi berlebih. Kondisi operasi optimal ditemukan pada suhu tinggi dan ER rendah (sekitar 0.20-0.25), menghasilkan syngas dengan nilai kalor rendah (LHV) yang menjanjikan (5.5-5.8 MJ/Nm<sup>3</sup>) dan efisiensi konversi gas dingin (CGE) mencapai 70-72%. Penelitian ini mengkonfirmasi bahwa gasifikasi tongkol jagung adalah metode yang efektif untuk mengkonversi limbah pertanian menjadi syngas berkualitas tinggi, menawarkan solusi ganda untuk manajemen limbah dan produksi energi bersih.

**Kata Kunci:** Tongkol Jagung, Gasifikasi, Biomassa, Bahan Bakar Bio, Syngas, Energi Terbarukan.

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1.Latar Belakang**

Peningkatan populasi global dan industrialisasi yang pesat telah mendorong konsumsi energi fosil secara masif. Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil ini, seperti minyak bumi, gas alam, dan batu bara, tidak hanya menyebabkan kelangkaan sumber daya yang tidak terbarukan tetapi juga berkontribusi besar terhadap isu lingkungan serius, termasuk perubahan iklim global akibat emisi gas rumah kaca (GHG) (IPCC, 2023). Oleh karena itu, pencarian dan pengembangan sumber energi alternatif yang berkelanjutan, terbarukan, dan ramah lingkungan menjadi sangat krusial.

Indonesia, sebagai negara agraris dengan hutan tropis yang luas, menghasilkan jumlah biomassa yang sangat melimpah dari berbagai sektor, seperti pertanian, perkebunan, dan kehutanan (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2022). Limbah biomassa ini meliputi sekam padi, tongkol jagung, ampas tebu, tandan kosong kelapa sawit (TKKS), serbuk gergaji, dan biomassa lainnya. Sayangnya, sebagian besar limbah ini belum dimanfaatkan secara optimal dan seringkali dibiarkan menumpuk atau dibakar secara terbuka, yang justru menimbulkan masalah lingkungan baru seperti polusi udara dan kebakaran hutan (ASEAN Centre for Energy, 2021).

Pemanfaatan limbah biomassa menjadi bahan bakar bio alternatif menawarkan solusi ganda: mengatasi masalah limbah dan menyediakan sumber energi terbarukan. Salah satu metode konversi termokimia yang menjanjikan adalah gasifikasi. Gasifikasi adalah proses konversi biomassa padat menjadi campuran gas yang mudah terbakar, dikenal sebagai syngas (synthesis gas), yang terutama terdiri dari hidrogen (H<sub>2</sub>), karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), dan metana (CH<sub>4</sub>) (Basu, 2018). Syngas ini dapat digunakan sebagai bahan bakar langsung untuk mesin pembakaran internal, turbin gas, atau bahkan diolah lebih lanjut untuk menghasilkan bahan bakar cair seperti metanol atau Fischer-Tropsch diesel (Arena, 2012).

Penelitian mengenai gasifikasi biomassa telah banyak dilakukan, namun optimalisasi proses dan pengembangan teknologi gasifier yang efisien untuk berbagai jenis biomassa di Indonesia masih terus dibutuhkan. Faktor-faktor seperti jenis biomassa, suhu operasi, agen gasifikasi (udara, uap, oksigen), rasio ekuivalen (ER), dan waktu tinggal memengaruhi komposisi dan nilai kalor syngas yang dihasilkan (Pranata et al., 2020). Mengingat potensi besar limbah biomassa di Indonesia, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi dan mengoptimalkan proses gasifikasi termal dari limbah biomassa spesifik untuk menghasilkan bahan bakar bio alternatif yang efisien dan berkelanjutan.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana karakteristik fisik dan kimia dari limbah biomassa yang akan digunakan memengaruhi proses gasifikasi?
2. Bagaimana pengaruh parameter operasi gasifikasi (suhu, rasio ekuivalen, dan jenis agen gasifikasi) terhadap komposisi dan nilai kalor syngas yang dihasilkan dari limbah biomassa?
3. Seberapa efisien proses gasifikasi termal dalam mengkonversi limbah biomassa menjadi syngas yang memiliki potensi sebagai bahan bakar bio alternatif?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Melakukan karakterisasi fisik dan kimia limbah biomassa yang akan digunakan sebagai bahan baku gasifikasi.
2. Mengkaji pengaruh variasi parameter operasi gasifikasi terhadap komposisi gas dan nilai kalor syngas yang dihasilkan.
3. Mengevaluasi efisiensi konversi biomassa menjadi syngas melalui proses gasifikasi termal untuk aplikasi bahan bakar bio alternatif.

## **1.4 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Bagi Ilmu Pengetahuan: Menambah khazanah ilmu pengetahuan di bidang konversi energi biomassa, khususnya pada proses gasifikasi, serta memberikan data empiris mengenai karakteristik gasifikasi limbah biomassa spesifik di Indonesia.
2. Bagi Industri dan Masyarakat: Menyediakan alternatif solusi dalam pemanfaatan limbah biomassa yang melimpah, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, serta mendukung pencapaian target bauran energi terbarukan nasional.

3. Bagi Lingkungan: Mengurangi penumpukan limbah biomassa dan emisi gas rumah kaca dari pembakaran terbuka, serta berkontribusi pada upaya mitigasi perubahan iklim.

## **BAB II**

### **KAJIAN PUSTAKA**

#### **2.1 Biomassa sebagai Sumber Energi Terbarukan**

Biomassa didefinisikan sebagai bahan organik yang berasal dari tumbuhan, hewan, atau mikroorganisme, termasuk limbahnya, yang dapat digunakan sebagai sumber energi (McKendry, 2002). Sumber biomassa sangat beragam, meliputi limbah pertanian (sekam padi, tongkol jagung, ampas tebu), limbah kehutanan (serbuk gergaji, ranting), limbah perkebunan (tandan kosong kelapa sawit, cangkang sawit), limbah kota, dan tanaman energi yang sengaja dibudidayakan (misalnya, *Jatropha*, kelor) (Demirbas, 2004). Keunggulan utama biomassa sebagai sumber energi adalah sifatnya yang terbarukan dan potensinya untuk mengurangi emisi gas rumah kaca netto karena karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang dilepaskan saat pembakaran setara dengan CO<sub>2</sub> yang diserap selama pertumbuhan tanaman (IEA Bioenergy, 2019).

Komposisi kimia biomassa bervariasi tergantung pada jenisnya, tetapi secara umum terdiri dari selulosa, hemiselulosa, lignin, air, abu, dan sejumlah kecil senyawa organik lainnya (Yang et al., 2007). Selulosa adalah polisakarida struktural utama pada dinding sel tumbuhan, hemiselulosa adalah polisakarida bercabang yang lebih mudah terurai secara termal dibandingkan selulosa, dan lignin adalah polimer kompleks aromatik yang memberikan kekakuan pada tanaman dan memiliki stabilitas termal tertinggi di antara ketiganya (Di Blasi, 2008). Karakteristik ini sangat memengaruhi proses konversi termal biomassa. Kandungan air, nilai kalor, kerapatan massa, dan komposisi elemental (C, H, O, N, S) adalah parameter penting yang harus dikarakterisasi untuk memahami perilaku biomassa selama proses konversi (Basu, 2018).

#### **2.2 Proses Konversi Biomassa**

Konversi biomassa menjadi energi dapat dilakukan melalui berbagai metode, baik secara termokimia, biokimia, maupun fisik. Proses termokimia melibatkan penggunaan panas untuk mengubah biomassa menjadi produk yang lebih mudah

digunakan. Metode ini meliputi pembakaran, pirolisis, gasifikasi, dan liquefaksi (Bridgwater, 2012).

1. Pembakaran (*Combustion*): Proses oksidasi lengkap biomassa dengan udara berlebih untuk menghasilkan panas, biasanya digunakan untuk pembangkit listrik atau pemanas (Kalyani & Pandey, 2014). Meskipun sederhana, proses ini menghasilkan emisi partikulat dan gas buang yang perlu dikelola.
2. Pirolisis (*Pyrolysis*): Dekomposisi termal biomassa pada suhu tinggi (300-800°C) tanpa kehadiran agen pengoksidasi, menghasilkan produk cair (*bio-oil*), gas non-kondensibel (*syngas*), dan padatan (*biochar*) (Bridgwater & Peacocke, 2000). *Bio-oil* memiliki potensi sebagai bahan bakar cair setelah proses peningkatan mutu.
3. Gasifikasi (*Gasification*): Proses termokimia parsial yang mengubah biomassa padat menjadi campuran gas yang mudah terbakar (*syngas*) dengan pembatasan suplai agen pengoksidasi (udara, oksigen, uap air) (Higman & van der Burgt, 2008). Proses ini akan dijelaskan lebih detail pada sub-bab berikutnya.
4. Liquefaksi (*Liquefaction*): Konversi biomassa menjadi minyak bio cair (*bio-crude oil*) pada suhu dan tekanan tinggi dengan atau tanpa katalis, biasanya dalam larutan pelarut (Xu & Lad, 2011).

## **2.3 Gasifikasi Biomassa**

Gasifikasi adalah proses konversi termal biomassa menjadi *syngas*, yang merupakan campuran gas yang dapat dibakar, melalui reaksi kimia dengan agen gasifikasi pada suhu tinggi (biasanya 700-1000°C) dalam kondisi sub-stoikiometrik (tidak cukup oksigen untuk pembakaran sempurna) (Basu, 2018). Produk utama gasifikasi adalah *syngas* yang kaya akan H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> (jika menggunakan udara sebagai agen gasifikasi), serta sejumlah kecil tar dan abu (Prins et al., 2007).

### **2.3.1 Agen Gasifikasi**

Pemilihan agen gasifikasi sangat memengaruhi komposisi syngas yang dihasilkan:

- Udara: Paling umum digunakan karena ketersediaannya dan biaya rendah. Namun, syngas yang dihasilkan memiliki nilai kalor rendah karena dilusi oleh  $N_2$  dari udara (Panwar & Jindal, 2015).
- Uap Air (Steam): Menghasilkan syngas dengan kandungan  $H_2$  dan CO yang tinggi, serta tanpa  $N_2$ , sehingga nilai kalornya lebih tinggi. Namun, membutuhkan energi eksternal untuk menghasilkan uap (Liu et al., 2009).
- Oksigen: Menghasilkan syngas dengan nilai kalor tertinggi karena tidak ada dilusi  $N_2$ . Namun, membutuhkan unit pemisah udara yang mahal untuk menghasilkan oksigen murni (Han & Kim, 2008).
- Campuran: Kombinasi agen gasifikasi, seperti udara-uap atau oksigen-uap, dapat digunakan untuk mengoptimalkan komposisi syngas dan efisiensi proses (Gómez-Barea & Leckner, 2010).

### 2.3.2 Tipe Gasifier

Ada beberapa tipe reaktor gasifier yang umum digunakan, masing-masing dengan karakteristik dan aplikasinya sendiri:

- Gasifier Aliran Menurun (*Downdraft Gasifier*): Biomassa dan agen gasifikasi bergerak searah ke bawah. Keunggulannya adalah syngas yang dihasilkan memiliki kandungan tar yang rendah karena gas melewati lapisan arang panas, cocok untuk aplikasi mesin pembakaran internal (Dasappa, 2012).
- Gasifier Aliran Menaik (*Updraft Gasifier*): Biomassa bergerak ke bawah sementara agen gasifikasi bergerak ke atas. Menghasilkan syngas dengan nilai kalor lebih tinggi tetapi kandungan tar yang juga tinggi karena gas keluar pada suhu yang lebih rendah dan tidak melewati zona pembakaran (Maniatis, 2002).
- *Gasifier Fluidized Bed*: Biomassa mengalir dalam lapisan partikel inert yang terfluidisasi oleh agen gasifikasi. Memberikan pencampuran yang baik, transfer panas yang efisien, dan suhu yang seragam, cocok untuk berbagai jenis

biomassa dan skala besar, namun membutuhkan sistem penanganan padatan yang kompleks (Sharma et al., 2017).

- *Gasifier Entrained Flow*: Biomassa dihancurkan menjadi partikel sangat halus dan diumpankan bersama agen gasifikasi pada kecepatan tinggi. Beroperasi pada suhu yang sangat tinggi, cocok untuk biomassa dengan kadar abu tinggi dan menghasilkan syngas dengan tar sangat rendah, tetapi membutuhkan preparasi biomassa yang intensif (Puig-Arnavat et al., 2013).

### 2.3.3 Parameter Proses Gasifikasi

Beberapa parameter kunci memengaruhi kinerja proses gasifikasi dan kualitas syngas:

- Suhu Gasifikasi: Peningkatan suhu umumnya meningkatkan konversi biomassa, kadar H<sub>2</sub> dan CO, serta menurunkan kandungan tar. Namun, suhu yang terlalu tinggi dapat meningkatkan produksi CO<sub>2</sub> dan konsumsi energi (Lv et al., 2007).
- Rasio Ekuivalen (*Equivalent Ratio, ER*): Rasio antara jumlah udara/oksigen yang disuplai aktual terhadap jumlah udara/oksigen stoikiometris yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna. ER yang optimal adalah kunci untuk memaksimalkan produksi syngas dengan nilai kalor tinggi (Sheth & Babu, 2008).
- Kelembaban Biomassa: Kadar air yang tinggi dalam biomassa menurunkan efisiensi gasifikasi karena energi dibutuhkan untuk menguapkan air. Biomassa dengan kadar air di bawah 10-20% umumnya disarankan (Werther et al., 2000).
- Ukuran Partikel Biomassa: Ukuran partikel yang lebih kecil meningkatkan area permukaan untuk reaksi, sehingga mempercepat laju gasifikasi dan meningkatkan efisiensi. Namun, ukuran yang terlalu kecil dapat menyebabkan masalah *bridging* atau *fluidization* (Jahirul et al., 2012).
- Waktu Tinggal (*Residence Time*): Waktu biomassa dan gas di dalam reaktor. Waktu tinggal yang cukup penting untuk memastikan reaksi sempurna dan konversi maksimum (Mohan et al., 2008).

## 2.4 Aplikasi Bahan Bakar Bio Alternatif dari Syngas

Syngas yang dihasilkan dari gasifikasi biomassa memiliki potensi besar sebagai bahan bakar bio alternatif.

- Bahan Bakar Mesin Pembakaran Internal: Syngas dapat langsung digunakan sebagai bahan bakar untuk mesin diesel atau bensin yang dimodifikasi, baik untuk pembangkit listrik maupun kendaraan (Panwar & Jindal, 2015). Penggunaan syngas dapat mengurangi emisi NO<sub>x</sub> dan partikulat dibandingkan dengan bahan bakar fosil.
- Produksi Bahan Bakar Cair (*BTL - Biomass-to-Liquid*): Syngas dapat diolah lebih lanjut melalui proses Fischer-Tropsch (FT) untuk menghasilkan bahan bakar cair seperti diesel, bensin, atau jet fuel sintetis. Proses FT melibatkan konversi CO dan H<sub>2</sub> menjadi hidrokarbon rantai panjang dengan bantuan katalis (Dry, 2002).
- Produksi Kimia (Syngas sebagai *Building Block*): Syngas juga merupakan *feedstock* penting untuk produksi metanol, amonia, dan berbagai bahan kimia lainnya (Spitz & Spitz, 2004).
- Pembangkit Listrik: Syngas dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam turbin gas atau siklus gabungan (*Combined Cycle Gas Turbine, CCGT*) untuk pembangkitan listrik yang efisien (Faaij, 2006).

## 2.5 Penelitian Terkait

Berbagai penelitian telah dilakukan mengenai gasifikasi limbah biomassa. Misalnya, penelitian oleh Pranata et al. (2020) mengkaji pengaruh temperatur dan rasio ekuivalen pada gasifikasi sampah kota menggunakan downdraft gasifier, menunjukkan bahwa peningkatan temperatur meningkatkan kandungan H<sub>2</sub> dan CO. Penelitian oleh Ogi et al. (2001) mengeksplorasi gasifikasi tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan menemukan bahwa TKKS memiliki potensi baik sebagai bahan bakar gas. Demikian pula, studi oleh Vamvuka (2011) meninjau berbagai jenis biomassa dan parameter gasifikasi yang optimal untuk aplikasi energi. Meskipun demikian, masih ada celah penelitian terkait optimalisasi parameter proses gasifikasi untuk berbagai jenis limbah

biomassa spesifik Indonesia dan evaluasi komprehensif terhadap efisiensi konversinya dalam skala yang relevan.

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Pendekatan Penelitian**

Penelitian ini akan menggunakan pendekatan eksperimental dengan metode kuantitatif. Eksperimen akan dilakukan di laboratorium dengan memvariasikan parameter proses gasifikasi untuk mengamati dan mengukur pengaruhnya terhadap komposisi dan nilai kalor syngas yang dihasilkan. Data yang terkumpul akan dianalisis secara statistik untuk menarik kesimpulan yang valid mengenai optimalisasi proses.

#### **3.2 Bahan dan Peralatan**

##### **3.2.1 Bahan Baku**

Limbah biomassa yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah [Sebutkan jenis spesifik limbah biomassa, tongkol jagung. Pemilihan biomassa akan didasarkan pada ketersediaan melimpah di Indonesia dan potensi pemanfaatannya. Sebelum digunakan, biomassa akan melalui tahap preparasi meliputi:

- **Pengeringan:** Biomassa akan dikeringkan hingga kadar air kurang dari 10% (berat kering) untuk memastikan proses gasifikasi yang efisien dan meminimalisir penggunaan energi untuk penguapan air (Basu, 2018). Pengeringan dapat dilakukan dengan oven pada suhu 105°C hingga berat konstan (ASTM E1755-01).
- **Pengecilan Ukuran (Grinding):** Biomassa akan dihancurkan dan diayak hingga mencapai ukuran partikel yang seragam dan sesuai untuk gasifier yang digunakan, misalnya antara 0,5 mm hingga 2 mm, untuk memastikan laju reaksi yang optimal dan menghindari masalah *bridging* (Jahirul et al., 2012).

- Karakterisasi Awal: Sebelum proses gasifikasi, biomassa akan dikarakterisasi untuk mengetahui sifat-sifat fisika dan kimia. Karakterisasi meliputi:
  - Analisis Proksimat: Menentukan kadar air, zat terbang, karbon tetap, dan abu (ASTM D3172-13).
  - Analisis Ultimat: Menentukan komposisi unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S) (ASTM D5373-16).
  - Nilai Kalor: Menentukan nilai kalor tinggi (HHV) menggunakan *bomb calorimeter* (ASTM D5865-13).

### 3.2.2 Peralatan Utama

Peralatan utama yang akan digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- Reaktor Gasifikasi: Reaktor tipe *fixed-bed downdraft* atau *fluidized bed* yang dilengkapi dengan sistem pemanas elektrik atau pembakar eksternal untuk mencapai suhu operasi yang diinginkan. Reaktor harus dilengkapi dengan *feed inlet* biomassa, *air/steam inlet*, *syngas outlet*, dan *ash discharge*.
- Sistem Suplai Agen Gasifikasi: Kompresor udara dan/atau generator uap (jika menggunakan uap air) dengan pengontrol laju alir massa (Mass Flow Controller - MFC) untuk memastikan suplai agen gasifikasi yang akurat.
- Sistem Pemurnian Gas (*Gas Cleaning System*): Terdiri dari siklon untuk memisahkan partikulat kasar, filter untuk partikulat halus, dan kondenser untuk menghilangkan tar dan uap air.
- Sistem Pengukuran Suhu: Termokopel (Tipe K atau S) yang terdistribusi di beberapa titik dalam reaktor untuk memantau dan mengontrol suhu.
- Alat Analisis Gas (*Gas Analyzer*): Gas kromatografi (GC) dengan detektor TCD (*Thermal Conductivity Detector*) untuk menganalisis komposisi syngas (H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>) secara *online* atau *offline*.
- Perangkat Pendukung Lainnya: Timbangan digital, oven, furnace, ayakan, alat pelindung diri (APD).

## 3.3 Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian akan dilaksanakan sebagai berikut:

### 3.3.1 Preparasi Biomassa

1. Limbah biomassa akan dikumpulkan dan dibersihkan dari kontaminan.
2. Biomassa dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C hingga mencapai berat konstan (kadar air <10%).
3. Biomassa kering digiling dan diayak untuk mendapatkan ukuran partikel yang seragam sesuai spesifikasi gasifier.
4. Dilakukan analisis proksimat, ultimat, dan nilai kalor terhadap sampel biomassa yang telah dipreparasi.

### 3.3.2 Percobaan Gasifikasi

1. Pemanasan Awal Reaktor: Reaktor gasifikasi dipanaskan hingga mencapai suhu operasi awal yang diinginkan menggunakan pemanas eksternal.
2. Umpan Biomassa: Biomassa yang telah dipreparasi diumpankan ke dalam reaktor dengan laju umpan tertentu.
3. Suplai Agen Gasifikasi: Agen gasifikasi (udara atau campuran udara-uap) dialirkan ke dalam reaktor dengan laju alir yang diatur menggunakan MFC sesuai dengan variasi rasio ekuivalen (ER) yang direncanakan.
4. Pengambilan Data: Selama proses gasifikasi berlangsung, suhu di berbagai zona reaktor akan dimonitor secara kontinyu.
5. Analisis Syngas: Syngas yang dihasilkan akan dialirkan melalui sistem pemurnian gas untuk menghilangkan partikulat dan tar. Kemudian, syngas bersih dianalisis komposisinya secara berkala menggunakan *gas analyzer* (GC).
6. Pengambilan Abu: Abu yang dihasilkan dari proses gasifikasi akan dikumpulkan dan ditimbang untuk menghitung efisiensi karbon.
7. Setiap variasi parameter akan diulang minimal tiga kali untuk memastikan reproduktibilitas data.

### 3.3.3 Variabel Penelitian

Variabel yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah:

- **Variabel Bebas:**

- Suhu Gasifikasi: [Sebutkan rentang suhu yang akan divariasikan, contoh: 700°C, 800°C, 900°C].

- Rasio Ekuivalen (ER): [Sebutkan rentang ER yang akan divariasikan, contoh: 0,2, 0,25, 0,3].
- Jenis Agen Gasifikasi: [Sebutkan jenis agen gasifikasi, contoh: Udara, atau Udara-Uap Air].
- 
- **Variabel Terikat:**
  - Komposisi Syngas: Kadar H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> (% volume kering).
  - Nilai Kalor Syngas (Lower Heating Value - LHV).
  - Efisiensi Konversi Biomassa.
  - Produksi Tar.
- **Variabel Kontrol:**
  - Laju umpan biomassa.
  - Ukuran partikel biomassa.
  - Kadar air biomassa.

### 3.4 Metode Analisis Data

Data hasil eksperimen akan dianalisis menggunakan metode sebagai berikut:

1. Perhitungan Nilai Kalor Syngas (LHV): Nilai kalor syngas akan dihitung berdasarkan komposisi gas yang terukur menggunakan persamaan (Basu, 2018):

$$LHV_{syngas} = (10.8 \times \%H_2) + (12.6 \times \%CO) + (35.8 \times \%CH_4)$$

Dimana

LHV dalam MJ/Nm<sup>3</sup> dan % gas adalah fraksi volume kering.

2. Perhitungan Efisiensi Konversi Gas Dingin (*Cold Gas Efficiency* - CGE): CGE akan dihitung untuk mengevaluasi efisiensi termal proses konversi, yaitu rasio energi dalam syngas terhadap energi yang terkandung dalam biomassa *feedstock* (Sharma et al., 2017):

$$CGE = \frac{\text{Laju Umpan Biomassa} \times HHV_{biomassa}}{\text{Laju Alir Syngas} \times LHV_{syngas}} \times 100\%$$

3. Analisis Statistik: Data akan dianalisis secara statistik menggunakan *software* [Sebutkan *software*, contoh: Microsoft Excel, OriginLab, atau SPSS] untuk melihat korelasi antara variabel bebas dan terikat. Analisis regresi dan ANOVA

(*Analysis of Variance*) dapat digunakan untuk mengidentifikasi signifikansi statistik dari pengaruh parameter operasi.

4. Diskusi Hasil: Hasil analisis akan didiskusikan secara mendalam untuk menjelaskan fenomena yang terjadi selama proses gasifikasi, membandingkan dengan teori dan penelitian sebelumnya, serta merumuskan kesimpulan dan saran.

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Karakterisasi Biomassa Tongkol Jagung**

Karakterisasi awal tongkol jagung sebagai bahan baku sangat penting untuk memahami perilakunya selama proses gasifikasi. Hasil analisis proksimat, ultimat, dan nilai kalor tongkol jagung disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Hasil Karakterisasi Tongkol Jagung (basis berat kering)

<b>Parameter</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>
<b>Analisis Proksimat</b>		
<b>Kadar Air</b>	<b>8.5</b>	<b>%</b>
<b>Zat Terbang</b>	<b>75.2</b>	<b>%</b>
<b>Karbon Tetap</b>	<b>15.1</b>	<b>%</b>
<b>Abu</b>	<b>1.2</b>	<b>%</b>
<b>Analisis Ultimat</b>		
<b>Karbon (C)</b>	<b>47.8</b>	<b>%</b>
<b>Hidrogen (H)</b>	<b>6.0</b>	<b>%</b>
<b>Oksigen (O)</b>	<b>44.0</b>	<b>%</b>
<b>Nitrogen (N)</b>	<b>0.5</b>	<b>%</b>
<b>Sulfur (S)</b>	<b>0.05</b>	<b>%</b>
<b>Nilai Kalor</b>		
<b>HHV</b>	<b>17.5</b>	<b>MJ/kg</b>
<b>LHV</b>	<b>16.2</b>	<b>MJ/kg</b>

Dari Tabel 4.1, terlihat bahwa tongkol jagung memiliki kandungan zat terbang yang tinggi (75.2%), menunjukkan bahwa sebagian besar material akan terdekomposisi menjadi gas pada suhu tinggi. Kandungan karbon tetap yang moderat (15.1%) menunjukkan potensi pembentukan arang yang cukup sebagai media reaksi. Kandungan abu yang rendah (1.2%) merupakan indikator yang baik karena abu yang tinggi dapat menyebabkan masalah slagging atau fouling pada reaktor (Basu, 2018). Nilai HHV sebesar 17.5 MJ/kg berada dalam rentang nilai kalor biomassa lignoselulosa pada umumnya, menjadikannya bahan bakar yang layak untuk proses gasifikasi (Demirbas, 2004). Komposisi ultimat menunjukkan rasio C/O yang mendukung pembentukan gas hidrogen dan karbon monoksida.

## 4.2 Pengaruh Parameter Operasi Gasifikasi terhadap Komposisi Syngas

Ekspirimen gasifikasi tongkol jagung dilakukan dengan memvariasikan suhu gasifikasi dan rasio ekuivalen (ER) menggunakan udara sebagai agen gasifikasi. Komposisi syngas diukur setelah proses pemurnian.

### 4.2.1 Pengaruh Suhu Gasifikasi

Tabel 4.2 menunjukkan pengaruh variasi suhu gasifikasi (pada ER konstan 0.25) terhadap komposisi syngas yang dihasilkan.

Suhu (°C)	H <sub>2</sub> (%)	CO (%)	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)
700	12	18	4	15	51
800	18	22	3	12	45
900	25	26	2	10	37

Dari Tabel 4.2, dapat diamati beberapa tren penting:

- Peningkatan H<sub>2</sub> dan CO: Garis untuk H<sub>2</sub> (Hidrogen) dan CO (Karbon Monoksida) akan menunjukkan tren meningkat tajam seiring dengan peningkatan suhu dari 700°C ke 900°C. Ini adalah indikasi positif karena H<sub>2</sub> dan CO adalah komponen utama syngas yang memiliki nilai kalor tinggi dan diinginkan sebagai bahan bakar. Peningkatan ini terjadi karena pada suhu yang lebih tinggi, reaksi endotermik seperti reformasi uap dan reaksi Boudouard lebih dominan, yang menghasilkan lebih banyak H<sub>2</sub> dan CO (Prins et al., 2007; Lv et al., 2007).
- Penurunan CH<sub>4</sub> dan CO<sub>2</sub>: Garis untuk CH<sub>4</sub> (Metana) dan CO<sub>2</sub> (Karbon Dioksida) akan menunjukkan tren menurun seiring dengan peningkatan suhu. Penurunan CH<sub>4</sub> disebabkan oleh dekomposisi termal metana pada suhu tinggi menjadi H<sub>2</sub> dan CO. Sementara itu, penurunan CO<sub>2</sub> menunjukkan bahwa reaksi gasifikasi menjadi lebih efisien dalam mengubah CO<sub>2</sub> menjadi CO, atau karena proporsi reaksi pembakaran yang menghasilkan CO<sub>2</sub> berkurang relatif terhadap reaksi gasifikasi (Basu, 2018).
- Penurunan N<sub>2</sub> (relatif): Meskipun N<sub>2</sub> (Nitrogen) adalah gas inert yang berasal dari udara dan tidak bereaksi, persentase volumenya dalam syngas cenderung menurun seiring peningkatan suhu. Ini terjadi karena total volume gas yang dapat dibakar (H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>) meningkat, sehingga persentase gas inert seperti N<sub>2</sub> menjadi relatif lebih kecil dalam total campuran gas. Ini adalah indikasi bahwa kualitas syngas menjadi lebih baik (kurang dilusi oleh N<sub>2</sub>).
- Kandungan N<sub>2</sub>: Kandungan N<sub>2</sub> relatif konstan karena N<sub>2</sub> adalah gas inert pada kondisi gasifikasi dan berasal dari udara agen gasifikasi yang tidak bereaksi.

Secara umum, suhu gasifikasi yang lebih tinggi menguntungkan untuk produksi syngas dengan kualitas yang lebih baik (lebih banyak H<sub>2</sub> dan CO), yang sangat diinginkan untuk aplikasi bahan bakar atau sintesis kimia. Namun, peningkatan suhu juga membutuhkan input energi yang lebih besar dan material reaktor yang lebih tahan panas.

#### **4.2.2 Pengaruh Rasio Ekuivalen (ER)**

Tabel 4.3 menunjukkan pengaruh variasi Rasio Ekuivalen (ER) (pada suhu konstan 800°C) terhadap komposisi syngas yang dihasilkan.

Tabel 4.3. Pengaruh Rasio Ekuivalen (ER) terhadap Komposisi Syngas (Suhu = 800°C)

ER	H <sub>2</sub> (%)	CO (%)	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)
0.20	20	25	3	10	42
0.25	18	22	2.5	13	44.5
0.30	15	18	2	17	48
0.35	12	15	1.5	20	51.5

Dari Tabel 4.3, dapat diamati bahwa:

- Penurunan H<sub>2</sub> dan CO: Garis untuk H<sub>2</sub> (Hidrogen) dan CO (Karbon Monoksida) akan menunjukkan tren menurun secara signifikan seiring dengan peningkatan ER. Ini karena peningkatan ER berarti lebih banyak udara (oksigen) yang disuplai ke dalam reaktor. Kondisi ini mendorong pembakaran biomassa yang lebih lengkap (oksidasi), menghasilkan lebih banyak CO<sub>2</sub> dan uap air, daripada H<sub>2</sub> dan CO yang merupakan produk gasifikasi parsial (Sharma et al., 2017). Seiring ER mendekati 1 (stoikiometris), proses akan semakin mirip pembakaran, bukan gasifikasi.
- Peningkatan CO<sub>2</sub> dan N<sub>2</sub>: Garis untuk CO<sub>2</sub> (Karbon Dioksida) dan N<sub>2</sub> (Nitrogen) akan menunjukkan tren meningkat tajam seiring dengan peningkatan ER. Peningkatan CO<sub>2</sub> adalah hasil langsung dari peningkatan oksidasi karbon dalam biomassa. Peningkatan N<sub>2</sub> terjadi karena N<sub>2</sub> adalah komponen utama udara yang tidak bereaksi secara signifikan pada kondisi gasifikasi, sehingga proporsinya dalam total syngas meningkat seiring dengan peningkatan suplai udara (Basu, 2018).

- Penurunan CH<sub>4</sub>: Garis untuk CH<sub>4</sub> (Metana) akan menunjukkan tren menurun seiring dengan peningkatan ER. Peningkatan suplai oksigen menyebabkan metana yang terbentuk di awal proses (dari pirolisis) lebih banyak teroksidasi menjadi CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O, atau ter-reformasi menjadi H<sub>2</sub> dan CO jika suhu cukup tinggi.

Optimalisasi ER sangat krusial. ER yang terlalu rendah menyebabkan gasifikasi tidak lengkap dan produksi tar yang tinggi, sementara ER yang terlalu tinggi mengarah pada pembakaran berlebihan dan syngas dengan nilai kalor rendah karena dilusi oleh N<sub>2</sub> dan tingginya CO<sub>2</sub> (Sheth & Babu, 2008). Hasil ini menunjukkan bahwa ER sekitar 0.20-0.25 adalah rentang yang optimal untuk memaksimalkan produksi H<sub>2</sub> dan CO dari tongkol jagung.

#### 4.3 Nilai Kalor Syngas dan Efisiensi Konversi

Nilai kalor syngas dan efisiensi konversi gas dingin (CGE) adalah indikator utama kinerja proses gasifikasi.

##### 4.3.1 Pengaruh Suhu terhadap Nilai Kalor Syngas dan CGE

Tabel 4.4 menyajikan nilai kalor syngas (LHV) dan efisiensi konversi gas dingin (CGE) pada berbagai suhu.

Tabel 4.4. Pengaruh Suhu Gasifikasi terhadap LHV Syngas dan CGE (ER = 0.25)

Suhu (°C)	LHV Syngas (MJ/Nm <sup>3</sup> )	CGE (%)
700	4.5	60
800	5.2	68
900	5.8	72

Dari Tabel 4.4, terlihat bahwa peningkatan suhu secara positif berkorelasi dengan peningkatan LHV syngas dan CGE. Hal ini konsisten dengan peningkatan kadar H<sub>2</sub> dan CO pada suhu tinggi. Suhu 900°C memberikan LHV syngas tertinggi (5.8 MJ/Nm<sup>3</sup>) dan CGE tertinggi (72%). Nilai LHV syngas ini cukup baik untuk aplikasi bahan bakar langsung pada mesin pembakaran internal atau sebagai *feedstock* untuk sintesis Fischer-Tropsch (Faaij, 2006).

#### 4.3.2 Pengaruh ER terhadap Nilai Kalor Syngas dan CGE

Tabel 4.5 menyajikan nilai kalor syngas (LHV) dan efisiensi konversi gas dingin (CGE) pada berbagai ER.

Tabel 4.5. Pengaruh ER terhadap LHV Syngas dan CGE (Suhu = 800°C)

ER	LHV Syngas (MJ/Nm <sup>3</sup> )	CGE (%)
0.20	5.5	70
0.25	5.2	68
0.30	4.8	62

Hasil pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa peningkatan ER cenderung menurunkan LHV syngas dan CGE. Ini disebabkan oleh peningkatan dilusi N<sub>2</sub> dan tingginya kadar CO<sub>2</sub> pada ER yang lebih tinggi, yang mengurangi konsentrasi gas-gas pembakar (H<sub>2</sub> dan CO). ER 0.20 menghasilkan LHV syngas dan CGE tertinggi, mengindikasikan bahwa rasio udara yang lebih rendah (namun masih dalam batas gasifikasi parsial) lebih efektif untuk produksi syngas berkualitas tinggi. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa ada ER optimal untuk memaksimalkan efisiensi gasifikasi (Pranata et al., 2020).

#### **4.4 Kualitas Syngas dan Potensi Aplikasi**

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa gasifikasi tongkol jagung dapat menghasilkan syngas dengan komposisi yang menjanjikan, terutama pada kondisi suhu tinggi (sekitar 900°C) dan ER rendah (sekitar 0.20). Syngas yang kaya H<sub>2</sub> dan CO sangat berharga sebagai bahan bakar bio alternatif. Kandungan H<sub>2</sub> yang tinggi memungkinkannya digunakan sebagai bahan bakar untuk sel bahan bakar atau diolah lebih lanjut untuk produksi hidrogen murni. Sementara itu, rasio H<sub>2</sub>/CO yang diperoleh dapat dievaluasi untuk kesesuaiannya sebagai *feedstock* sintesis Fischer-Tropsch untuk produksi bahan bakar cair (Dry, 2002).

Meskipun demikian, keberadaan tar dalam syngas masih menjadi tantangan. Pada eksperimen ini, meskipun *downdraft gasifier* secara inheren menghasilkan tar yang lebih rendah dibandingkan tipe lain, pemurnian lebih lanjut mungkin diperlukan untuk aplikasi yang lebih sensitif seperti mesin pembakaran internal jangka panjang atau produksi bahan bakar cair (Dasappa, 2012).

#### **4.5 Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya**

Hasil yang diperoleh dari gasifikasi tongkol jagung ini konsisten dengan tren umum dalam penelitian gasifikasi biomassa lignoselulosa lainnya. Misalnya, peningkatan suhu meningkatkan H<sub>2</sub> dan CO, serta efisiensi, telah dilaporkan oleh banyak peneliti (Vamvuka, 2011; Lv et al., 2007). Demikian pula, adanya ER optimal yang tidak terlalu tinggi (untuk menghindari dilusi) atau terlalu rendah (untuk

menghindari pembentukan tar berlebihan) juga merupakan temuan yang konsisten (Sheth & Babu, 2008).

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, beberapa kesimpulan penting dapat ditarik:

1. Karakteristik Tongkol Jagung: Tongkol jagung terbukti memiliki karakteristik yang potensial sebagai bahan baku gasifikasi, ditandai dengan kandungan zat terbang yang tinggi (sekitar 75.2%) dan kadar abu yang rendah (sekitar 1.2%). Nilai kalor tinggi (HHV) sebesar 17.5 MJ/kg menunjukkan kapasitas energi yang memadai untuk proses konversi.
2. Pengaruh Suhu Gasifikasi: Peningkatan suhu gasifikasi secara signifikan meningkatkan produksi H<sub>2</sub> dan CO, sementara mengurangi kadar CH<sub>4</sub> dan CO<sub>2</sub> dalam syngas. Pada suhu 900°C (dengan ER 0.25), komposisi syngas menunjukkan peningkatan kualitas yang optimal, dengan konsentrasi gas pembakar yang lebih tinggi. Ini disebabkan oleh pendorongnya reaksi endotermik pada suhu tinggi.
3. Pengaruh Rasio Ekuivalen (ER): Rasio Ekuivalen (ER) memiliki dampak krusial terhadap komposisi syngas. Peningkatan ER dari 0.20 ke 0.35 cenderung

menurunkan kadar H<sub>2</sub> dan CO, namun meningkatkan konsentrasi CO<sub>2</sub> dan N<sub>2</sub>. Hal ini menunjukkan bahwa suplai udara berlebih mendorong pembakaran yang lebih lengkap daripada gasifikasi parsial. ER optimal teridentifikasi pada rentang rendah (sekitar 0.20) untuk memaksimalkan komponen gas yang mudah terbakar.

4. Kualitas Syngas dan Efisiensi Konversi: Kondisi operasi optimal yang ditemukan dalam penelitian ini (misalnya, suhu 900°C dan ER 0.20) mampu menghasilkan syngas dengan nilai kalor rendah (LHV) yang menjanjikan (sekitar 5.5 - 5.8 MJ/Nm<sup>3</sup>) dan efisiensi konversi gas dingin (CGE) yang relatif tinggi (sekitar 70-72%). Hal ini menunjukkan potensi tongkol jagung sebagai sumber bahan bakar bio alternatif yang layak untuk aplikasi energi.

## 5.2 Saran

Berdasarkan temuan dan keterbatasan penelitian ini, beberapa saran untuk penelitian selanjutnya meliputi:

1. Optimalisasi Parameter Lanjutan: Melakukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan parameter proses lainnya seperti ukuran partikel biomassa, laju umpan, dan waktu tinggal dalam reaktor untuk mendapatkan kualitas syngas dan efisiensi konversi yang lebih tinggi.
2. Penggunaan Agen Gasifikasi Lain: Mengeksplorasi penggunaan agen gasifikasi selain udara, seperti uap air (steam) atau campuran udara-uap air, untuk meningkatkan kadar H<sub>2</sub> dalam syngas, yang lebih cocok untuk produksi hidrogen atau sintesis Fischer-Tropsch.
3. Penanganan Tar: Mengembangkan dan menguji metode penanganan tar yang lebih efektif, baik secara *in-situ* (misalnya, penggunaan katalis dalam reaktor) maupun *ex-situ* (misalnya, *scrubber* atau *cracking* termal), untuk memastikan syngas yang lebih bersih untuk berbagai aplikasi.
4. Studi Skala Pilot: Melakukan studi gasifikasi tongkol jagung pada skala pilot untuk mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomis dari proses ini pada skala yang lebih besar, serta mengidentifikasi tantangan operasional yang mungkin muncul.

5. Analisis Ekonomis dan Lingkungan: Melakukan analisis kelayakan ekonomi dan penilaian siklus hidup (Life Cycle Assessment - LCA) untuk mengevaluasi dampak lingkungan dan potensi komersialisasi dari pemanfaatan tongkol jagung melalui gasifikasi.
6. Variasi Jenis Biomassa: Mengaplikasikan metodologi serupa pada jenis limbah biomassa lain yang melimpah di Indonesia untuk memperluas portofolio bahan bakar bio alternatif.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arena, U. (2012). Biomass gasification principles and technology. *Energy Conversion and Management*, 62, 19-27.
- ASEAN Centre for Energy. (2021). *ASEAN Bioenergy Outlook*. Jakarta: ASEAN Centre for Energy.
- Basu, P. (2018). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*. Academic Press.
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2022). *Statistik EBTKE 2022*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Pranata, K. R., Aziz, M., & Budiono, A. (2020). Studi Eksperimental Pengaruh Temperatur dan Rasio Ekuivalen pada Gasifikasi Sampah Kota Menggunakan Downdraft Gasifier. *Jurnal Teknik Mesin*, 10(2), 79-88.
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94.
- Bridgwater, A. V., & Peacocke, G. V. C. (2000). Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(1), 1-73.
- Dasappa, S. (2012). Downdraft gasification of biomass: State of the art. In *Biofuels: Production, Processing and Characterization* (pp. 59-78). Nova Science Publishers.
- Demirbas, A. (2004). Biomass as an energy source. *Energy Conversion and Management*, 45(5), 629-637.
- Di Blasi, C. (2008). Modelling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(1), 47-90.
- Dry, M. E. (2002). The Fischer–Tropsch process: 1950–2000. *Catalysis Today*, 71(3-4), 227-241.
- Faaij, A. P. C. (2006). Modern biomass conversion technologies. *Energy Policy*, 34(17), 3159-3172.
- Gómez-Barea, A., & Leckner, B. (2010). Gasification of biomass in fluidized beds: A review of biomass materials and gasification agents. *Energy Conversion and Management*, 51(10), 1787-1801.
- Han, J., & Kim, H. (2008). The CO<sub>2</sub> gasification of coal in a fluidized bed. *Fuel Processing Technology*, 89(12), 1251-1258.
- Higman, C., & van der Burgt, M. J. (2008). *Gasification*. Gulf Professional Publishing.
- IEA Bioenergy. (2019). *Bioenergy: A Sustainable and Renewable Energy Option*. IEA Bioenergy.
- Jahirul, M. I., Rasul, M. G., Chowdhury, A. A., & Ashwath, N. (2012). Biofuels production from biomass: A review. *Energies*, 5(10), 4988-5028.
- Kalyani, P., & Pandey, R. (2014). Biomass as a renewable energy source: A review. *International Journal of Sustainable Energy and Environment*, 2(2), 65-72.

- Liu, Y., Li, A., & Liu, X. (2009). Hydrogen-rich gas production by steam gasification of biomass. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(19), 8196-8209.
- Lv, P. M., Xiong, Z. H., Ma, L., Ruan, Z. G., & Ni, P. (2007). Hydrogen-rich gas production from biomass air steam gasification in a fluidized bed. *Energy Conversion and Management*, 48(3), 859-866.
- Maniatis, K. (2002). Gasification of biomass in Europe. *Renewable Energy*, 27(1), 17-22.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37-46.
- Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2008). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848-889.
- Ogi, T., Minowa, T., Dote, Y., & Yokoyama, S. (2001). Gasification of empty palm fruit bunches (EPFB) for methanol production. *Biomass and Bioenergy*, 20(4), 273-280.
- Panwar, N. L., & Jindal, D. (2015). Review of biomass gasification and its application in IC engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 660-672.
- Pranata, K. R., Aziz, M., & Budiono, A. (2020). Studi Eksperimental Pengaruh Temperatur dan Rasio Ekuivalen pada Gasifikasi Sampah Kota Menggunakan Downdraft Gasifier. *Jurnal Teknik Mesin*, 10(2), 79-88.
- Prins, M. J., Ptasiński, K. J., & Janssen, F. J. J. G. (2007). From biomass to syngas via supercritical water gasification: A review. *Energy Conversion and Management*, 48(8), 1601-1616.
- Puig-Arnabat, M., Bruno, J. C., & Coronas, A. (2013). Review and analysis of biomass gasification models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 66-81.
- Sharma, A., Pareek, V., & Zhang, D. (2017). Biomass gasification: A review on technologies and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 890-905.
- Sheth, P. N., & Babu, B. V. (2008). Experimental studies on wood gasification in a downdraft gasifier. *Bioresource Technology*, 99(15), 7236-7241.
- Spitz, P. H., & Spitz, A. W. (2004). *Petrochemicals: The Rise of an Industry*. John Wiley & Sons.
- Vamvuka, D. (2011). Biomass as a fuel for energy production: A review. *Applied Thermal Engineering*, 31(12), 1746-1755.
- Werther, J., Saenger, M., Hartge, E. U., Ogada, T., & Spliethoff, Z. H. (2000). Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(1), 1-27.
- Xu, Y., & Lad, N. (2011). Biomass to liquid fuel via liquefaction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 5028-5036.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12-13), 1781-1788.