

# Pengaruh Variasi Kecepatan Gas Agen CO<sub>2</sub> Dengan Co-Gasifikasi Batubara Terhadap Profil Temperature Dual Reaktor Fluidized Bed

Yehezkiel Alfian, I Nyoman Suprpta Winaya, dan I Wayan Arya Darma

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

## Abstrak

penelitian ini membahas pengaruh variasi laju aliran gas CO<sub>2</sub> terhadap distribusi temperatur pada sistem Dual Reactor Fluidized Bed (DRFB) yang menggunakan bahan bakar campuran batubara dan Refuse Derived Fuel (RDF). Temperatur merupakan salah satu parameter penting dalam proses gasifikasi, karena berperan langsung dalam mendorong terjadinya reaksi termokimia antara bahan bakar dan agen gasifikasi. Variasi laju aliran CO<sub>2</sub> yang digunakan dalam penelitian ini meliputi 0, 3, 8, dan 13 L/menit. Pengujian dilakukan dengan mengoperasikan sistem hingga proses pembentukan gas berhenti, dan data temperatur dicatat sepanjang waktu operasi. Hasil menunjukkan bahwa pada awal proses terjadi penurunan temperatur akibat pengaruh pendinginan sistem, yang kemudian diikuti oleh peningkatan suhu setelah bahan bakar mulai menyala. Di antara semua variasi, aliran CO<sub>2</sub> sebesar 8 L/menit menunjukkan kestabilan temperatur terbaik sepanjang proses berlangsung. Variasi ini menghasilkan pola distribusi temperatur yang lebih konsisten dibandingkan variasi lainnya, yang cenderung mengalami fluktuasi lebih besar. Sebaliknya, laju aliran yang terlalu rendah atau terlalu tinggi menyebabkan ketidakseimbangan termal yang berpotensi mengganggu keberlangsungan proses gasifikasi. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa pengaturan laju aliran CO<sub>2</sub> memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan suhu reaktor, sehingga mendukung berlangsungnya proses gasifikasi dengan lebih terkendali. Pemilihan laju aliran yang tepat menjadi kunci dalam optimalisasi kinerja termal sistem DRFB.

Kata kunci: Profil Temperatur, Aliran CO<sub>2</sub>, Reaktor Fluidized Bed, Batubara, RDF, Gasifikasi.

## Abstract

This study examines the effect of varying CO<sub>2</sub> flow rates on the temperature distribution within a Dual Reactor Fluidized Bed (DRFB) system fueled by a blend of coal and Refuse Derived Fuel (RDF). Temperature plays a vital role in gasification processes, as it directly influences the occurrence and continuity of thermochemical reactions between the fuel and the gasifying agent. The flow rate variations tested in this research include 0, 3, 8, and 13 L/min. The system was operated until the gas formation process ceased, and temperature data was recorded throughout the operation. The results indicate an initial temperature drop caused by system cooling, followed by a gradual increase once the fuel ignited. Among the tested variations, the 8 L/min CO<sub>2</sub> flow rate demonstrated the most stable temperature distribution over time. This variation produced a more consistent thermal profile compared to the others, which showed larger fluctuations. In contrast, excessively low or high CO<sub>2</sub> flow rates caused thermal imbalances that could potentially disrupt the gasification process. These findings suggest that proper regulation of CO<sub>2</sub> flow rate plays a crucial role in maintaining reactor temperature stability. Selecting an optimal flow rate is key to ensuring a controlled and steady gasification process within the DRFB system.

Keywords: Temperature Profile, CO<sub>2</sub> Flow Rate, Fluidized Bed Reactor, Coal, RDF, Gasification.

## 1. Pendahuluan

Energi memiliki keterkaitan yang sangat erat dengan berbagai aspek kehidupan, baik pada tingkat individu maupun kelompok. Dalam setiap struktur sosial, energi dibutuhkan untuk mendukung aktivitas sehari-hari, dari awal hingga akhir kegiatan. Saat ini, sebagian besar kebutuhan energi masih dipenuhi oleh energi fosil. Ketergantungan ini, jika terus berlangsung, akan mempercepat habisnya cadangan bahan bakar fosil. Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar tetapi masih kurang dimanfaatkan adalah RDF (Refused Derived Fuel) dari sampah padat kota (*Municipal Solid Waste/MSW*). MSW adalah limbah padat yang dihasilkan dari aktivitas masyarakat perkotaan, terdiri dari sampah organik dan anorganik. Di Indonesia, pengelolaan MSW masih sangat bergantung pada Tempat Pembuangan Akhir (TPA) [1]. Salah satu

upaya pemanfaatan sampah adalah dengan mengubahnya menjadi bahan bakar, seperti RDF, melalui proses pengeringan dan pemilahan sampah yang mudah terbakar [2]. Teknologi gasifikasi digunakan untuk mengubah RDF menjadi gas yang dapat terbakar. Salah satu teknologi potensial dalam pemanfaatan MSW adalah Gasifikasi Dual Reaktor Fluidized Bed (DRFB). Teknologi ini awalnya dikembangkan pada tahun 1950-an untuk gasifikasi batubara, kemudian beradaptasi untuk biomassa [3]. Kini, gasifikasi juga dilakukan secara bersama-sama dengan co-firing atau co-gasifikasi, yaitu menggunakan dua jenis bahan bakar sekaligus, seperti batubara dan RDF MSW. Keunggulan metode ini adalah pengurangan konsumsi bahan bakar fosil dan penurunan emisi NOX dan SOX [4]. Gasifikasi adalah proses termokimia yang mengubah bahan bakar padat menjadi gas sintetik yang dapat digunakan sebagai bahan bakar, seperti CO, CH<sub>4</sub>, dan H<sub>2</sub>, menggunakan

reaktor khusus (gasifier) dengan suplai udara terbatas, sekitar 20%–40% dari kebutuhan stoikiometri. Gas yang dihasilkan meliputi hidrogen ( $H_2$ ), karbon monoksida (CO), karbon dioksida ( $CO_2$ ), metana ( $CH_4$ ), hidrokarbon ringan ( $C_xH_y$ ), dan tar [5]. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa co-gasifikasi menggunakan teknologi Dual Reactor Fluidized Bed (DRFB) dengan bahan bakar campuran batubara dan RDF MSW, serta variasi aliran agen  $CO_2$  sebesar 3 L/menit, 8 L/menit, 13 L/menit, dan tanpa penambahan  $CO_2$ .

## 2. Dasar Teori

### 2.1 Batu Bara

Batu bara adalah batuan sedimen berwarna hitam atau coklat kehitaman yang terbentuk dari sisa tumbuhan dan bersifat mudah terbakar. Unsur utamanya adalah karbon, disertai hidrogen, nitrogen, dan sulfur [6]. Sebagai salah satu sumber energi utama, batu bara menjadi komoditas tambang yang banyak dimanfaatkan di Indonesia. Seluruh 20 provinsi memiliki potensi batu bara, dengan Kalimantan Timur menyumbang sekitar 83% dari total sumber daya nasional. Indonesia memiliki 161,34 miliar ton sumber daya batu bara, dengan cadangan tertambang 28,17 miliar ton [7].

### 2.2 RDF

Refuse Derived Fuel (RDF) saat ini mendapat perhatian luas karena manfaatnya dalam pengelolaan limbah perkotaan dan sebagai alternatif teknologi energi berbasis limbah. Beragam jenis limbah baik cair, padat, maupun gas yang berasal dari sektor komersial, residensial, maupun kehutanan, dapat diolah melalui serangkaian proses untuk dikonversi menjadi RDF. Limbah yang digunakan harus memiliki nilai kalor tertentu agar dapat memenuhi syarat sebagai bahan bakar RDF [8].

### 2.3 Co-Gasifikasi

Penggunaan dua jenis bahan bakar secara bersamaan dalam proses gasifikasi dikenal sebagai co-gasifikasi. Umumnya, metode ini memadukan bahan bakar fosil seperti batubara dengan biomassa, contohnya RDF (*Refuse Derived Fuel*) yang berasal dari sampah padat perkotaan (MSW). Teknologi ini dikembangkan dengan harapan dapat mendorong pemanfaatan energi terbarukan sebagai pengganti bahan bakar fosil. Namun, penggunaan RDF dalam jumlah berlebih dalam campuran justru dapat menurunkan kandungan gas sintetik (syngas) yang dihasilkan.

### 2.4 Profil Temperature

Pada gasifikasi menggunakan temperatur yang tinggi untuk melakukan tahap awal yaitu pengeringan. Temperatur yang tinggi digunakan untuk mengurangi kandungan air yang ada pada bahan bakar agar

mendapatkan gas yang bersih. Panas yang ada akan di isolasi agar tidak keluar karena akan menyebabkan efisiensi dari gasifikasi menjadi tidak optimal [9].

## 3. Metodologi Penelitian

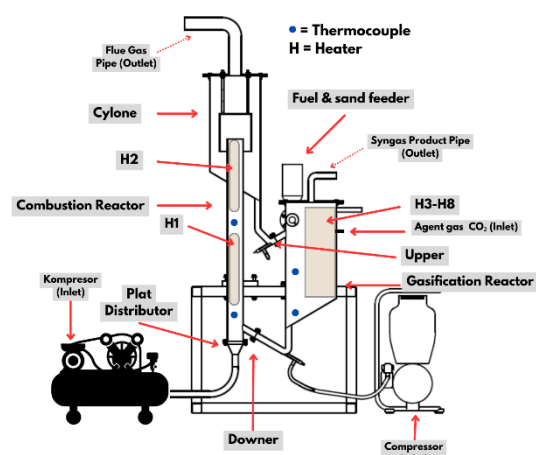
### 3.1 Rancangan Penelitian

Analisis ini menerapkan metode eksperimental, yaitu pendekatan berbasis percobaan, guna mencapai tujuan utama studi: menganalisis performa proses gasifikasi dalam pembakaran RDF MSW dan batubara menggunakan alat Dual Reactor Fluidized Bed, dengan variasi laju aliran agen  $CO_2$ . Pendekatan eksperimental digunakan untuk mengamati pengaruh suatu variabel terhadap variabel lainnya dengan pengendalian yang ketat selama proses penelitian berlangsung. Metode ini memiliki keunggulan karena mampu memberikan pembuktian yang lebih kuat dibandingkan pendekatan lainnya.

### 3.2 Rangkaian Alat Penelitian

|                      |          |
|----------------------|----------|
| a. Unit DRFB         | : 1 Unit |
| b. Kompresor Udara   | : 1 Unit |
| c. Heater            | : 8 Unit |
| d. Gas Analyzer      | : 1 Buah |
| e. Thermocouple      | : 4 Buah |
| f. Plat Distributor  | : 1 Buah |
| g. Thermocontrol     | : 3 Buah |
| h. Presuure Gauge    | : 1 Buah |
| i. Glass Wool        | : 1 Buah |
| j. Ayakan Mesh 30-35 | : 4 Buah |
| k. Timbangan         | : 1 Buah |
| l. Data Logger       | : 1 Buah |
| m. Laptop            | : 1 Buah |
| n. Anemometer        | : 1 Buah |
| o. Tabung $CO_2$     | : 1 Buah |
| p. Flow Meter        | : 1 Buah |

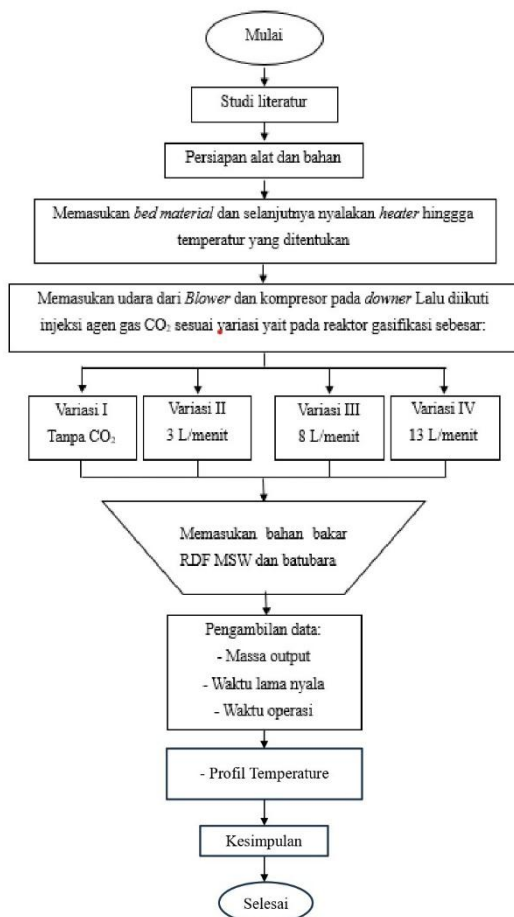
### 3.3 Deskripsi Alat Gasifikasi DRFB



Gambar 1. Desain DRFB

Analisis ini menggunakan alat berupa *Dual Reactor Fluidized Bed* Gasifier yang terbuat dari material stainless steel tipe 304. Sistem ini terdiri atas dua tabung reaktor reaktor pembakaran dan reaktor gasifikasi yang secara termal terhubung melalui material bed yang bersirkulasi. Masing-masing reaktor dilengkapi dengan dua buah thermocouple yang digunakan untuk memantau distribusi temperatur, di mana data hasil pengukuran tersebut dicatat menggunakan data logger. Thermocontrol digunakan untuk mengatur suhu sesuai dengan temperatur operasi yang diinginkan, sedangkan data logger bertugas merekam suhu selama proses berlangsung. Pada reaktor gasifikasi terpasang enam buah pemanas (heater), sedangkan reaktor pembakaran dilengkapi dua heater. Seluruh heater ini diatur melalui thermocontrol agar sesuai dengan kebutuhan proses.

### 3.4 Diagram Alir Penelitian



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

## 4. Hasil dan Pembahasan

### 4.1 Data Hasil Pengujian

Setelah dilakukan pengujian menggunakan alat Dual Reactor Fluidized Bed dengan variasi penambahan

gas agen CO<sub>2</sub>, diperoleh sejumlah data penting, antara lain: waktu operasi, temperatur yang tercatat dari setiap *thermocouple* pada reaktor gasifikasi dan reaktor pembakaran, massa bahan bakar input dan output, serta informasi terkait pembentukan gas mampu bakar (syngas) hingga gas tersebut tidak lagi terbentuk.

### 4.2 Uji Bomb Calorimeter

Uji Bom Calormeter merupakan suatu pengujian yang dilakukan untuk mengetahui suatu nilai kalori dari bahan bakar yang akan diuji. Pengujian dengan bomb kalorimeter bertujuan untuk mengetahui besarnya energi panas yang dihasilkan saat suatu zat dibakar secara total dalam wadah tertutup. Alat ini biasa dipakai untuk menentukan nilai energi dari bahan bakar, maupun zat kimia lainnya. Dalam prosesnya, sampel dibakar di dalam bom berisi oksigen, dan kenaikan suhu air di sekelilingnya diukur. Perubahan suhu ini menjadi dasar untuk menghitung energi panas yang dilepas.

Tabel.1 Uji Bomb Calorimeter

| Sampel                       | Berat Sampel (Gram) | Suhu (°C)           |                     | Massa H <sub>2</sub> O (Gram) | Nilai Kalor (LHV) |            |
|------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------|------------|
|                              |                     | T <sub>1</sub> (°C) | T <sub>2</sub> (°C) |                               | (cal/gr)          | (MJ/Kg)    |
| Batu Bara (90%)<br>RDF (10%) | 0,99787             | 28,037              | 30,621              | 0,5706                        | 4665,858          | 19,5350141 |

### 4.3 Uji TGA (Thermogravimetric Analyzer)

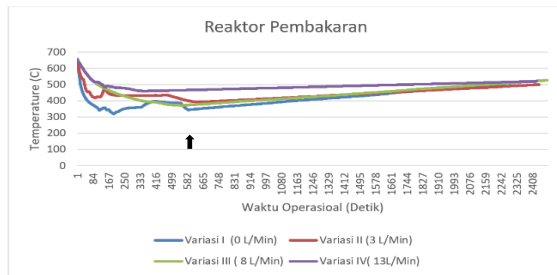
Uji proksimat bertujuan menentukan komposisi bahan bakar berdasarkan empat parameter utama: kadar air, abu, zat terbang (volatile matter), dan karbon tetap (fixed carbon). Pengujian dilakukan menggunakan alat Thermogravimetric Analyzer 701 sesuai standar ASTM D7582-2015. Hasil uji disajikan sebagai berikut.

Tabel.2 Tabel Thermogravimetric Analyzer

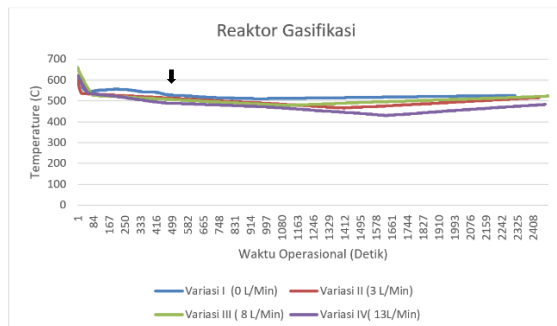
| Bahan Bakar                  | Moisture (%) | Volatile (%) | Fixed carbon (%) | Ash content (%) |
|------------------------------|--------------|--------------|------------------|-----------------|
| RDF (10%)<br>Batu Bara (90%) | 14.94        | 50.45        | 34.98            | 0,37            |

### 4.4 Profil Temperature

Thermocouple dipasang di titik-titik tertentu pada tiap reaktor, dengan T1 dan T2 di reaktor pembakaran, serta T3 dan T4 di reaktor gasifikasi. Suhu diukur sejak awal hingga akhir operasi. Gambar berikut menunjukkan perbandingan distribusi suhu pada kedua reaktor.



**Gambar 3. Grafik Temperature Reaktor Pembakaran**



**Gambar 4. Grafik Temperature Reaktor Gasifikasi**

Dari hasil analisis gambar diatas pada gambar 4.2 grafik temperature pada reaktor pembakaran didapatkan bahwa masing-masing variasi pada reaktor pembakaran mengalami penurunan dan kenaikan temperature yang berbeda. Panah keatas pada reaktor pembakaran menunjukan kenaikan temperature serta terjadinya reaksi eksotermis dan tanda panah kebawah pada reaktor gasifikasi menunjukan penurunan temperature namun tidak signifikan dimana terjadinya reaksi endotermis pada reaktor gasifikasi. Penurunan temperature pada detik awal terjadi diakibatkan kompresor reaktor pembakaran dihidupkan secara bersamaan pada saat waktu operasional sehingga membuat temperature menjadi menurun, dan kenaikan temperature disebabkan pada saat bahan bakar sudah mulai

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh penambahan media gas CO<sub>2</sub> terhadap performa *Dual Reactor Fluidized Bed* (DRFB) dengan bahan bakar Batubara dan RDF terhadap profil temperature disimpulkan bahwa temperatur pada reaktor pembakaran dan gasifikasi mendapatkan Penurunan temperature pada detik 1 sampai dengan detik 167 terjadi diakibatkan kompresor reaktor pembakaran dihidupkan secara bersamaan pada saat waktu operasional sehingga membuat Temperature menjadi menurun, dan kenaikan temperature di sebabkan pada saat bahan bakar sudah mulai menyala.

## Daftar Pustaka

- [1] F. Farizal, R. Aji, A. Rachman, N. Nasruddin, and T. M. I. Mahlia, 2018, "Indonesia's Municipal Solid Waste 3R and Waste to Energy Programs," *Makara J. Technol.*, vol. 21, no. 3, p.
- [2] I. W. Arya Darma, I. N. S. Winaya, and I. K. G. Wirawan, 2018, "Studi Pengaruh Temperatur Reaktor Gasifikasi Terhadap Fuel Conversion Rate Gasifikasi Dual Reactor Fluidized Bed," *J. METTEK*, vol. 4, no. 2, p.
- [3] N. Hanchate, S. Ramani, C. S. Mathpati, and V. H. Dalvi, 2021, "Biomass gasification using dual fluidized bed gasification systems: A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 280, p.
- [4] I. Nyoman, S. Winaya, and G. Sujana Dan I G N P Tenaya, 2010 "Formasi Gas Buang Pada Pembakaran Fluidized Bed Sekam Padi," .
- [5] J. Fuchs, J. C. Schmid, S. Müller, and H. Hofbauer, 2019, "Dual fluidized bed gasification of biomass with selective carbon dioxide removal and limestone as bed material: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 107, no. March, pp. 212–231.
- [6] B. Suhat, A. H. Widayat, and K. Anggayana, 2020, "Studi Karakteristik Beberapa Batubara Indonesia Untuk Mendukung Prospek Pemanfaatanya," *Pros. Temu Profesi Tah. PERHAPI*, vol. 0, no. 0, pp. 21–30,.
- [7] R. Fitriyanti, 2016, "Pertambangan Batu Bara : Dampak Lingkungan, Sosial Dan Ekonomi," *J. Redoks*, vol. 1.
- [8] R. Sarc and K. E. Lorber, 2013 "Production, quality and quality assurance of Refuse Derived Fuels (RDFs)," *Waste Manag.*, vol. 33, no. 9, pp. 1825–1834.
- [9] Shahbaz, M. *et al.* (2020) 'A critical review on the influence of process parameters in catalytic co-gasification: Current performance and challenges for a future prospectus', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*."
- [10] M. Stec, A. Czaplicki, G. Tomaszewicz, and K. Słowik, 2018, "Effect of CO<sub>2</sub> addition on lignite gasification in a CFB reactor: A pilot-scale study," *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 35, no. 1, pp. 129–136.

|                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                      | <p><b>Yehezkiel Alfian</b><br/>menyelesaikan studi SMA di SMAN 10 Samarinda, pada tahun 2020, Selanjutnya, melanjutkan studi program sarjana di Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana pada tahun 2020 dan berhasil menyelesaikannya pada tahun 2025.</p> |
| <p>Judul tugas akhir Analisis Peformansi Co-Gasifikasi Batubara Dan Rdf Msw Dengan Variasi Laju Aliran Agen Co<sub>2</sub> Pada Dual Reaktor <i>Fluidized Bed</i></p> |                                                                                                                                                                                                                                                                    |

|                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p><b>Prof. I Nyoman Suprpta Winaya, S.T., MA.Sc., Ph.D.</b> menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana pada tahun 1994, S2 di Dalhousie University pada tahun 2000, dan S3 di Niigata University pada tahun 2008. Prof. I Nyoman Suprpta Winaya, S.T., MA.Sc., Ph.D memiliki konsentrasi ilmu dalam bidang konversi energi.</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p><b>I Wayan Arya Darma, S.T., M.T.</b> Menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana pada tahun 2013, dan menyelesaikan studi S2 di Universitas Udayana pada tahun 2018. I Wayan Arya Darma S.T., M.T. memiliki konsentrasi ilmu dalam bidang konversi energi.</p> |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|