

Pengaruh Variasi Temperatur Agen H₂O (Uap Air) Pada Co-Gasifikasi Batu Bara Dan RDF MSW Terhadap Profil Temperatur Dalam *Dual Reactor Fluidized Bed*

Kean Juno Lais, I Nyoman Suprpta Winaya, dan I Wayan Arya Darma
Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Keterbatasan energi fosil dan meningkatnya kebutuhan energi mendorong pengembangan energi alternatif berkelanjutan, seperti refuse derived fuel (RDF), yakni bahan bakar padat hasil olahan sampah kota yang bernilai kalor cukup tinggi dan membantu mengurangi timbunan sampah. Teknologi co-gasifikasi dual reaktor fluidized bed mengonversi campuran bahan bakar padat menjadi syngas melalui proses termokimia dalam kondisi terbatas oksigen. Pasir silika sebagai bed material mendukung perpindahan panas dalam dual reaktor. Gas agen H₂O (uap air) digunakan untuk meningkatkan reaksi dan efisiensi co-gasifikasi, yang memengaruhi performansi co-gasifikasi dual reaktor fluidized bed. Penelitian ini menggunakan gas agen H₂O (uap air) pada temperatur 130 - 190°C untuk mengetahui performansi co-gasifikasi dual reaktor fluidized bed, dengan campuran bahan bakar 0,6 kg terdiri dari 90% batu bara dan 10% RDF MSW. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan semakin tinggi peningkatan temperatur agen H₂O dalam proses co-gasifikasi dual reaktor fluidized bed maka temperatur dual reaktor cenderung meningkat secara perlahan sehingga steady state. Kondisi ini mendukung keberlangsungan reaksi-reaksi endotermis.

Kata kunci: Co-Gasifikasi, Dual Reaktor Fluidized Bed, Gas Agen H₂O (Uap Air)

Abstract

The limitations of fossil energy and the increasing energy demand drive the development of sustainable alternative energy sources, such as Refuse Derived Fuel (RDF), a solid fuel produced from processed municipal waste that has a relatively high calorific value and helps reduce waste accumulation. The dual fluidized bed co-gasification technology converts a mixture of solid fuels into syngas through a thermochemical process under limited oxygen conditions. Silica sand as the bed material supports heat transfer within the dual reactor system. H₂O gas agent (steam) is used to enhance reactions and improve the efficiency of co-gasification, which affects the performance of the dual fluidized bed co-gasification system. This study employed H₂O gas agent (steam) at temperatures of 130-190°C to evaluate the performance of the dual fluidized bed co-gasification, using a 0.6 kg fuel mixture consisting of 90% coal and 10% RDF MSW. Based on the results of the study, an increase in the temperature of the H₂O gasifying agent in the dual fluidized bed co-gasification process leads to a gradual rise in the dual reactor temperature until it reaches a steady state. This condition supports the continuation of endothermic reactions.

Keywords: Co-Gasification, Dual Fluidized Bed, Agent Gas H₂O (Steam)

1. Pendahuluan

Masalah lingkungan kini menjadi isu krusial, terutama akibat pencemaran yang ditimbulkan oleh aktivitas industri, kendaraan bermotor, serta berbagai sumber lainnya. Bahan bakar fosil merupakan energi tak terbarukan; bila penggunaannya terus-menerus tanpa kendali, cadangan energi ini akan semakin menurun seiring waktu. *Refuse Derived Fuel* dari sampah kota (RDF MSW) hadir sebagai solusi energi alternatif yang berkontribusi dalam upaya pengurangan volume limbah, RDF MSW memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber bahan bakar sekunder bagi industri semen maupun pembangkit tenaga listrik. RDF MSW dihasilkan dari limbah domestik melalui proses pemilahan, pembentukan, dan pengeringan hingga siap digunakan sebagai bahan bakar [1]. Dibandingkan dengan bahan bakar fosil, RDF menawarkan beberapa kelebihan,

seperti kemampuan menurunkan emisi gas buang, pengelolaan residu abu yang lebih baik, serta menghasilkan energi dengan nilai kalor tinggi namun biaya produksi yang relatif rendah [2]. RDF MSW tidak hanya berperan dalam menekan konsumsi bahan bakar fosil, tetapi juga menawarkan alternatif penanganan terhadap akumulasi sampah di kawasan urban serta menyediakan alternatif energi terbarukan yang berperan dalam menekan tingkat emisi gas rumah kaca sesuai dengan target keberlanjutan lingkungan internasional.

Gasifikasi merupakan suatu metode termokimia yang mengubah bahan bakar padat menjadi bentuk gas (*syngas*). Saat ini, sistem *dual reaktor* dengan tipe *fluidized bed* sedang dikembangkan, terdiri atas dua bagian utama, yakni reaktor pembakaran dan reaktor gasifikasi. Pada reaktor pembakaran, berlangsung reaksi eksotermis

menghasilkan energi panas yang selanjutnya dimanfaatkan untuk mendukung proses endotermik yang berlangsung di reaktor gasifikasi [3]. Pencampuran batu bara dengan *Refuse Derived Fuel* (RDF) pada rasio 10%, 15%, dan 20% dalam proses *co*-gasifikasi tipe *fixed bed* menunjukkan bahwa peningkatan proporsi RDF dalam bahan bakar cenderung menurunkan total produksi gas dan residu karbon. Namun, konversi karbon tertinggi tercapai saat campuran mengandung 20% fraksi RDF [4]. Komponen anorganik dalam bahan bakar tidak hanya mengalami reaksi satu sama lain, tetapi juga bereaksi dengan *bed material*. Reaksi ini dapat memperkuat aktivitas katalitik dan meningkatkan efisiensi perpindahan oksigen pada reaktor *fluidized bed* [5]. Pemanfaatan RDF bersama batu bara mampu meningkatkan efisiensi energi dan mendukung konversi limbah menjadi sumber energi. Meski peningkatan kadar RDF cenderung menurunkan volume gas yang dihasilkan, efisiensi konversi karbon tetap tinggi. Selain itu, interaksi antara unsur anorganik dan *bed material* turut berkontribusi terhadap peningkatan aktivitas reaksi dalam sistem.

Penggunaan udara sebagai agen gasifikasi menghasilkan gas dengan nilai kalor yang relatif rendah dan kandungan nitrogen yang tinggi. Meskipun demikian, opsi ini dianggap lebih ekonomis dibandingkan dengan agen gasifikasi lainnya [6]. Gasifikasi biomassa dengan menggunakan uap air sebagai agen gasifikasi diketahui dapat meningkatkan volume gas yang dihasilkan, khususnya kandungan H_2 dan CO_2 . Namun, kandungan CO , CH_4 , serta nilai kalor rendah (*Low Heating Value* atau LHV) cenderung menurun dibandingkan jika menggunakan udara sebagai agen gasifikasi [7]. Selain itu, uap air juga menawarkan potensi sebagai alternatif yang dapat meningkatkan performa proses gasifikasi serta mendorong pembentukan hidrogen secara lebih optimal.

Panas yang dihasilkan dari reaksi oksidasi dalam reaktor pembakaran berperan penting sebagai sumber energi untuk menunjang berlangsungnya proses gasifikasi. Reaksi oksidasi ini terjadi pada zona pembakaran reaktor dengan temperatur tinggi, guna menghasilkan energi panas yang cukup. Pada reaksi reversibel yang bersifat eksotermis, peningkatan temperatur memang dapat mempercepat laju reaksi, namun secara termodinamik dapat menggeser kesetimbangan reaksi ke arah reaktan sehingga mengurangi efisiensi konversi. Sebaliknya, reaksi-reaksi endotermis yang dominan pada reaktor gasifikasi, seperti reforming dan cracking, sangat dipengaruhi oleh kondisi kinetika dan termodinamika. Oleh karena itu, menjaga temperatur yang tinggi di dalam reaktor gasifikasi menjadi krusial untuk memastikan reaksi berlangsung secara efisien dan berkelanjutan [8]. Selain panas dari reaksi oksidasi, temperatur reaktor juga sangat dipengaruhi oleh sifat termal dari agen gasifikasi yang digunakan, seperti uap air (H_2O). Uap air dengan temperatur tinggi tidak

hanya berperan sebagai reaktan dalam reaksi endotermis, tetapi juga sebagai media transfer panas di zona gasifikasi.

Mengacu pada pemaparan diatas, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana pengaruh profil temperatur *co*-gasifikasi yang dihasilkan dari *dual* reaktor *fluidized bed* berbahan bakar campuran batu bara dan RDF MSW dengan memvariasikan temperatur agen H_2O (uap air) sebesar, yaitu pada variasi I $130^{\circ}C$, variasi II $150^{\circ}C$, variasi III $170^{\circ}C$, dan variasi IV $190^{\circ}C$.

Penelitian ini dilakukan dengan sejumlah batasan yang mencakup antara lain:

1. Proses *co*-gasifikasi dilakukan menggunakan *gasifier dual* reaktor *fluidized bed*.
2. Pasir silika sebagai *bed material* berukuran 0,5-0,8 mm.
3. Temperatur pada reaktor pembakaran sebesar $650^{\circ}C$ & pada reaktor gasifikasi sebesar $600^{\circ}C$.
4. Massa *bed material* 0,6 kg dan massa bahan bakar 0,6 kg berupa campuran 90% batu bara dan 10% RDF MSW.
5. Kecepatan udara kompresor 8 m/s.

2. Dasar Teori

2.1 Co-Gasifikasi

Co-gasifikasi memadukan dua atau lebih jenis bahan bakar, seperti biomassa dan limbah padat, merupakan proses termokimia yang menghasilkan gas sintesis (*syngas*) dari bahan bakar padat melalui serangkaian reaksi kimia bertemperatur tinggi dalam kondisi terbatas oksigen. Reaksi yang terjadi mencakup proses eksotermis yang melepaskan panas serta proses endotermis yang memanfaatkan panas dari lingkungan sekitar, keduanya berlangsung akibat oksidasi sebagian dalam kondisi tidak stoikiometrik. Zona reaksi dalam reaktor memiliki rentang temperatur yang berbeda untuk masing-masing reaksi tersebut. Selain meningkatkan efisiensi dan memperluas jenis bahan baku yang dapat digunakan, juga turut mendukung pengurangan limbah dan pengembangan sumber energi yang lebih beragam dan berkelanjutan.

2.2 Agen Gasifikasi H_2O (Uap Air)

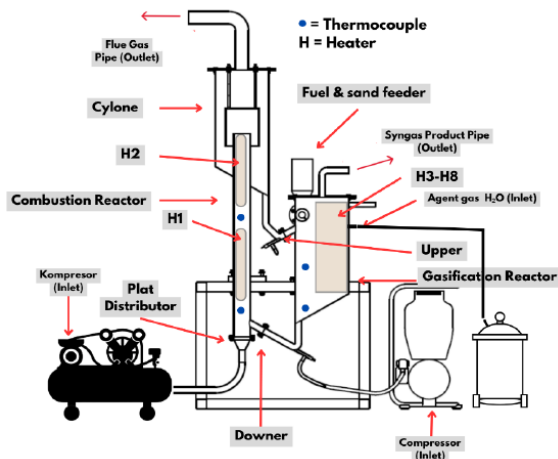
Tujuan utama dari proses gasifikasi adalah menghasilkan gas sintesis (*syngas*) dengan kandungan hidrogen (H_2) dan karbon monoksida (CO) yang tinggi. Jenis agen gasifikasi seperti udara, oksigen, uap air, karbon dioksida (CO_2), maupun kombinasinya dapat memengaruhi jalannya reaksi kimia, sehingga berdampak pada variasi komposisi *syngas* yang terbentuk [9]. Penggunaan uap air sebagai agen gasifikasi memiliki karakteristik tersendiri yang dapat memengaruhi jalannya reaksi kimia serta berkontribusi dalam menentukan komposisi gas sintesis (*syngas*) yang dihasilkan.

2.3 Temperatur Gasifikasi

Temperatur merupakan salah satu parameter operasi yang sangat penting dalam proses gasifikasi, karena dapat memengaruhi kandungan energi (nilai kalor) dan komposisi gas hasil (*syngas*). Hal ini berkaitan erat dengan prinsip-prinsip termodinamika dari reaksi-reaksi yang terjadi selama proses berlangsung. Temperatur unggun menunjukkan hubungan berbanding terbalik terhadap nilai kalor *syngas*, di mana peningkatan temperatur akan menyebabkan penurunan nilai kalor secara linier. Energi yang dibutuhkan dalam proses gasifikasi umumnya dipenuhi oleh panas dari pembakaran entalpi biomassa. Pada temperatur yang lebih tinggi, proses pembakaran berlangsung lebih intensif, sehingga menghasilkan gas hasil dengan kandungan energi yang lebih kaya [10].

3. Metode Penelitian

3.1 Deskripsi Gasifier Dual Reaktor Fluidized Bed

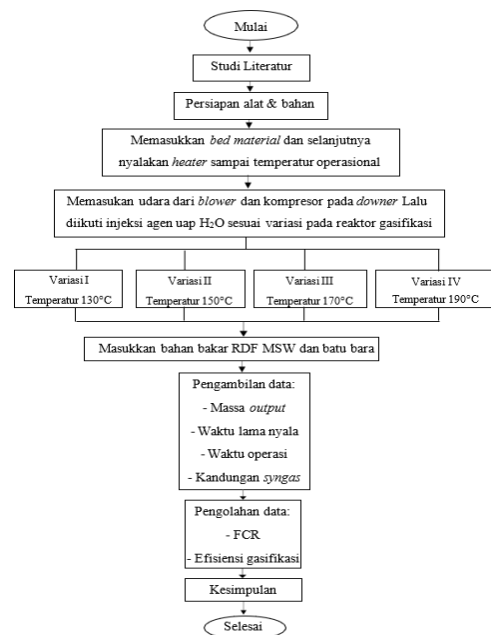


Gambar 1. Gasifier Tipe Dual Reaktor Fluidized Bed

Penelitian ini menggunakan *gasifier dual reaktor fluidized bed* dari *stainless steel schedule grade 304*, terdiri atas 2 komponen utama yaitu reaktor pembakaran dan reaktor gasifikasi yang terhubung secara termal. *Cyclone* berdiameter 152,4 mm di ujung reaktor berfungsi mengembalikan bahan bakar dan *bed material* agar pembakaran berlangsung optimal. Kedua reaktor dihubungkan dengan pipa berukuran 25,4 mm. Setiap reaktor dipasang *thermocouple* yang dikoneksikan dengan *data logger* yang berfungsi memantau dan merekam temperatur sepanjang operasi berlangsung. Temperatur dikendalikan menggunakan *thermocontrol* agar sesuai kondisi operasional. Pasokan udara untuk sirkulasi bahan bakar dan *bed material* disediakan oleh *blower*.

3.2 Alur Kerja Penelitian

Gambar berikut menyajikan alur kerja penelitian :



Gambar 2. Alur Kerja Penelitian

3.3 Peralatan Penelitian

1. Kompresor
2. Heater
3. Gas analyzer
4. Flowmeter
5. Thermocouple
6. Plat distributor
7. Thermocontrol
8. Pressure gauge
9. Glass wool
10. Ayakan mesh
11. Data logger
12. Anemometer
13. Boiler
14. Kompor gas
15. Laptop

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Uji Nilai Kalor

Analisis menggunakan kalorimeter bom dilakukan untuk mengukur kandungan energi panas yang terbentuk ketika bahan bakar mengalami pembakaran dalam setiap satuan massanya. Metode pengukuran ini memanfaatkan perangkat PARR 1341 *Oxygen Bomb Calorimeter* dengan mengikuti ketentuan standar ASTM D5865. Hasil pengukuran uji nilai kalor tersebut disajikan dalam tabel 1. Hasil uji bom kalor bahan bakar yang menampilkan data pengujian kalorimeter bom untuk bahan bakar.

Tabel 1. Hasil Uji Bom Kalor Bahan Bakar

Bahan Bakar	Massa (g)	Temperatur		Nilai Kalor	
		T1 (°C)	T2 (°C)	(cal/g)	(MJ/kg)
Batu Bara & 10% RDF MSW	0,99787	28,037	30,621	46665,858	19,5350141

4.2 Data Hasil Pengujian

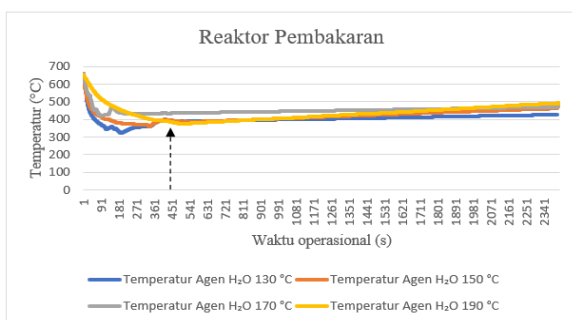
Melalui eksperimen yang telah dijalankan, didapatkan data mengenai massa bahan bakar sebelum dan sesudah proses, serta periode operasi yang mencakup rentang waktu gasifikasi dari tahap pengumpanan bahan bakar hingga pembentukan *syngas*. Pemantauan distribusi temperatur dalam reaktor dilakukan menggunakan *thermocouple* di beberapa titik pada reaktor pembakaran dan reaktor gasifikasi. Tabel 2. Data hasil pengujian yang telah diperoleh :

Tabel 2. Data Hasil Pengujian

Variasi Temperatur Agen H ₂ O (°C)	Massa Bahan Bakar (g)	Massa Arang (g)	Waktu Mulai Nyala (s)	Lama Nyala (s)	Waktu Operasi (s)	Kecepatan Output Syngas (m/s)
130	600	200	989	1421	2410	2,43
150	600	178	986	1427	2413	2,50
170	600	141	981	1439	2421	2,62
190	600	122	979	1444	2423	2,66

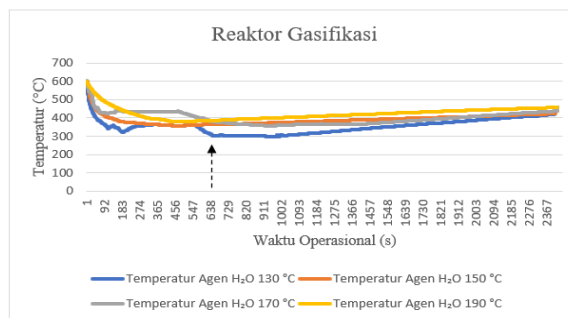
4.3 Data Profil Temperatur Dalam Dual Reactor Fluidized Bed

Pada saat pengujian setiap reaktor dipasang beberapa *thermocouple* di beberapa titik yang telah ditentukan sebelumnya. *Thermocouple* yang digunakan pada reaktor pembakaran yaitu T1, T2, dan pada reaktor gasifikasi yaitu T3, T4. Distribusi temperatur kerja diukur pada saat reaktor pembakaran mencapai 650 °C dan pada saat reaktor gasifikasi mencapai 600 °C, Kemudian bahan bakar mulai dimasukan hingga *syngas* tidak dihasilkan lagi.



Gambar 3. Grafik Temperatur Reaktor Pembakaran

Penurunan temperatur ini disebabkan oleh aliran udara yang dihembuskan blower ke dalam reaktor. Udara tersebut memberikan efek pendinginan sesaat sebelum bahan bakar mengalami pembakaran secara intensif. Namun, penurunan ini hanya berlangsung sementara karena bahan bakar kemudian mulai beroksidasi dengan udara dari blower, menghasilkan panas melalui reaksi eksotermis.



Gambar 4. Grafik Temperatur Reaktor Gasifikasi

Pada gambar 3. Grafik temperatur reaktor gasifikasi, penurunan temperatur juga teramati setelah reaktor mencapai temperatur kerja. Fenomena ini disebabkan oleh masuknya aliran udara dari blower serta injeksi gas agen berupa H₂O (uap air) ke dalam reaktor. Injeksi uap air menyebabkan efek pendinginan karena bercampur dengan lingkungan reaktor yang telah berada pada suhu tinggi. Meskipun demikian, penurunan temperatur ini bersifat sementara. Seiring waktu, bahan bakar mulai bereaksi dengan uap air melalui serangkaian reaksi kimia yang bersifat endotermik. Walaupun reaksi-reaksi tersebut menyerap panas, uap air juga membawa energi dalam bentuk entalpi. Energi ini berkontribusi terhadap peningkatan temperatur di dalam reaktor setelah tahap pendinginan awal. Injeksi uap air pada temperatur rendah, sekitar 120 °C, memberikan dampak negatif terhadap suhu reaktor dan memperlambat laju reaksi akibat kondisi termal yang kurang optimal. Hanya sebagian kecil dari uap air yang bereaksi secara efektif, sedangkan sisanya berkontribusi terhadap peningkatan kelembapan pada gas sintesis (*syngas*) [11].

5. Kesimpulan

Melalui hasil penelitian ini, dapat diketahui bagaimana pengaruh variasi temperatur agen gasifikasi H₂O (uap air) terhadap profil temperatur co-gasifikasi dalam *dual reactor fluidized bed* yang menggunakan bahan bakar batu bara dan RDF MSW dapat disimpulkan semakin tinggi peningkatan temperatur agen H₂O (uap air) dalam proses co-gasifikasi maka temperatur *dual reactor* cenderung meningkat secara perlahan sehingga *steady state*, yang mana dapat memberikan kestabilan pada proses co-gasifikasi karena mendukung berlangsung reaksi-reaksi endotermis yang diperlukan.

Daftar Pustaka

- [1] Rania, F. M., Lesmana, I. G. E., Maulana, E. ., Sawah J. (2019). *Analisis Potensi Refuse Derivrid Fuel (Rdf) Dari Sampah Pada Tempat Pembuangan Akhir (Tpa) Kabupaten Tegal Sebagai Bahan Bakar Incinerator Pirolisis*. 13(1).

- [2] Darmawan, R. S. A. C., Sihombing, A. L., & Cendrawati, D.G. (2021). *Potential And Characteristics Of Eichornia Crassipes Biomass And Municipal Solid Waste As Raw Materials For RDF In Co-Firing Coal Power Plants*. IOP Conference Series : Earth And Enviromental Science, 926(1).
- [3] Darma, I. W. A., Winaya, I. N. S., & Wirawan, I. K. G. (2018). *Studi Pengaruh Temperatur Reaktor Gasifikasi Terhadap Fuel Conversion Rate Gasifikasi Dual Reactor Fluidized Bed*. Jurnal Mettek,4(2), 37.
- [4] Smoliński, A., Wojtacha-Rychter, K., Król, M., Magdziarczyk, M., Polański, J., & Howaniec, N. (2022). *Co-Gasification Of Refuse Derived Fuels And Bituminous Coal With Oxygen/Steam Blend To Hydrogen Rich Gas*. Energy, 254
- [5] Kuba, M., Skoglund, N., Öhman, M., & Hofbauer, H. (2021). *A Review On Bed Material Particle Layer Formation And Its Positive Influence On The Performance Of Thermo-Chemical Biomass Conversion In Fluidized Beds*. In Fuel (Vol.291).Elsevier Ltd
- [6] Alwan , H. (2019). *Model Gasifikasi Biomassa Menggunakan Pendekatan Keseimbangan Termodinamika Stokiometrís Dalam Memprediksi Gas Produser*. In Jurnal Integrasi Proses (Vol. 8, Issue 1).
- [7] Kuntaryo, G., Azzahra, R. N., Ristriawan, R., & Pertiwi, S. (2022) . *Pengaruh Agen Gasifikasi Terhadap Komposisi Dan H₂/Co Gas Produser*.
- [8] Darma, I. W. A., Winaya, I. N. S., & Wirawan, I. K. G. (2018). *Studi Pengaruh Temperatur Reaktor Gasifikasi Terhadap Fuel Conversion Rate Gasifikasi Dual Reactor Fluidized Bed*. Jurnal Mettek,4(2), 37.
- [9] Islam, M. W. (2020). *Effect Of Different Gasifying Agent (Steam, H₂, Oxygen, CO₂, And Air) On Gasification Parameters*. International Journal Of Hydrogen Energy, 45 (36).
- [10] Ramos, A., Monteiro, E., Silva, V., & Roubou, A. (2018). *Co-Gasification And Recent Developments On Waste-To-Energy Conversion: A Review. Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 81, 380-398. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.037>.
- [11] Balas, M., Lisý, M., & Skála, Z. (2016) . *Steam Influence On Biomass Gasification Process*.

<https://www.researchgate.net/publication/304305367>.



Kean Juno Lais

Menyelesaikan program sarjana di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana tahun 2025.

Judul tugas akhir Performansi Co-Gasifikasi Dual Reaktor Fluidized Bed Berbahan Bakar Batu Bara Dan Rdf Msw (Municipal Solid Waste) Dengan Variasi Temperatur Agen H₂O (Uap Air)