

Studi Kecepatan Superfisial Terhadap Waktu Nyala Dan Laju Konsumsi Bahan Bakar Pada *Dual Reactor Fluidized Bed* Berbahan Bakar Serbuk Kayu

I Komang Suteja Agustara D. W. P, I Nyoman Suprpta Winaya dan
I Putu Lokantara

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Teknologi *dual reactor fluidized bed* (DFRB) adalah pengkonversian bahan bakar padat yang terfluidakan secara termokimia menjadi bahan bakar gas mudah terbakar. Proses ini memerlukan sekitar 50% udara pembakaran. Serbuk kayu adalah biomassa yang dapat digunakan sebagai sumber energi ramah lingkungan yang paling siap untuk menggantikan peran minyak bumi. Unit DFRB yang digunakan terdiri dari dua buah reaktor yang dibuat dengan bahan pipa *stainless steel* (SS304) berdiameter berdiameter 4 in(10,16cm) untuk reaktor gasifikasi dan pipa berdiameter 2 in(5,08cm) untuk reaktor pembakaran. Bahan bakar yang digunakan adalah serbuk kayu dengan massa 600 gram dan temperatur operasi dalam penelitian ini adalah 500°C pada reaktor gasifikasi dan 600°C pada reaktor pembakaran Hasil dari pengujian, pada unit gasifier *dual reactor fluidized bed* (DFRB) mempunyai lama nyala selama 153 detik pada Variasi Kecepatan Superfisial 17 m/s dan Fuel Consumption Rate Aktual (FCRa) yang didapat sebesar 6,93 kg/jam.

Kata kunci : *dual reactor fluidized bed* (DFRB), variasi kecepatan superfisial, bahan bakar serbuk kayu

Abstract

The dual reactor fluidized bed (DFRB) technology is a thermochemically fluidized convert of solid fuel into combustible gas. This process requires about 50% combustion air. Wood powder is a biomass that can be used as the most environmentally friendly energy source ready to replace the role of petroleum. The DFRB unit used consists of two reactors made with stainless steel pipe (SS304) diameter 4 in (10,16cm) in diameter for gasification reactor and 2 in (5.08cm) diameter pipe for reactor. The fuel used was 600 grams of wood powder and the operating temperature in this study was 500 ° C at the gasification reactor and 600 ° C in the combustion reactor. The results of the test, on the dual reactor fluidized bed (DFRB) gasifier unit have a flame duration of 153 second at the Variation of Superficial Velocity 17 m / s and Fuel Consumption Rate Actual (FCRa) obtained for 6.93 kg / hour.

Keywords: dual reactor fluidized bed (DFRB), superficial velocity variation, wood powder fuel

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara agraris yang memiliki hutan tropis yang luas dan memberikan banyak potensi sebagai sumber energi terbarukan namun sampai saat ini masih belum banyak dikembangkan. Salah satu energi terbarukan yang sangat potensial dikembangkan adalah energi biomassa. Biomassa adalah sumber energi terbarukan yang dihasilkan dari benda-benda di sekitar seperti kayu, limbah, kotoran hewan dan tanaman hidup. Terdapat beberapa pilihan teknologi yang tersedia untuk mengolah berbagai jenis biomassa menjadi sumber energi terbarukan.

Gasifikasi adalah suatu proses perubahan bahan bakar padat secara termokimia menjadi gas, dimana udara yang diperlukan lebih rendah dari udara yang diperlukan untuk proses pembakaran. Selama proses gasifikasi biomassa mengalami urutan tahapan-tahapan proses yang kompleks yaitu tahap pengeringan, pirolisis, pembakaran dan reduksi.

Penelitian tentang proses gasifikasi telah banyak dilakukan, antara lain tentang performansi co-

gasifikasi sirkulasi *fluidized bed* batu bara dan limbah bambu dengan variasi laju aliran bahan bakar, dimana dari penelitian tersebut disimpulkan bahwa semakin cepat bahan bakar terkonversikan menjadi gas maka nilai FCRa (*fuel consumption rate actual*), efisiensi gasifikasi dan kandungan gas mampu bakar meningkat [1]. Kemudian penelitian lain oleh Ketut Wijaya (2015) telah melakukan penelitian mengenai pengaruh komposisi biomassa serbuk kayu dan batu bara terhadap performansi pada co-gasifikasi sirkulasi *fluidized bed*. Dari hasil pengujian, didapatkan kandungan CO tertinggi dihasilkan pada system circulating *fluidized bed* yang disebabkan karena komposisi bahan bakar biomassa serbuk kayu yang lebih banyak dari batubara[2].

Pada penelitian sebelumnya proses gasifikasi dilakukan pada sebuah reaktor tunggal, dimana pada proses operasinya masih terdapat sejumlah arang (*char*) yang terbentuk dan menjadi masalah ketika dibuang ke lingkungan. Sehingga untuk mengatasi hal tersebut, salah satu cara yang akhir-

akhir ini mulai mendapat perhatian adalah penggunaan *dual-reaktorfluidized bed* (DRFB). Dalam penelitian ini akan mengalisis bagaimana pengaruh variasi kecepatan *superficial* terhadap performansi *dual-reaktorfluidized bed* (DRFB) dengan menggunakan bahan bakar serbuk kayu dan bed material pasir silika. Kecepatan *superficial* (semu), atau kecepatan luar yang masuk ke dalam reaktor diteliti karena sangat menentukan berlangsungnya proses sirkulasi hamparan (*bed*) dan bahan bakar di dalam reaktor sehingga mampu meningkatkan performansi system gasifikasi DRFB.

2. Landasan Teori

2.1 Definisi Biomassa

Biomassa adalah suatu bahan atau material yang didapatkan dari tanaman baik secara langsung maupun tidak langsung dan dimanfaatkan sebagai energi atau bahan dalam jumlah yang besar. Biomassa disebut juga sebagai ‘Fitomassa’ dan sering kali diterjemahkan sebagai *bioresources* atau sumber daya yang diperoleh dari hayati. Menurut Kamus Bahasa Inggris Oxford istilah biomassa pertama kali muncul diliteratur pada tahun 1934. Di dalam *journal of marine biology association*, ilmuwan rusia bernama *bogorov* menggunakan biomassa sebagai tatanama. Biomassa merupakan sumber daya terbarui dan energi yang diperoleh dari biomassa disebut energi terbarukan. Dari persektif sumber daya energi definisi umumnya adalah istilah umum untuk sumber daya hewan dan tumbuhan serta limbah yang berasal darinya dimana ia terkumpul dalam jangka waktu tertentu (tidak termasuk sumber fosil). Biomassa sangat beragam dan berbeda dalam hal sifat kimia, sifat fisis, kadar air, kekuatan mekanis dan sebagainya dan teknologi konversi menjadi bahan dan energi juga beragam [3].

Biomassa merupakan sumber energi terbarukan yang mengacu pada bahan biologis yang berasal dari organisme yang belum lama mati (dibandingkan dengan bahan bakar fosil). Sumber-sumber biomassa yang paling umum adalah bahan bakar kayu, limbah dan alkohol. Biomassa sangat efektif sebagai energi alternatif yang ramah lingkungan. Biomassa membentuk bagiannya sendiri melalui proses fotosintesis. Energi yang menggantikan bahan bakar fosil dapat diperoleh dari siklus, yaitu pembakaran biomassa, emisi kabondioksida dan refiksasi karbondioksida. Oleh karena itu, emisi karbondioksida dapat direduksi dengan cara mengganti bahan bakar fosil dengan biomassa. Sumber energi biomassa pun mempunyai kelebihan sebagai sumber energi yang dapat diperbaharui (*renewable*) sehingga dapat menjadi sumber energi dalam jangka waktu yang sangat lama dan berkesinambungan (*sustainable*). Pada penelitian ini akan digunakan biomassa serbuk kayu yang sudah berbentuk butiran dengan ukuran antara 0,4-0,5 mm.

2.2 Teknologi Gasifikasi

Teknologi gasifikasi merupakan salah satu bentuk peningkatan pemanfaatan energi yang terkandung di dalam bahan biomassa melalui konversi dari bahan padat menjadi gas, dengan menggunakan proses degradasi termal material-material organik pada temperatur tinggi di dalam pembakaran yang tidak sempurna. Proses ini berlangsung didalam suatu alat yang disebut reaktor/gasifier, bahan bakar biomassa dimasukkan kedalam reaktor untuk dibakar secara tidak sempurna. Pada penelitian ini, teknik gasifikasi yang akan digunakan adalah gasifikasi dengan *fluidized bed gasifier* (FBG) khususnya *Dual reaktor fluidized bed* (DRFB). DRFB dapat digunakan untuk mengolah bahan bakar kualitas rendah dengan kandungan abu tinggi, sehingga cocok digunakan untuk meningkatkan kualitas bahan bakar bernilai rendah. Kualitas fluidisasi adalah faktor paling utama yang mempengaruhi efisiensi sistem gasifikasi *Fluidized Bed*, keseragaman temperatur adalah hal yang sangat penting untuk menjaga kestabilan pembakaran, disamping itu juga berguna untuk mengurangi emisi dari polutan seperti hidrokarbon dan NO_x sebagai akibat hasil pembakaran yang tidak sempurna. Fluidisasi dapat didefinisikan sebagai suatu operasi dimana hamparan zat padat diperlakukan seperti fluida [4]. Di dalam kondisi terfluidisasi, gaya gravitasi pada butiran – butiran zat padat diimbangi oleh gaya seret dari fluida yang bekerja padanya. Bila zat cair atau gas dilewatkan melalui lapisan hamparan partikel pada kecepatan rendah, partikel itu tidak bergerak. Jika kecepatan fluida berangsur – angsur naik, partikel itu akhirnya akan mulai bergerak dan melayang di dalam fluida.

Dual reaktor fluidized bed merupakan sebuah pengembangan teknologi dari reaktor tipe *circulating fluidized bed* yang digabungkan dengan tipe *updraft gasifier*. Reaktor tipe *circulating fluidized bed* merupakan sebuah teknologi gasifikasi dengan proses sirkulasi yang memanfaatkan *cyclone*. *Cyclone* adalah komponen yang mampu mensirkulasikan kembali bahan bakar yang belum tergasifikasi sepenuhnya. Untuk *updraft gasifier* mempunyai kelebihan pada hasil pembakaran yang bersih, mudah dioperasikan dan arang yang dihasilkan lebih sedikit. Penggunaan dua buah reaktor dari penggabungan kedua tipe tersebut menjadikan *Dual-reaktorfluidized bed* (DRFB) sebuah teknologi dengan proses gasifikasi dan proses pembakaran yang terpisah. Terpisahanya proses gasifikasi dan proses pembakaran bertujuan untuk memisahkan proses reaksi endoterm dan eksoterm. Dengan memisahkan reaksi eksoterm dari reaksi endoterm, maka pereaksi dapat berupa udara yang melimpah sehingga dapat meningkatkan jumlah syngas yang dihasilkan. Selain itu dengan proses sirkulasi mampu mempertahankan area hamparan dari kehilangan panas (*heat-loss*) karena

akibat dari material hamparan yang ikut bersirkulasi dengan bahan bakar yang belum tergasifikasi sepenuhnya ke dalam reaktor sehingga dapat meningkatkan efisiensi, kualitas gas yang dihasilkan lebih maksimal dan lebih bersih serta lebih ramah lingkungan.

2.3 Kecepatan superfisial (*Superficial Velocity*)

Kecepatan superfisial adalah kecepatan udara pada saat tabung kosong. Kecepatan semu (U_o) didefinisikan sebagai laju aliran volume gas dibagi dengan luas penampang hamparan [4]. Jadi kecepatan superfisial (U_o) dapat ditentukan dengan rumusan sebagai berikut:

$$U_o = \frac{\dot{V}_g}{A_b} \text{ (m/s)} \quad (1)$$

dimana :

\dot{V}_g = Laju aliran volume gas (m^3/menit)

A_b = luas penampang hamparan (m^2)

Kecepatan superfisial (U_o) ditentukan nilainya berada diantara kecepatan minimum fluidisasi (U_{mf}) dan kecepatan terminal (U_t), sehingga laju aliran volume gas agen gasifikasi dapat dihitung.

2.4 Fuel Consumption Rate (FCR)

Perkiraan kecepatan bahan bakar yang dikonsumsi, dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\text{FCR} = \frac{V_{bb}}{F_g} \quad (2)$$

Dimana : V_{bb} = Laju masuk bahan bakar

F_g = Faktor gasifikasi (asumsi waktu proses gasifikasi terhadap waktu pemasukan bahan bakar yang disesuaikan dengan jumlah bahan bakar yang digunakan)

Bahan bakar yang dikonsumsi pada proses gasifikasi dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\begin{aligned} \text{FCR} &= \frac{\text{berat bahan bakar tergasifikasi}}{\text{waktu operasional}} \\ &= \frac{\text{berat bahan bakar-berat arang}}{\text{waktu operasional}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{jam}} \right) \quad (3) \end{aligned}$$

3. Metode Penelitian

Penelitian dan pengujian ini menggunakan peralatan dan bahan sebagai berikut:

3.1 Bahan Penelitian

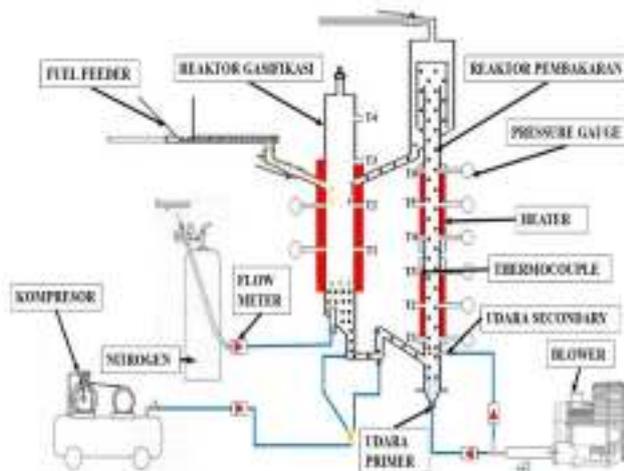
Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah biomassa serbuk kayu yang berbentuk butiran dengan ukuran yang sama yaitu antara 0,4 mm sampai 0,5 mm. Material hamparan (bed material) yang digunakan pada gasifikasi sirkulasi fluidized bed sangat berpengaruh terhadap berhasil tidaknya proses fluidisasi yang dihasilkan. Pasir silika merupakan material yang sangat baik dalam

menyimpan kalor. Pasir silika memiliki titik lebur yang tinggi sampai mencapai 18000°C , sehingga sangat cocok digunakan untuk aplikasi gasifikasi sirkulasi fluidized bed. Pasir silika yang digunakan sudah berbentuk butiran dengan ukuran yang sama yaitu antara 0,4 mm sampai 0,5 mm.

3.2 Alat Gasifikasi Dual Reactor Fluidized Bed

Penelitian ini dilakukan pada unit *dual reactor fluidized bed* (DFRB) yang dirancang untuk keperluan penelitian laboratorium. Unit DFRB yang digunakan terdiri dari dua buah reaktor yang dibuat dengan bahan pipa *stainless steel* (SS304). Sebuah reaktor berfungsi untuk gasifikasi yang dibuat dengan pipa berdiameter 4 in (10,16cm) dan yang lain berfungsi untuk pembakaran yang terbuat dengan pipa berdiameter 2 in (5,08cm). Pada ujung bagian atas reaktor pembakaran terdapat sebuah siklon yang terbuat dari pipa berdiameter 6 in (15,24cm) yang berfungsi untuk mensirkulasikan kembali material hamparan (*bed material*) dan sisa bahan bakar yang belum terbakar dengan sempurna ke reaktor gasifikasi. Kedua reaktor tersebut dihubungkan oleh upper dan downer yang terbuat dari pipa berdiameter 1 in (2,54cm). Pada reaktor gasifikasi dibuatkan sebuah pengaman dari pipa berdiameter 1 in (2,54cm) yang dihubungkan ke sebuah tabung yang berisi air.

Pada reaktor pembakaran dipasang 10 buah *pressure gauge* dan 10 buah *thermocouple* untuk melihat bagaimana distribusi tekanan dan temperatur pada reaktor tersebut. Sedangkan pada reaktor gasifikasi dipasang 4 buah *pressure gauge* dan 4 buah *thermocouple*. Masing-masing reaktor dipasangkan thermostat yang digunakan untuk mengatur temperatur di dalam reaktor tetap konstan. Udara yang akan dimasukkan ke dalam reaktor pembakaran agar bed material dan bahan bakar terfluidisasi adalah udara dari blower yang dibagi menjadi 2 yaitu udara primer dan sekunder. Adapun kecepatan udara yang divariasikan adalah kecepatan pada udara primer sedangkan pada udara sekunder dibuat konstan. Sedangkan udara yang dihasilkan oleh kompresor akan digunakan pada downer untuk mensirkulasikan bed material dan bahan bakar ke dalam reaktor pembakaran dari reaktor gasifikasi. Berikut adalah skematik dari unit *dual reactor fluidized bed* yang digunakan dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Skematik dual reactor fluidized bed (DRFB)

Pertama siapkan alat uji dual reactor fluidized bed gasifier. Kemudian cek aliran kelistrikan agar tidak terjadi arus pendek (*short current*), lalu siapkan bahan bakar biomassa berupa serbuk kayu dan material hamparan pasir silika masing-masing sebanyak 600 gram. Persiapkan alat ukur seperti flow meter, pressure gauge, anemometer, data logger dan laptop untuk pengujian distribusi temperatur. Masukkan material hamparan pasir silika kedalam reaktor melalui *fuel feeder*, kemudianyalakan blower dan kompresor untuk mengatur kecepatan udara sesuai dengan variasi yang sudah ditentukan. Kemudian alirkan N₂ selama 5 menit untuk proses pembilasan agar menetralsir udara/oksigen dengan kecepatan 20,7 liter/s yang diukur menggunakan flow meter. Buka aplikasi NI MAX pada laptop kemudian hubungkan *thermocouple* dengan data logger selanjutnya uji *thermocouple* dan lihat pada aplikasi NI MAX apakah sudah terbaca atau tidak. Nyalakan heater sampai temperatur pada reaktor gasifikasi 500°C dan reaktor pembakaran 600°C. Kemudian hembuskan udara blower dan juga kompresor agar bed material bersirkulasi dan masukkan butiran biomassa serbuk kayu melalui *fuel feeder* sebanyak 600 gram. Catat waktu operasi menggunakan *stop watch*, kemudian ambil foto setiap 10 detik untuk data distribusi tekanan. Uji nyala gas hasil gasifikasi. Jika sudah menyala ambil sampel gas kemudian simpan menggunakan probe gas analyser. Setelah pengambilan sample selesai, uji lama nyala dari *syngas* hingga tidak ada lagi gas yang keluar dan catat waktu lama nyala. Selesai pengujian matikan arus listrik baik dari blower maupun heater. Keluarkan sisa arang dari dalam reaktor melalui *downer* hingga bersih. Gas yang di simpan di dalam tabung selanjutnya dibawa ke Laboratorium forensik Denpasar untuk mengetahui komposisi dari *syngas* yang dihasilkan. Ulangi pengujian dengan variasi kecepatan superfisial yang lain.

4. Hasil Dan Pembahasan

4.1 Pengujian Bahan Bakar

Pada penelitian ini menggunakan bahan bakar serbuk kayu yang dibeli secara online, maka untuk dapat mengetahui presentase komposisi yang terdapat pada bahan bakar serbuk kayu terlebih dahulu dilakukan pengujian *proximate analysis* untuk mengetahui kandungan unsur-unsur fisika dari bahan bakar serbuk kayu tersebut, seperti: kadar air (*moisture*), abu (*ash*), karbon tetap (*fixed carbon*) dan bahan mudah menguap (*volatile*) dapat dilihat pada Tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1 Hasil Pengujian Proximate Analysis Serbuk Kayu

Bahan Bakar	Moisture (%)	Volatile (%)	Ash (%)	Fix Carbon (%)
Serbuk Kayu	13,36	70,11	1,33	14,02

Dari hasil pengujian *Proximate Analysis* serbuk kayu yang dilakukan didapat kandungan yang paling tinggi yaitu bahan mudah menguap (*volatile*) sebesar 70,11% dan kandungan abu (*ash*) yang paling rendah yaitu 1,33%.

Sedangkan pengujian *ultimate analysis* dilakukan untuk mengetahui unsur-unsur kimia pada bahan bakar serbuk kayu, yaitu: Carbon (C), Hydrogen (H), Oxygen (O) Nitrogen (N), dan Sulfur (S) dapat dilihat pada Tabel 2 dibawah ini.

Tabel 2 Hasil Pengujian Ultimate Analysis Serbuk Kayu

No	Bahan Bakar	Carbon (%)	Hydrogen (%)	Oxygen (%)	Nitrogen (%)	Sulfur (%)
1	Serbuk kayu	48,5	5,48	42,3	0,048	0,006
2	Serbuk kayu 2	52,0	5,72	37,9	0,070	0,006
Rata-Rata		50,2	5,60	40,1	0,059	0,006

Dari hasil pengujian *Ultimate Analysis* serbuk kayu yang dilakukan didapat kandungan yang paling tinggi yaitu Carbon (C) sebesar 50,265% dan kandungan Sulfur (S) yang paling rendah yaitu 0,00165%. Selanjutnya dilakukan uji nilai kalor dari bahan bakar serbuk kayu dengan menggunakan bom kalorimeter. Bom kalorimeter merupakan alat untuk mengetahui jumlah kalor yang dibebaskan pada pembakaran sempurna suatu bahan bakar. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui nilai kalor yang mampu dibangkitkan dari setiap sampel bahan bakar yang diuji menggunakan bom kalori meter seperti yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Hasil Pengujian Bom Kalorimeter Serbuk Kayu

Bahan Bakar	Berat Sampel (gr)	Nilai Kalor (Qc)		
		Sampel (Cal/gr)	Rata-Rata (Cal/gr)	(J/gr)
Serbuk Kayu 1	1	6046,616	6125,175	19800,419
Serbuk Kayu 2	1	6203,733		

Sumber : Jaya Kelana, 2014 [5].

4.2 Data Hasil Penelitian

Setelah dilakukan penelitian serta pengamatan yang telah diterangkan dalam metodologi penelitian, maka diperoleh data berupa massa input, massa output, lama nyala, waktu operasi dari reaktor. Waktu operasi merupakan durasi lama proses percobaan gasifikasi dari mulai memasukkan bahan bakar hingga sampai terciptanya gas mampu bakar (*syngas*).

Untuk mempermudah memahami hasil penelitian, data - data tersebut disajikan dalam bentuk tabel. Berikut data hasil penelitian yang telah dilakukan dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4 Data Hasil Penelitian Variasi Kecepatan Superfisial (m/s) Serbuk Kayu

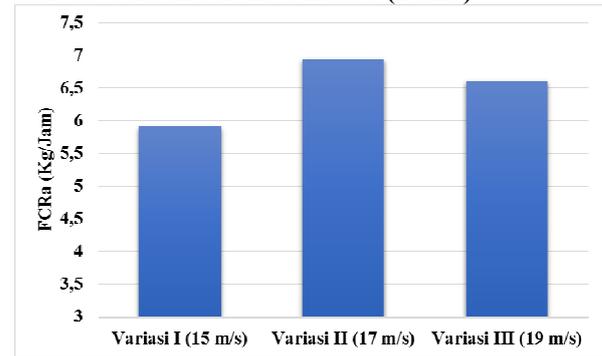
Variasi Kecepatan Superfisial (m/s)	Massa Bahan Bakar (gram)	Massa Arang (gram)	Waktu Mulai Menyala (detik)	Waktu Lama Nyala (detik)	Waktu Operasi (detik)
Variasi I (15 m/s)	600	87	187	126	313
Variasi II (17 m/s)	600	109	102	153	255
Variasi III (19 m/s)	600	138	117	135	252

Lama nyala merupakan waktu dari terbakarnya *syngas* yang dihasil dari proses gasifikasi bahan bakar serbuk kayu dengan unit *dual reactor fluidized bed*, seperti yang terlihat pada gambar 2 dibawah ini.



Gambar 2. Lama Nyala

4.3 Fuel Consumption Rate Actual (FCRa)



Gambar 3. Grafik Perbandingan Variasi Kecepatan Superfisial Terhadap FCR Aktual

Berdasarkan grafik pada Gambar 3., pada Variasi II dengan kecepatan superfisial 17 m/s didapat berat rang yang lebih kecil dari Variasi III dengan kecepatan superfisial 19 m/s maka bahan bakar serbuk kayu yang tergasifikasikan lebih banyak. Untuk waktu operasinya pada Variasi II dengan kecepatan superfisial 17 m/s lebih kecil dari Variasi I dengan kecepatan superfisial 15 m/s. Sehingga dapat disimpulkan bahwa dari setiap variasi kecepatan superfisial yang divariasikan pada bahan bakar serbuk kayu, FCRa tertinggi didapat pada Variasi II (17m/s) yaitu sebesar 6,93 Kg/Jam.

5. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan mengenai Studi Kecepatan Superfisial Terhadap Waktu Nyala Dan Laju Konsumsi Bahan Bakar Pada *Dual Reactor Fluidized Bed* Berbahan Bakar Serbuk Kayu, disimpulkan bahwa :

1. Lama nyala dari pembakaran *syngas* hasil gasifikasi terlama didapat pada Variasi II yang terjadi selama 153 detik. Hal ini terjadi karena banyak bahan bakar serbuk kayu tergasifikasikan maka akan meningkatkan jumlah *syngas* yang diproduksi.
2. Pada variasi kecepatan superfisial 17 m/s didapat performansi *Fuel Consumption Rate Actual* (FCRa) = 6,93 kg/jam yang dimana dipengaruhi oleh cepatnya bahan bakar tergasifikasi dan sedikitnya arang yang dihasilkan.

Daftar Pustaka

- [1] Wigya Nata, Gede. 2015. "Performansi co-gasifikasi sirkulasi fluidized bed batu bara dan limbah bambu dengan variasi laju aliran bahan bakar". Skripsi Sarjana Universitas Udayana.
- [2] Wijaya, Ketut. 2017. "Pengaruh Komposisi Biomassa Dan Batubara Terhadap Performansi pada Co-Gasifikasi Sirkulasi Fluidized bed". Jurnal METTEK Volume 3 No 1.

- [3] Shinya Yokoyama, 2008, "**The Asian Biomass Handbook**", The Japan Institute of Energy.
- [4] Basu Prabir and Fraser Scott A.,1991, **Circulating Fluidized Bed Boilers : Design and Operations**, Hainemann, USA
- [5] Jaya Kelana, Krisna. 2014. "Pengaruh Komposisi *Campuran Bahan Bakar Batubara dan Serbuk Kayu Terhadap Performansi Fluidized Bed Gasifier.*" Skripsi Sarjana Universitas Udayana.