

Pengaruh Tinggi *Bed* Terhadap Kecepatan Minimum Fluidisasi dan Distribusi Temperatur Dalam *Fluidized Bed Combustor*

Kevin Kristiantana, Tri Agung Rohmat, Purnomo

Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika 2 Yogyakarta 55281
Email:triagung_rohmat@ugm.ac.id

Abstrak

Pemanfaatan biomassa dalam jumlah besar sebagai bahan bakar alternatif merupakan salah satu kunci penting dalam usaha diversifikasi energi untuk ketahanan nasional. Biomassa merupakan sumber energi yang melimpah di Indonesia. Tetapi karena ketersediaannya tergantung kepada musim maka pemanfaatannya tidak dapat diandalkan untuk pemenuhan kebutuhan listrik primer. Di lain pihak, teknologi *fluidized bed combustor* (FBC) merupakan teknologi pembakaran yang mempunyai banyak keunggulan, diantaranya emisi gas NO_x yang rendah dan kemampuan *co-firing* beberapa bahan bakar padat. Dalam rangkaian *road map* penelitian yang telah penulis rencanakan, akan diteliti *co-firing* antara batu bara dan biomassa dalam sebuah FBC. Sedangkan pada penelitian ini, sebagai penelitian inisiasi, maka akan diteliti pengaruh tinggi *bed* terhadap (a) kecepatan minimum fluidisasi, (b) dan distribusi temperatur FBC berbahan bakar batu bara.

Dalam penelitian ini digunakan *combustor* jenis *bubbling fluidized bed*. *Combustor* terdiri dari dua bagian, yaitu bagian berbentuk silinder (diameter 63 cm, tinggi 180 cm) dan bagian bawah berbentuk *cone* (diameter bawah 12,5 cm, tinggi 60 cm). Sebagai material *bed*, digunakan pasir silika dengan orde ukuran berkisar 300 μ m. Batubara yang digunakan merupakan batubara yang berasal dari Kalimantan Selatan dengan nilai kalor 4850 kcal/kg. Sebagai pengukur beda tekanan di dalam ruang berbentuk *cone* digunakan manometer-U, adapun untuk pengukuran kecepatan minimum fluidisasi digunakan *orifice plate*. Pengukuran temperatur menggunakan termokopel tipe-K yang direkam dalam sebuah *data logger*.

Sebagai hasilnya, didapatkan bahwa kecepatan minimum fluidisasi akan meningkat apabila ketinggian *bed* dinaikkan. Untuk ketinggian material *bed* antara 25~35 cm, kecepatan minimum fluidisasi berkisar antara 1,6 m/s hingga 2,5 m/s. Adapun mengenai distribusi temperatur, didapatkan *area-weighted temperature* mengalami penurunan apabila ketinggian *bed* dinaikkan dengan nilai maksimum berkisar 820~780 °C yang didapatkan pada kondisi udara lebih berkisar 30%.

Keywords: *bubbling fluidized bed combustor*, *co-firing*, kecepatan minimum fluidisasi, biomassa

Pendahuluan

Pembangkit listrik tenaga biomassa (PLTB) mampu menyediakan listrik yang handal untuk kebutuhan beban dasar maupun kebutuhan *backup*. Akan tetapi, PLTB masih dianggap sebagai bagian kecil dari skenario besar pemenuhan kebutuhan listrik, sehingga kapasitas satu unitnya hanya berkisar antar 25-50 MW dan dipakai secara lokal [Munir, 2010]. Dalam pengembangan unit dengan kapasitas 600 MW atau lebih besar timbul tantangan-tantangan. Ketersediaan bahan bakar biomassa dan bagaimana menghasilkan energi panas secara efektif menjadi isu yang krusial. Isu yang pertama dapat diselesaikan dengan metode *co-firing*, di mana biomassa dapat digunakan apabila jumlahnya berlimpah dan ekonomis dalam pemanfaatannya.

Metode *co-firing* dapat dilakukan pada pembangkit dengan *pulverized-coal* melalui

pencampuran langsung batubara dengan biomassa atau injeksikan biomassa secara langsung ke dalam dapur. Secara umum, pencampuran langsung hanya dapat menambahkan 4-5%, sedangkan injeksi langsung dapat meningkatkan persentase biomassa sampai 10% [Pedersen, 1998]. Penambahan biomassa dapat menurunkan efisiensi boiler karena kandungan airnya yang tinggi dan rendahnya nilai kalor dari biomassa dibandingkan batubara.

Sebagai salah satu opsi solusi isu kedua, metode *co-firing* dapat dilakukan pada pembangkit dengan *fluidized bed* (FBC). Keuntungan dari penggunaan FBC ini adalah (a) temperatur pembakaran dapat dipertahankan relatif rendah (820~950 °C) sehingga membatasi terbentuknya NO_x, (b) dapat membakar hampir segala jenis bahan bakar padat, mulai dari yang berkualitas tinggi sampai yang berkualitas rendah dengan nilai kalor rendah, kandungan abu dan *moisture*

tinggi, (c) memungkinkan pengikatan SO₂ di dalam ruang bakar secara langsung, (d) *residence time* bahan bakar di dalam ruang bakar relatif panjang yang menjamin bahan bakar padat dapat terbakar habis sehingga menaikkan efisiensi pembakaran.

Karakteristik pembakaran dalam sebuah *bubblingFBC* dipengaruhi oleh pembentukan gelembung udara (*bubble*) akibat proses fluidisasi partikel *bed material*. Gelembung-gelembung udara menentukan proses pencampuran *bed material* dengan bahan bakar padat. Performa dari FBC akan semakin bagus apabila karakteristik dari gelembung dapat diketahui dan distribusi dari gelembung dapat diatur (Croxford & Gilbertson, 2007). Di lain pihak aliran resirkulasi dalam *bed material* diketahui mempengaruhi proses pencampuran bahan bakar dan *bed material*. Di mana pola aliran resirkulasi ditentukan oleh rasio lebar dan tinggi *bed* (Sánchez-Delgado et al., 2006). Atimtay dan Kaynak (2008) meneliti *co-firing* antara 75% (wt) biji buah persik dan 25% batubara. Sebagai hasilnya ditunjukkan bahwa temperatur maksimal terjadi pada daerah beberapa sentimeter di atas *bed material* karena terbakarnya kandungan volatil biji buah persik dan juga batubara di daerah tersebut.

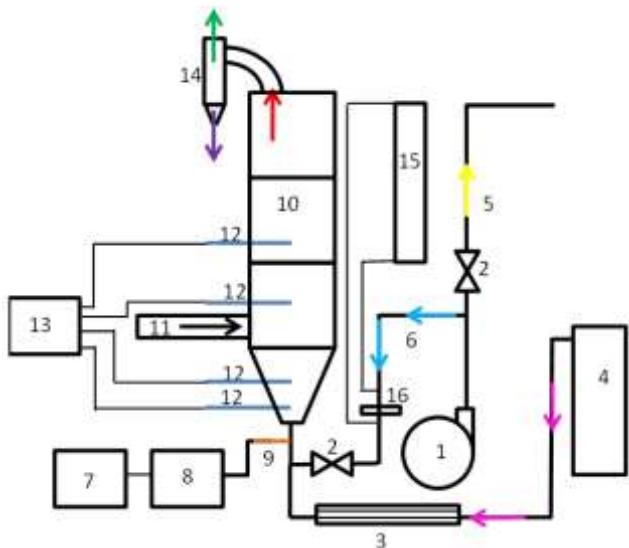
Dalam penelitian ini, akan diteliti karakteristik pembakaran *single-firing* batu bara dalam *bubbling FBC* sebagai penelitian inisiasi *co-firing* antara batubara dan biomassa. Di sini karakteristik pembakaran adalah distribusi temperatur. Sebagai parameter penelitian adalah tinggi *bed* dengan memvariasikan udara lebih yang digunakan.

Metoda Eksperimen

Bubbling fluidized bed combustor (BFBC) yang digunakan terdiri dari empat tingkat dengan tiga tingkat bagian atas berbentuk silinder dengan diameter 63 cm dan tinggi masing-masing tingkat 60 cm. Sedangkan untuk tingkat paling bawah berbentuk kerucut terpotong dengan diameter besar 63 cm, diameter kecil 12,7 cm dan tinggi 60 cm. Keseluruhan material dari dinding BFBC ini terbuat dari *stainless steel* dengan tebal 2 mm. Gambar skematis dari BFBC, peralatan utama lainnya dan peralatan pendukung ditunjukkan oleh Gambar 1.

Sebagai *bedmaterial* digunakan pasir kuarsa dengan diameter berorde 300 µm yang diletakkan di atas distributor udara. Udara dialirkan melalui distributor udara dari arah bawah dengan menggunakan blower berdaya 20 hp. Debit udara

diatur menggunakan *stop valve* dan diukur menggunakan orifis. Sebagai bahan bakar digunakan batubara Kalimantan Selatan yang disuplai menggunakan *screw feeder*. *Proximate analysis* dari batubara dapat dilihat pada Tabel 1. Untuk pemanasan awal, digunakan gas LPG sebagai bahan bakar yang dialirkan secara konsentrik dengan udara. Pemanasan awal diperlukan untuk menaikkan temperatur *bed* sampai temperatur *autoignition* dari *volatile matter* batu bara sehingga ketika batubara disuplai maka dapat terjadi pembakaran secara sendiri.



- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| 1. Blower | 9. Busi |
| 2. Katup | 10. <i>Combustor</i> |
| 3. Rotameter | 11. <i>Screw feeder</i> |
| 4. Tabung gas LPG | 12. Termokopel |
| 5. Saluran udara bypass | 13. <i>Data logger</i> |
| 6. Saluran udara utama | 14. Siklon |
| 7. Aki | 15. Manometer udara |
| 8. Rangkaian elektronik | 16. Orifis |

Gambar 1. Skema Alat Penelitian BFBC

Tabel 1 Proximate Analysis Batubara

Proximate Analysis(%wt)	
<i>Moisture</i>	18%
<i>Fixed Carbon (FC)</i>	39%
<i>Volatile Matter (VM)</i>	38%
<i>Ash</i>	5%
<i>LHV</i>	4850 kal/g

Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan termokopel tipe K, yang dipasang pada beberapa posisi seperti pada Tabel 2, yang dihubungkan dengan OMRON RX-45 Data Logger,. Pada tiap posisi diukur temperatur dari pusat silinder ke arah radial tiap 50 mm. Temperatur radial di tiap posisi kemudian diolah menjadi temperatur aksial dengan metode *area-weighted-averaging*.

Tabel 2. Posisi termokopel pada BFBC

Termokopel	Jarak Dari Distributor Udara (cm)
1	15
2	30
3	65
4	125

Eksperimen dilakukan dengan kondisi seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Kondisi Eksperimen

Kasus	Excess air (%)	Laju massa batubara (kg/h)	Laju massa udara (kg/h)	Tinggi Bed (cm)
A	9,16	5	48,26	25
B	29,60		57,30	
C	58,56		70,10	
D	9,16	5	48,26	28
E	29,60		57,30	
F	58,56		70,10	
G	9,16	5	48,26	31
H	29,60		57,30	
I	58,56		70,10	

Hasil dan Pembahasan

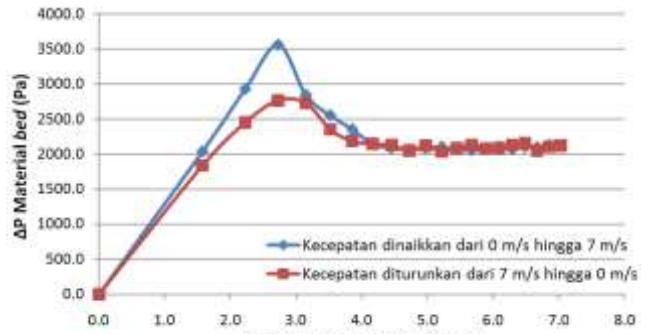
Gambar 2 (a)~(c) menunjukkan hubungan antara kecepatan udara masuk dan beda tekanan pada *bed*. Kecepatan udara masuk di sini merupakan kecepatan *superficial* udara *U* setelah melewati lubang distributor udara. Kecepatan minimum fluidisasi *U_{mf}* terjadi pada titik temu antara grafik kecepatan udara yang diturunkan terhadap grafik kecepatan udara yang dinaikkan.

Dari gambar (a) dapat diketahui bahwa kecepatan minimum fluidisasi untuk ketinggian material *bed* 25 cm terjadi pada saat kecepatan udara masuk kurang lebih 1,6 m/s. Dari gambar (b), apabila tinggi *bed* dinaikkan menjadi 30 cm maka kecepatan minimum fluidisasi meningkat menjadi sekitar 2 m/s. Adapun kecepatan minimum fluidisasi pada tinggi *bed* 35 cm adalah kira-kira 2,5 m/s. Besarnya kecepatan minimum fluidisasi ini menentukan distribusi gelembung pada *bed* BFBC. Hal ini akan sangat mempengaruhi proses pembakaran BFBC.

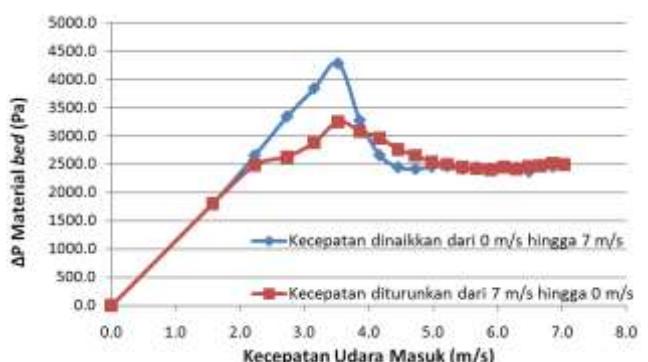
Pengaruh tinggi *bed* terhadap distribusi temperatur aksial dapat dilihat pada Gambar 3 (a)~(d) yang masing-masing menunjukkan posisi termokopel. Temperatur ini diambil pada udara lebih 29,6 %.

Pada posisi termokopel 1 ($H_{tc}=15$ cm), temperatur turun seiring dengan meningkatnya ketinggian dari material *bed*. Temperatur yang ditunjukkan

termokopel 1 ini masing-masing adalah 817 °C pada tinggi *bed* 25 cm, 809 °C pada tinggi *bed* 28 cm dan 784 °C pada tinggi *bed* 31 cm.



(a) Tinggi $bed_b = 25$ cm



(b) Tinggi $bed_b = 30$ cm



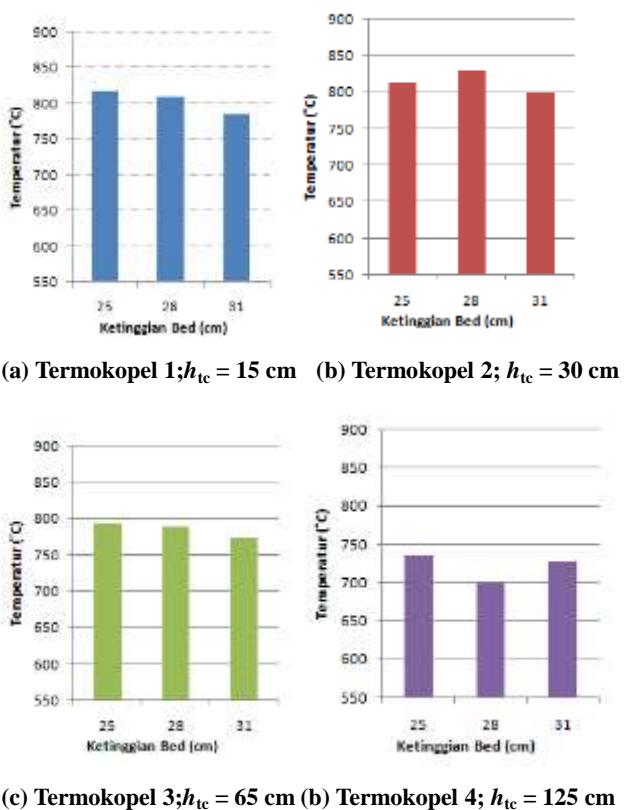
(c) Tinggi $bed_b = 35$ cm

Gambar 2. Kecepatan Minimum Fluidisasi

Temperatur pada posisi termokopel 2 ($H_{tc}=30$ cm) sedikit berbeda dari temperatur pada posisi termokopel 1. Temperatur untuk tinggi *bed* 25 cm, yaitu 814 °C, lebih rendah dibandingkan dari temperatur untuk tinggi *bed* 28 cm, yaitu 830 °C. Selanjutnya temperatur untuk tinggi *bed* 31 cm turun hingga 799 °C.

Pada posisi termokopel 3 ($H_{tc}=65$ cm), profil temperatur mempunyai kecenderungan sama dengan profil temperatur pada posisi termokopel 1 yaitu mengalami penurunan seiring dengan kenaikan tinggi *bed*. Untuk tinggi *bed* 25, 28, dan 31 cm masing-masing

temperaturnya adalah 793°C, 790°C, dan 775 °C. Adapun pada posisi termokopel 4 ($H_{tc}=125$ cm), profil temperatur menunjukkan kecenderungan yang berbeda dengan profil temperatur pada ketinggian



(a) Termokopel 1; $h_{tc} = 15$ cm (b) Termokopel 2; $h_{tc} = 30$ cm
(c) Termokopel 3; $h_{tc} = 65$ cm (d) Termokopel 4; $h_{tc} = 125$ cm

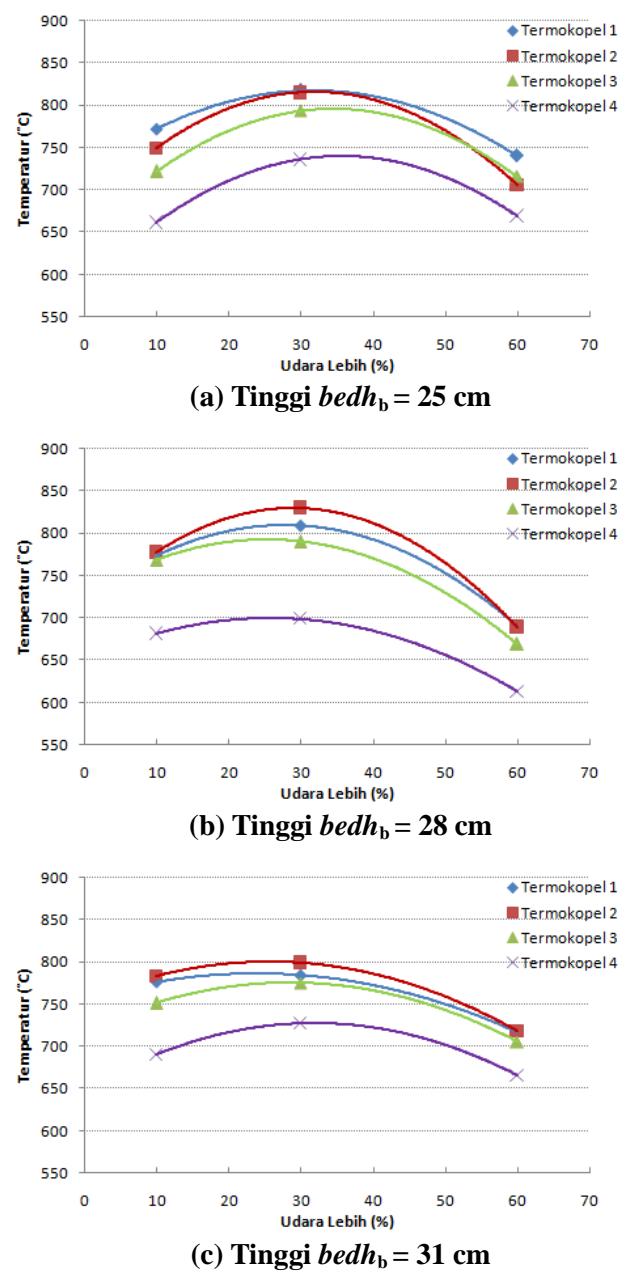
Gambar 3. Pengaruh Tinggi Bed Terhadap Temperatur Aksial

yang lain, di mana temperatur untuk tinggi bed 28 cm menunjukkan nilai 699 °C paling rendah dibandingkan temperatur untuk tinggi bed 25 cm, yaitu 736 °C, dan tinggi bed 31 cm yaitu 727 °C.

Bagaimanakah perubahan temperatur pada tinggi bed yang berbeda ketika udara lebih divariasiakan 9,1%, 29,6% dan 58,5% dapat dilihat pada Gambar 4 (a)~(c), di mana masing-masing menunjukkan profil pada tinggi 25, 28, dan 31 cm.

Gambar 4 (a) menunjukkan pada tinggi bed 25 cm, pada semua variasi udara lebih termokopel 1 menunjukkan temperatur paling tinggi. Pada tinggi bed 25 cm, termokopel 1 ini terletak di dalam bed dan temperatur yang diukur merupakan temperatur dari bed material. Pada ketinggian ini data menunjukkan temperatur 771 °C, 817°C, dan 739 °C masing-masing untuk udara lebih 9,1 %, 29,6 %, dan 58,5 %. Pada posisi termokopel 4, didapatkan temperatur paling rendah dibandingkan dengan posisi termokopel yang lainnya yaitu 661 °C pada udara lebih 9,1 %, 736°C pada udara lebih 29,6 %, dan 669 °C pada udara lebih 58,5%.

Gambar 4 (b) menggambarkan perubahan temperatur pembakaran terhadap variasi udara lebih pada tinggi bed sebesar 28 cm. Pada gambar ini, terlihat bahwa temperatur paling tinggi pada setiap variasi udara lebih terdapat pada posisi termokopel 2. Temperatur yang ditunjukkan oleh termokopel 2 pada setiap variasi udara lebih adalah 777 °C pada udara lebih 9,1 %, 830°C pada udara lebih 29,6 %, dan 689 °C pada udara lebih 58,5%. Pada posisi termokopel 1, temperatur lebih rendah dibandingkan dengan termokopel 2. Temperatur pada termokopel 1 untuk setiap udara lebih adalah 773 °C pada udara lebih 9,1 %, 809 °C pada udara lebih 29,6 %, dan 691°C pada udara lebih 58,5 %. Pada posisi termokopel 3, temperatur lebih rendah dibandingkan pada posisi termokopel 1 dan 2, tetapi jauh lebih tinggi dibandingkan termokopel 4.



Gambar 4. Temperatur Aksial Pada Berbagai Kondisi Udara Lebih dan Tinggi Bed

Adapun Gambar 4 (c) menunjukkan grafik karakteristik temperatur pembakaran terhadap variasi udara lebih pada tinggi *bed* 31 cm. Dari gambar ini dapat diketahui bahwa pada posisi termokopel 2, temperatur lebih tinggi dibandingkan dengan termokopel lainnya. Pada ketinggian material *bed* 31 cm, termokopel 2 terletak di dalam material *bed* atas sedikit di atas *bed*. Termokopel 2 ini mempunyai temperatur 782 °C pada udara lebih 9,1%, 798 °C pada udara lebih 29,6%, dan 718 °C pada udara lebih 58,5%. Pada posisi termokopel 1 yang juga terletak di dalam *bed*, temperatur lebih rendah dibandingkan dengan posisi termokopel 2 yaitu 776 °C pada udara lebih 9,1%, 784°C pada udara lebih 29,6%, dan 712 °C pada udara lebih 58,5%. Termokopel 3 memiliki temperatur di bawah termokopel 1 dan 2, tetapi masih lebih tinggi dibandingkan dengan temperatur pada termokopel 4.

Diskusi

Dari hasil tersebut di atas, diketahui karakteristik temperatur pembakaran batubara pada BFBC dipengaruhi oleh tinggi *bed* dan udara lebih yang digunakan. Kedua variabel tersebut akan mempengaruhi pembentukan dan distribusi gelembung di dalam material *bed* dan juga proses pencampuran material-material padat pada *bed* yang disebabkan oleh efek fluidisasi. Pengaruh dari *residence time* partikel batubara, juga merupakan salah satu faktor yg menentukan karakteristik temperatur pembakaran pada BFBC.

Proses pembakaran *char* dan zat volatil di bagian atas dan permukaan *bed* menghasilkan sebagian besar kalor yang selanjutnya kalor ini diserap oleh *bed material*. Secara umum, proses ini menyebabkan temperatur pada posisi termokopel 1 (di dalam *bed*) memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan termokopel lainnya. Intensitas pembakaran *char* dan zat volatil yang berkurang seiring dengan bertambahnya jarak aksial dari *bed* menyebabkan temperatur semakin ke atas (menjauh dari *bed*) semakin turun. Hal ini juga dapat disebabkan kalor yg dihasilkan keluar dari dinding *combustor*. Fenomena ini dapat dilihat dari temperatur pada termokopel 2 memiliki temperatur yang lebih rendah dari termokopel 1, dan selanjutnya temperatur pada posisi termokopel 3 dan 4 semakin rendah lagi

Dari Gambar 3(EA=29,6 %), pada posisi termokopel 1 dapat dilihat penurunan temperatur saat tinggi *bed* dinaikkan. Hal ini disebabkan laju penyebaran kalor ke *bed* lebih besar seiring

dengan kenaikan tinggi *bed*, sedangkan laju kalor dari pembakaran batubara adalah sama. Hal inilah yang membuat material *bed* yang memiliki ketinggian yang lebih tinggi akan memiliki temperatur yang lebih rendah ketika udara lebih dinaikkan.

Pada posisi termokopel 2 persoalan bagaimana tinggi *bed* mempengaruhi temperatur ditentukan oleh kondisi di sekitar termokopel. Temperatur pada tinggi *bed* 31 cm lebih rendah dibandingkan dengan temperatur pada tinggi *bed* 25 cm dan 28 cm. Hal ini diperkirakan karena daerah pembakaran partikel batubarapada permukaan material *bed* bergeser ke atas termokopel 2. Pergeseran ini menyebabkan posisi termokopel 2 lebih rendah dari permukaan *bed* pada tinggi *bed* 31 cm, sedangkan pada kasus tinggi *bed* 25 cm dan 28 cm berlaku sebaliknya.

Pada posisi termokopel 3, temperatur terlihat menurun seiring dengan kenaikan ketinggian material *bed*. Penurunan temperatur pada termokopel 3 pada semua ketinggian material *bed* dikarenakan banyak kalor hasil pembakaran yang terbuang melalui dinding – dinding *combustor*. Adapun pada posisi termokopel 4, temperatur pada tinggi *bed* 28 cm paling rendah dibandingkan dengan temperatur pada ketinggian material *bed* 25 cm dan 31 cm. Hal ini diperkirakan karenareaksi pembakaran *unburnt gas* sangat sedikit.

Dari sudut pandang lain, karakteristik temperatur pembakaran yang terjadi juga dapat dipengaruhi oleh pola distribusi gelembung dan kecepatan udara setelah melewati *bed*.

Kecepatan udara yang melewati *bed* akan mengalami penurunan. Besarnya penurunan kecepatan setelah melewati *bed* (U_b) tergantung dari nilai kecepatan minimum fluidisasi (U_{mf}), ketinggian material *bed* (Z) dan juga luasan saluran masuk udara *superficial* (A_o). Nilai kecepatan setelah melewati material *bed* (U_b) pada variasi nilai ketinggian material *bed* dapat dicari dengan menggunakan persamaan seperti di bawah (Basu, 2006).

$$U_b = U - U_{mf} + U_{bs} \quad (1)$$

dengan U_{bs} adalah kecepatan *bubble* dalam *bed* dan dapat dihitung sebagai berikut.

$$U_{bs} = 0.711 \sqrt{g d_b} \quad (2)$$

Nilai dari U_b pada setiap ketinggian material *bed* dapat dilihat pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4 .Kecepatan Udara Setelah Melewati*Bed* (EA=29, 6 %)

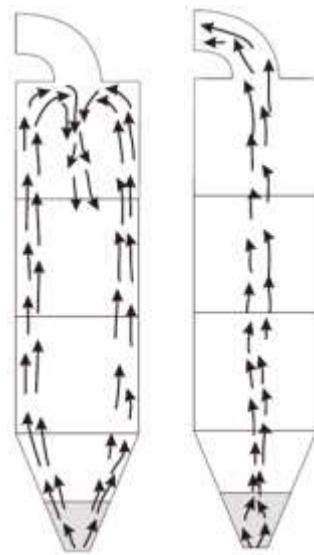
Z (m)	U (m/s)	U_{mf} (m/s)	A_o (m²)	U_b (m/s)
0,25	6,5	1,6	0,001718	6,16
0,28	6,5	2,0	0,001718	5,77
0,31	6,5	2,5	0,001718	5,28

Kecepatan udara setelah melewati material *bed* U_b ini sangat berpengaruh terhadap waktu tinggal dari partikel. Semakin lama waktu tinggal dari partikel, akan menyebabkan temperatur pembakaran semakin tinggi.

Pada tinggi *bed* 31 cm, U_b paling rendah dibanding pada kasus tinggi *bed* yang lain. Hal ini menyebabkan partikel batubara yang telah mengalami proses fragmentasi dan atrisi masih mempunyai waktu tinggal yang lebih lama dibandingkan dengan ketinggian material *bed* yang lain. Hal ini yang menyebabkan temperatur pada ketinggian material *bed* 31 cm lebih tinggi dibandingkan ketinggian material *bed* 28 cm.

Walaupun pada ketinggian material *bed* 25 cm memiliki kecepatan U_b paling tinggi, tetapi temperatur yang ditunjukkan pada Gambar 4 untuk semua termokopel jauh lebih tinggi dibandingkan temperatur pada ketinggian material *bed* 28 cm. Hal ini dipengaruhi oleh distribusi partikel yang terjadi terhadap ketinggian kritisnya. Ketinggian kritis yang dimiliki pada penelitian ini adalah sekitar 26,5 cm. Menurut Croxford dan Gilberton (2007), distribusi gelembung yang terjadi pada ketinggian material *bed* dibawah ketinggian kritis terjadi hampir merata pada permukaan material *bed*. Hanya saja distribusi gelembung ini cenderung lebih banyak pada bagian tepi material *bed*. Hal ini berarti distribusi gelembung pada ketinggian material *bed* 25 cm lebih cenderung pada bagian tepi. Berbeda halnya pada ketinggian *bed* 28 cm dan 31 cm yang berada di atas ketinggian kritisnya. Distribusi gelembung yang terjadi lebih cenderung pada bagian tengah dari material *bed* apabila dilihat secara radial.

Distribusi gelembung yang terjadi pada ketinggian material *bed* 25 cm akan menyebabkan partikel batubara yang telah mengalami fragmentasi dan atrisi terbawa ke atas. Partikel ini mengalami resirkulasi pada bagian atas ruang bakar. Partikel ini akan membentur bagian atas dari ruang bakar dan jatuh kembali ke *bed*. Fenomena inilah yang akan meningkatkan waktu tinggal dari partikel batubara pada ketinggian material *bed* 25 cm. Fenomena ini secara sederhana dapat digambarkan pada Gambar 5 (a).



(a) $h_b < h_{b,c}$ (b) $h_b < h_{b,c}$
Gambar 5

Berbeda halnya dengan distribusi gelembung pada ketinggian material *bed* 28 cm yang lebih cenderung terjadi pada bagian tengah. Partikel batubara yang mengalami atrisi diperkirakan lebih banyak terbawa keluar dari ruang bakar. Hal inilah yang menyebabkan waktu tinggal partikel batubara pada ketinggian material *bed* 28 cm lebih singkat. Secara sederhana, fenomena yang terjadi ini digambarkan pada Gambar 5(b).

Adapun pengaruh udara lebih dapat digambarkan sebagai berikut. Karakteristik temperatur pada keempat termokopel menunjukkan nilai tertinggi ketika udara lebih yang digunakan sebesar 29,6 %. Hal ini menandakan jumlah udara yang dialirkan terdistribusi lebih merata dibandingkan pada persentase udara lebih 9,1 %. Distribusi udara yang lebih merata pada ruang bakar ini akan meningkatkan proses pembakaran batubara. Hasil ini juga diamati oleh Basu (2006) yang mendapatkan temperatur optimum dari pembakaran batubara pada BFBC terjadi pada persentase udara lebih sebesar 30~40%.

Proses pembakaran dengan persentase udara lebih sebesar 58,5 % menurunkan temperatur dibandingkan dengan temperatur pada persentase udara lebih 29,6 %. Hal ini disebabkan oleh efek pendinginan yang dilakukan oleh udara. Aliran udara yang masuk ke dalam ruang bakar BFBC memiliki temperatur yang jauh lebih rendah dibandingkan temperatur pembakaran batubara. Kalor yang terbentuk dari pembakaran tidak hanya terserap oleh dinding ruang bakar, tetapi juga diserap oleh udara. Penambahan jumlah udara melewati kondisi optimum pembakaran tidak akan membantu proses pembakaran tetapi akan menurunkan temperatur dari pembakaran.

Penurunan temperatur ini juga mungkin dipicu oleh reaksi air – gas dan reaksi air – gas shift (Basu, 2006). Semakin banyaknya kandungan uap air di dalam

ruang bakar BFBC akan menyebabkan reaksi air – gas dan reaksi air – gas *shift* semakin banyak terjadi. Kandungan uap air ini berasal dari aliran udara masuk ke dalam BFBC. Kedua reaksi ini merupakan reaksi endotermis dimana membutuhkan kalor untuk proses reaksi. Akibatnya, temperatur di dalam ruang bakar BFBC akan semakin turun.

Kesimpulan

Dari hasil yang telah didapatkan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut,

1. Nilai kecepatan minimum fluidisasi U_{mf} akan meningkat apabila ketinggian material *bed* ditinggikan, di mana untuk tinggi *bed* 25~35 cm berkisar 1,6~2,5 m/s.
2. Penggunaan *bed* dengan tinggi yang semakin besar menurunkan temperatur, di mana untuk tinggi *bed* 25~35 cm temperatur maksimum berkisar 820~780 °C
3. Pengaruh variasi udara lebih terhadap temperatur pada berbagai tinggi *bed* menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu temperatur maksimal terjadi pada udara lebih sekitar 30 %.

Ucapan Terima kasih

Penelitian ini dapat dilaksanakan atas dukungan dana Hibah Penelitian Strategi Nasional 2012. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Fransisko Pandiangan dan Ian Kevin atas bantuan mereka dalam pengambilan data.

Nomenklatur

FBC	<i>Fluidized Bed Combustor</i>
BFBC	<i>Bubbling Fluidized Bed Combustor</i>
H	Tinggi
EA	udara lebih
U	kecepatan

Subscripts

b	<i>Bed</i>
c	Kritis
mf	minimum fluidisasi
tc	Termokopel

Referensi

Atimtay, A.T. dan Kaynak, B., Co-combustion of Peach and Apricot Stone with Coal in a Bubbling Fluidized Bed. *Fuel Processing Technology*, pp.183-97, 2008.

Basu, P., *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. Halifax: Taylor & Francis Group, LLC, 2006.

Croxford, A. dan Gilbertson, M.A., Bubble Distribution in Cylindrical Fluidized : The Effects of Bed Depth and Gas Speed. *2007 ECI Conference on The 12th International Conference on Fluidization - New Horizons in Fluidization Engineering*, pp.215-24, 2007.

Munir, S., Nimmo, W., and Gibbs, B.M., Co-combustion of Agricultural Residues with Coal: Turning Waste into Energy, *Energy Fuels*, 24 (3), pp 2146–2153, 2010

Pedersen, L.S., Nielsen, H. P., Kill, S., Hansen, L. A., Dam-Johansen, K., Kildsig,F., Christensen, J., and Jespersen, P., Full-scale co-firing of straw and coal, *Fuel*, vol 75, pp.1584–1590, 1996

Sánchez-Delgado, S., Jiméndez-Ibáñez, J.A., Soria-Verdugo, A., Santana, D., and Ruiz-Rivas, U., Coherent Structures and Bubble-Particle Velocity in 2-D Fluidized Beds, *9th International Conference on Circulating Fluidized Beds (CFB9)*, Germany, 2008.