

KARAKTERISTIK PEMBAKARAN BATUBARA PERINGKAT RENDAH, CANGKANG SAWIT DAN CAMPURANNYA DALAM FLUIDIZED BED BOILER

Mahidin^{1*)}, Khairil²⁾, Adisalamun¹⁾ dan Asri Gani¹⁾

¹⁾Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syech Abdurrauf 7 Darussalam Banda Aceh 23111

²⁾Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syech Abdurrauf 7 Darussalam Banda Aceh 23111

^{*)}Penulis korespondensi: mahidin@unsyiah.ac.id

Abstrak

Penggunaan biomassa di unit pembangkit tenaga listrik sudah banyak dilaporkan oleh banyak peneliti dan praktisi. Tetapi, data untuk pembakaran cangkang sawit baik sebagai bahan bakar utama maupun pendamping sangat terbatas. Dalam studi ini, karakteristik pembakaran batubara peringkat rendah, cangkang sawit dan campurannya dalam fluidized bed boiler sudah dipelajari. Pada pembakaran batubara/cangkang sawit parameter pembakaran seperti konsentrasi gas, temperatur unggun dan efisiensi pembakaran dikaji terhadap efek udara berlebih (rasio udara/bahan bakar) dan ukuran partikel. Dalam pembakaran campuran, parameter-parameter tersebut dikaji terhadap pengaruh udara berlebih dan komposisi bahan bakar. Hasil percobaan menunjukkan bahwa efisiensi pembakaran maksimum untuk pembakaran batubara didapatkan pada udara berlebih tinggi (50%) dan ukuran partikel kecil (60+ mesh). Sedikit perbedaan teramati pada temperatur unggun dimana nilai maksimum muncul pada udara berlebih rendah (30%) tetapi ukuran partikel sama. Seperti yang diharapkan, fenomena yang sama juga terjadi untuk pembakaran cangkang sawit. Lebih lanjut, pada pembakaran campuran efisiensi pembakaran maksimum juga terjadi pada udara berlebih tinggi (50%) dan rasio bahan bakar (% berat) 50:50 untuk ukuran partikel 60+ mesh. Sama halnya dengan pembakaran batubara, temperatur unggun maksimum juga terlihat pada udara berlebih 30% dan rasio cangkang/batubara 20:80.

Kata kunci: batubara peringkat rendah, cangkang sawit, fluidized bed boiler, karakteristik pembakaran

Abstract

The use of biomass in heat engine or power plant has been reported by many researchers and users. However, only a few data are available for palm shell combustion either as a primary fuel or co-fuel. In this study, the combustion characteristics of low-rank coal, palm shell and their mixture (co-combustion) in fluidized bed boiler were investigated. Combustion parameters such as gas concentrations, bed temperature and combustion efficiency were observed as a function of excess air (air to fuel ratio) and particle size, in case of combustion of coal or palm shell. Meanwhile, in case of co-combustion these parameters were observed as a function of excess air and fuel composition. The results show that the maximum combustion efficiency in the combustion of coal was found at higher excess air of 50% and smaller particle size of 60+ mesh. A small disagreement is exhibited by the maximum bed temperature that appeared at lower excess air of 30% but the same particle size. As expected, in the combustion of palm shell the same phenomena were also reflected. Further, in case of co-combustion the maximum combustion efficiency was also found at higher excess air of 50% and fuel ratio (wt %) of 50:50 for particle size of 60+ mesh. Similar to the combustion of coal or palm shell, the maximum bed temperature also revealed at lower excess air of 30% and fuel ratio (palm shell to coal) of 20:80.

Keywords: Combustion characteristics; fluidized bed boiler; Low-rank coal; palm shell.

PENDAHULUAN

Pembakaran batubara peringkat rendah, biomassa dan campuran keduanya telah banyak dilakukan di seluruh dunia. Biomassa yang digunakan pun sangat beragam mulai dari limbah kayu, jerami, sekam padi, ampas tebu, lumpur kering, limbah padat kota, limbah industri minuman/makanan, dan lain-lain sebagaimana dilaporkan Hughes dan Tillman (1998). Penelitian laboratorium pembakaran campuran batubara peringkat rendah dan biomassa antara lain dapat dilihat dalam Skodras dkk. (2001) dan Martin dkk. (2003). Martin dkk. (2003) melakukan kajian terhadap campuran lignit dan *chip* pinus. Temperatur unggun tertinggi yang dicapai adalah 850°C, pada keadaan campuran umpun mengandung 28% *chip* pinus. Percobaan yang sama juga dilakukan oleh Skodras dkk. (2001) yang mencampur lignit dengan limbah kayu. Mereka mendapatkan bahwa konsentrasi CO dalam gas hasil pembakaran cenderung menurun seiring bertambahnya persentase biomassa dalam bahan bakar.

Dari sekian banyak jenis biomassa yang sudah dimanfaatkan/dikaji, terlihat bahwa pembakaran cangkang sawit baik sebagai *primary fuel* maupun *co-fuel* dalam pembakaran batubara belum banyak dilaporkan disatu sisi. Sementara di sisi lain pemanfaatan cangkang sawit sebagai bahan bakar *boiler* sudah banyak dilakukan di pabrik-pabrik pengolahan kelapa sawit. Yang sangat disayangkan, sampai saat ini hanya sedikit sekali data ilmiah karakteristik pembakaran cangkang sawit yang terpublikasi terutama di Indonesia karena para praktisi di pabrik sawit tidak pernah berpikir untuk mempublikasi pengalaman lapangan mereka. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan informasi yang bermanfaat untuk pengembangan teknologi pembakaran cangkang sawit

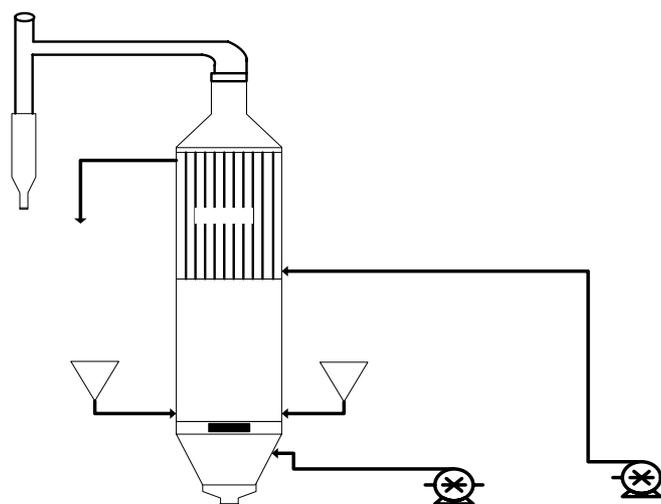
baik sebagai *primary fuel* maupun sebagai *co-fuel* dalam skala komersial.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menginvestigasi karakteristik pembakaran batubara peringkat rendah, cangkang sawit dan campuran keduanya dalam *fluidized bed boiler (FBB)*. Parameter yang dikaji antara lain konsentrasi CO₂ dan CO, efisiensi pembakaran dan temperatur unggun. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi pembuka jalan penelitian selanjutnya dalam pemanfaatan batubara peringkat rendah dan cangkang sawit sebagai sumber energi alternatif.

METODOLOGI

Batubara yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari Aceh Barat, yang berlokasi di Kaway XVI, sedangkan cangkang sawit diambil dari pabrik pengolahan kelapa sawit PTPN I Aceh Timur. Analisa proksimasi, ultimasi dan kalor batubara dan cangkang sawit dilakukan di tekMIRA Bandung. Unit *FBB* yang digunakan dalam studi ini terdiri dari ruang pembakaran dan *boiler*; yang dilengkapi dengan *screw feeder*, *cyclone* dan *blower* udara. *FBB* juga dilengkapi dengan instrumentasi pengukur temperatur unggun dan gas, serta *manometer* pipa U untuk pengukur laju alir udara (Gambar 1).

Variabel dalam proses pembakaran ini terdiri dari persen udara berlebih, ukuran partikel bahan bakar, dan komposisi campuran batubara-cangkang sawit. Variabel udara berlebih bervariasi antara 10 s/d 50%, yang didasarkan atas perhitungan kebutuhan oksigen teoritis terhadap bahan bakar. Sementara pada pembakaran campuran, rasio cangkang terhadap batubara (% berat) adalah 10:90, 20:80, 30:70, 40:60 dan 50:50. Pada pembakaran campuran, ukuran partikel bahan bakar ditetapkan 60+ mesh.



Gambar 1. Skema unit *Fluidized Bed Boiler (FBB)*

Pada tahap awal percobaan, dapur/ruang bakar terlebih dahulu dipanaskan agar temperatur ruang bakar tersebut mencapai kondisi temperatur pembakaran. Setelah suhu unggun mencapai 450°C maka sampel dialirkan dengan laju alir 3 kg/jam. Udara disuplai sesuai kebutuhan. Pengambilan data dilakukan pada saat kondisi pembakaran sudah mencapai keadaan tunak, setelah ±10 menit pembakaran berlangsung.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil analisa proksimasi, ultimasi dan kalor diketahui bahwa sampel batubara yang digunakan dalam penelitian ini tergolong dalam jenis batubara peringkat rendah (subbituminus) dengan kandungan karbon 60,65% dan nilai kalor 24.702 kJ/kg. Sedangkan data cangkang sawit menggambarkan bahwa biomassa tersebut sangat cocok digunakan sebagai bahan bakar pendamping (*co-fuel*) karena mudah terbakar, ini disebabkan oleh tingginya kandungan *volatile metter* (mencapai 73,65%), dan mempunyai nilai kalor tinggi (mencapai 20.355 kJ/kg). Data hasil analisa beberapa jenis batubara dan biomassa ditampilkan pada Tabel 1 dan 2.

Dari hasil analisa berbagai jenis batubara pada Tabel 1 dan 2 terlihat bahwa kandungan kalor dan karbon batubara Aceh lebih rendah dari batubara yang digunakan oleh Gani dkk. (2005), tetapi lebih tinggi bila dibandingkan dengan yang digunakan oleh Martin

dkk. (2003). Sementara untuk biomassa, nilai kalor cangkang sawit lebih tinggi dari *sawdust* yang digunakan oleh Gani dkk. (2005). Selanjutnya, nilai kalor *pine chips* yang digunakan Martin dkk. (2003) sedikit lebih tinggi dari cangkang sawit yang digunakan dalam studi ini. Dengan mengacu pada data analisa ultimasi, kebutuhan oksigen dalam proses pembakaran dapat ditentukan dengan asumsi konversi reaksi pembakaran adalah 100%.

Konsentrasi CO₂ dan CO

Banyak besaran yang digunakan sebagai parameter untuk menentukan efisiensi pembakaran, diantaranya jumlah panas yang dihasilkan, jumlah karbon yang terbakar atau jumlah hidrogen yang terkonversi. Dalam penelitian ini, parameter yang digunakan untuk melihat efisiensi pembakaran didasarkan pada efisiensi termal (panas), yang didapat dengan mengukur nilai kalor abu sisa pembakaran, kemudian dibandingkan dengan nilai kalor awal sampel. Sedangkan jumlah karbon yang terbakar diwakili oleh CO dan CO₂ dalam gas hasil pembakaran, dianalisa dengan menggunakan GC-8A Shimadzu. Sayangnya, jumlah hidrogen yang terkonversi tidak dapat diukur pada penelitian ini dikarenakan *carrier gas* N₂ yang digunakan tidak dapat mendeteksi gas H₂ atau H₂O.

Tabel 1. Data analisa proksimasi dan nilai kalor beberapa jenis batubara dan biomassa (basis kering)

Parameter	Batubara			Biomassa		
	Spain*	Japan**	Aceh	<i>Pine chips</i> *	<i>Sawdust</i> **	Cangkang sawit
<i>Moisture</i>	8,27	1,7	5,83	12,75	11	4,30
<i>Ash</i>	28,84	14	5,40	3,03	1,2	2,63
<i>Volatile matter</i>	41,29	11,4	46,00	75,56	86,6	73,65
<i>Fixed carbon</i>	30,5	74,6	42,77	21,41	1,2	19,42
<i>Calorific value</i> (kJ/kg)	20.421	29.160	24.702	20.630	18.020	20.355

Sumber: *Martin dkk. (2003), **Gani dkk. (2005)

Tabel 2. Data analisa ultimasi beberapa jenis batubara dan biomassa (basis kering)

Parameter	Batubara			Biomassa		
	Spain*	Japan**	Aceh	<i>Pine chips</i> *	<i>Sawdust</i> **	Cangkang sawit
Karbon	48,76	90,12	60,65	52,03	55,87	29,32
Hidrogen	2,2	3,95	5,75	5,97	7,06	5,88
Nitrogen	0,9	1,16	0,48	0,41	0,24	0,30
Total Sulfur	9,86	0,47	0,38	0,07	0	0,13
Oxigen	9,44	4,3	27,34	40,08	36,83	61,74

Sumber: *Martin dkk. (2003), **Gani dkk. (2005)

Salah satu indikasi bahwa pembakaran dikatakan sempurna adalah apabila dalam reaksi pembakaran tersebut tidak terbentuk gas karbon monoksida (CO). Pada pembakaran sempurna seluruh karbon terbakar habis membentuk gas CO₂ dan seluruh hidrogen terkonversi menjadi uap air (H₂O). Variabel-variabel yang memegang peranan sangat signifikan dalam proses pembakaran antara lain adalah udara berlebih, ukuran partikel dan karakteristik bahan bakar. Udara berlebih akan menentukan sempurna atau tidaknya proses pembakaran. Sementara, ukuran partikel berbanding lurus dengan luas permukaan tempat berlangsungnya kontak antara oksigen dan bahan bakar. Pengaruh persentase udara berlebih dan ukuran partikel terhadap konsentrasi CO₂ dan CO pada pembakaran batubara dan cangkang sawit dapat dilihat pada Gambar 2(a) dan (b).

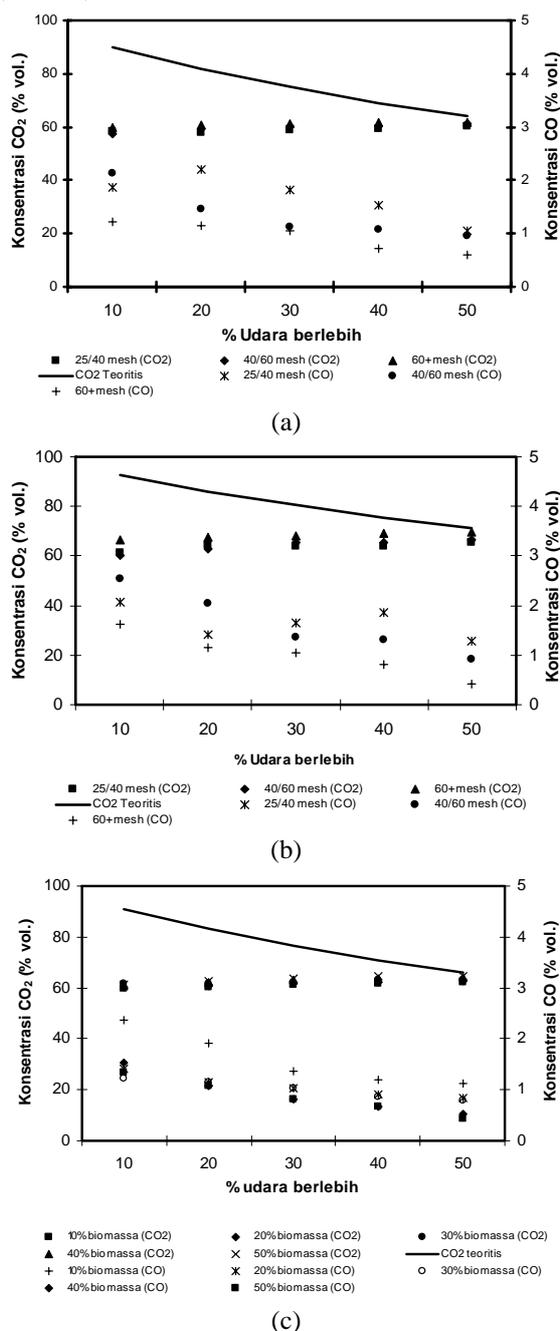
Berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa pembentukan CO₂ mengalami kenaikan dengan bertambahnya jumlah udara yang disuplai. Secara aktual pembentukan CO₂ berbanding terbalik dengan pembentukan CO. Apabila dibandingkan dengan kondisi teoritis (dievaluasi dengan metode Hanby, 1994), maka konversi karbon secara aktual yang mendekati kondisi teoritis didapat pada penambahan 50% udara berlebih.

Akan halnya efek ukuran partikel, secara umum terlihat bahwa semakin kecil ukuran partikel maka pembakaran semakin sempurna. Fakta ini tentu saja dapat diterima karena sejalan dengan hukum *Arrhenius*. Partikel yang halus akan mempunyai luas permukaan yang besar sehingga frekuensi tumbukan antara padatan dan oksigen akan besar. Besarnya frekuensi tumbukan akan mempercepat laju reaksi pembakaran. Dengan kata lain, luas permukaan partikel berbanding lurus dengan laju oksidasi bahan bakar (Krishnaswamy dkk., 1996; Wang dkk., 2002).

Selanjutnya, Gambar 2(c) memperlihatkan efek komposisi bahan bakar dan udara berlebih terhadap konsentrasi CO₂ dan CO pada pembakaran campuran batubara-cangkang sawit. Pada gambar tersebut juga terlihat perbandingan CO₂ hasil percobaan dengan CO₂ teoritis. Kondisi pembakaran yang paling baik juga diperoleh pada eksekusi udara 50%, dimana secara teoritis konsentrasi CO₂ yang diperoleh adalah 66,26% (volume). Secara aktual, titik maksimum pembakaran campuran berada pada 50% udara berlebih dengan 50% kandungan biomassa, konversi karbon pada keadaan ini secara aktual adalah 65,96%. Ukuran partikel pada pembakaran campuran batubara-cangkang adalah 60+ mesh, karena pada pembakaran batubara atau cangkang sawit ukuran partikel tersebut menghasilkan efisiensi pembakaran maksimum (lihat Gambar 3(a) dan (b)).

Dari Gambar 2(c) juga terlihat persentase CO₂ cenderung naik seiring bertambahnya udara yang disuplai dan bertambahnya persentase biomassa dalam bahan bakar, sebaliknya seperti yang diharapkan CO cenderung menurun. Peningkatan suplai udara (oksigen) akan menggeser reaksi ke arah pembakaran sempurna yang berkonsekuensi pada peningkatan CO₂

dan penurunan CO. Demikian juga halnya dengan peningkatan persentase biomassa karena biomassa memiliki kandungan *volatile matter* yang tinggi (Tabel 1). Tingginya kandungan *volatile* akan mempermudah proses pembakaran sehingga reaksi juga mengarah ke pembakaran sempurna, karena *volatile* lebih mudah terbakar dibandingkan *fixed carbon*. Pada persentase campuran biomassa 50, 40, 30, 20 dan 10% konversi karbon secara berturut-turut adalah sebesar 65,96; 65,67; 64,79; 64,52 dan 63,37% (volume).



Gambar 2. Profil konsentrasi CO₂ dan CO pada pembakaran batubara (a), cangkang sawit (b) dan campuran batubara-cangkang sawit (c) skala 3 kg/jam

Peristiwa ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Martin dkk (2003) pada

pembakaran campuran batubara lignit dan *pine chips* dimana peningkatan persentase *pine chips* dari 28 ke 47% berat mengakibatkan peningkatan persentase CO₂ dari 16,8 menjadi 17,9% (volume), sedangkan CO menurun dari 406 menjadi 325 (mg/Nm³). Kondisi yang sama juga digambarkan oleh Skodras dkk. (2001) dengan bahan bakar campuran lignit dan limbah kayu.

Efisiensi pembakaran

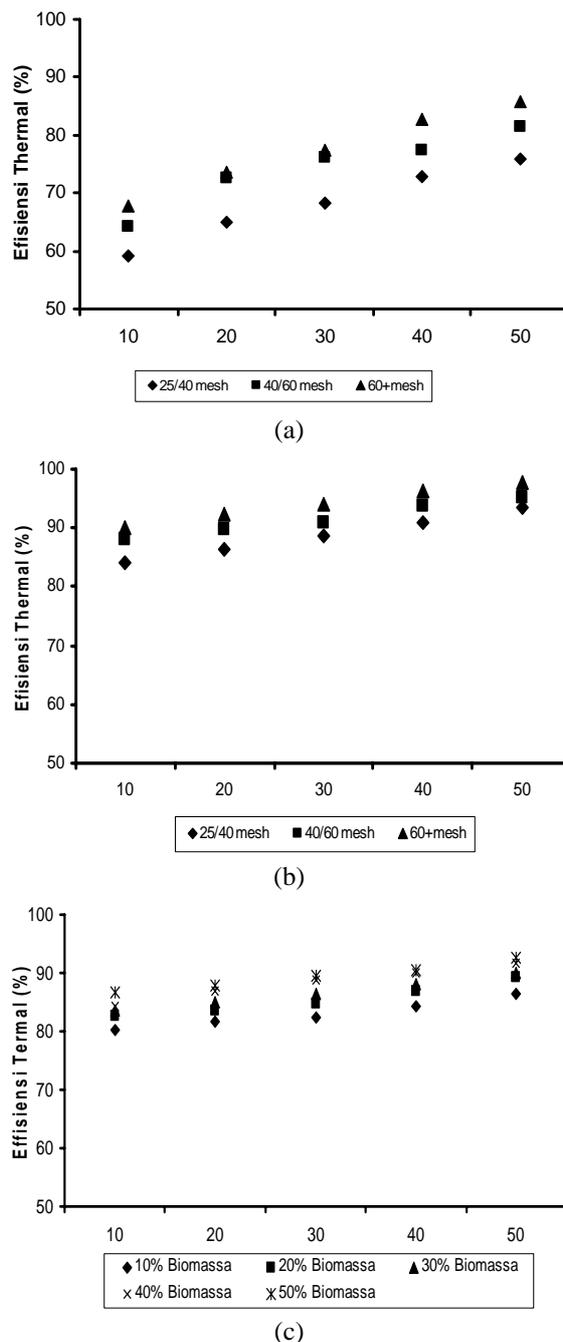
Salah satu indikasi yang dipakai untuk menentukan apakah pembakaran berlangsung baik atau tidak adalah dengan mengevaluasi efisiensi pembakaran. Efisiensi pembakaran dapat dinyatakan dengan efisiensi termal, efisiensi karbon atau efisiensi hidrogen terkonversi. Dalam kajian ini, efisiensi pembakaran yang dievaluasi hanyalah efisiensi termal saja dan dianggap cukup mewakili unjuk kerja dari *FBB*. Efisiensi termal adalah perbandingan antara jumlah panas dalam gas hasil pembakaran terhadap jumlah kalor bahan bakar.

Dalam pembakaran sistem kombinasi *FBB* yang dilakukan pada studi ini, ada beberapa faktor yang harus diperhatikan untuk menghasilkan efisiensi pembakaran yang maksimum yaitu temperatur unggun, udara berlebih, kondisi fluidisasi dan ukuran partikel. Efek laju fluidisasi terhadap efisiensi pembakaran tidak dikaji secara mendalam dalam studi ini. Tetapi secara umum, fluidisasi yang sempurna (ideal) dimana tidak adanya *interlock*, *chanelling* dan *slugging* akan memberikan efisiensi pembakaran yang maksimum. Laju udara yang diberikan pada percobaan ini semuanya berada di atas U_{mf} (laju superfisial udara minimum) sehingga semua kondisi unggun dalam keadaan terfluidisasi.

Data pada Gambar 3 secara keseluruhannya menunjukkan efek udara berlebih terhadap efisiensi termal dimana efisiensi meningkat dengan meningkatnya persentase udara berlebih. Disamping pengaruh udara berlebih, Gambar 3(a) dan (b) juga menggambarkan efek ukuran partikel terhadap efisiensi pembakaran, sementara Gambar 3(c) mengekspresikan efek rasio bahan bakar terhadap parameter yang sama. Pada pembakaran batubara dan cangkang sawit dengan udara berlebih 50%, efisiensi termal tertinggi diperoleh pada ukuran partikel paling kecil (60+ mesh) masing-masing sebesar 85,8 dan 97,6%. Gambar 3(a) dan (b) juga menunjukkan bahwa pada kondisi yang sama, efisiensi pembakaran cangkang sawit jauh lebih tinggi jika dibandingkan batubara. Fenomena ini salah satunya diperkirakan karena perbedaan kandungan *volatile matter* yang sangat signifikan.

Untuk pembakaran campuran, pada Gambar 3(c) terlihat bahwa selain udara berlebih, kandungan biomassa dalam bahan bakar juga berpengaruh terhadap efisiensi termal pembakaran, dimana semakin besar persentase biomassa dalam bahan bakar dan semakin tinggi udara berlebih yang diberikan maka efisiensi termalnya semakin meningkat. Sebagaimana sudah dijelaskan di atas untuk Gambar 2(c), bahwa peningkatan suplai udara dan persentase biomassa

menggeser reaksi kearah pembakaran sempurna yang berimplikasi pada peningkatan efisiensi termal pembakaran. Efisiensi termal merupakan perbandingan kalor gas hasil pembakaran terhadap kalor bahan bakar. Karena reaksi bergeser ke arah sempurna maka produk reaksi bergeser ke arah pembentukan CO₂ dan secara teoritik, entalpi CO₂ lebih tinggi dari CO (lebih dari tiga kali lipat). Efisiensi termal maksimum yang dihasilkan pada penelitian ini adalah 92,7% yang tercatat pada kondisi pembakaran dengan udara berlebih 50% dan persentase cangkang sawit 50% (berat).

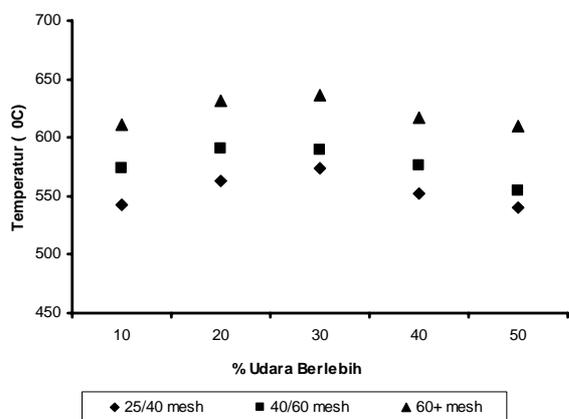


Gambar 3. Efisiensi termal pada pembakaran batubara (a), cangkang sawit (b) dan campuran batubara-cangkang sawit (c) skala 3 kg/jam

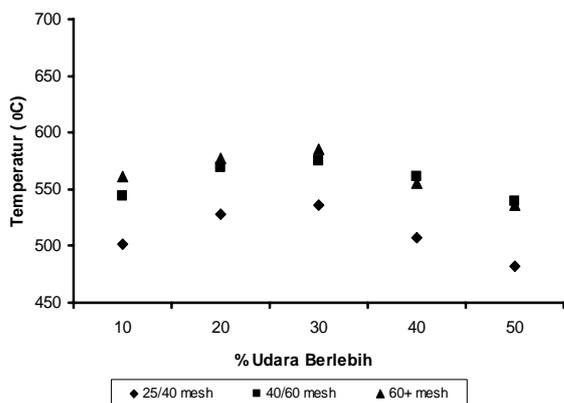
Temperatur unggun

Pada pembahasan di atas terlihat bahwa dengan semakin besar konversi karbon yang diwakili dengan konsentrasi CO₂ yang dihasilkan pada masing-masing laju alir udara dan ukuran partikel, maka akan memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap temperatur unggun. Gambar 4(a) dan (b) di bawah ini menjelaskan bahwa peningkatan udara berlebih dan ukuran partikel akan memberikan dampak terhadap temperatur unggun. Interval udara berlebih yang bagus berada pada 20-30%, kondisi temperatur maksimum didapat pada 30% udara berlebih dengan ukuran partikel 60+ mesh.

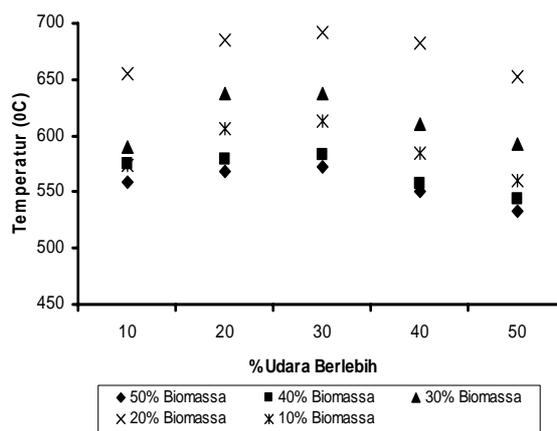
Bila Gambar 4 dihubungkan dengan Gambar 2 dapat terlihat bahwa pola temperatur unggun ini lebih dekat pada konsentrasi CO yang cenderung tidak berdekatan satu sama lain bila dibandingkan dengan pola CO₂ yang cenderung selalu berhimpitan. Selanjutnya, dari Gambar 4(c) terlihat bahwa peningkatan persentase udara berlebih dan persentase biomassa dalam bahan bakar juga memberikan pengaruh terhadap temperatur unggun. Interval laju udara berlebih yang baik juga sama yaitu 20-30%. Untuk udara berlebih 40 dan 50% temperatur unggun cenderung menurun meskipun kondisi pembakaran semakin baik (lihat Gambar 2). Fenomena ini dapat terjadi karena panas yang dihasilkan dari reaksi eksotermis pembakaran terserap oleh nitrogen yang terdapat dalam udara sehingga panas tersebut ikut terbawa bersama gas buang.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. Profil temperatur unggun pada pembakaran batubara (a), cangkang sawit (b) dan campuran batubara-cangkang sawit (c) skala 3 kg/jam

Perubahan temperatur unggun juga dapat dipengaruhi oleh persentase campuran bahan bakar dimana temperatur unggun maksimal terdapat pada campuran 20% (berat) cangkang dan udara berlebih 30% dengan temperatur maksimum yang dihasilkan 692°C. Peristiwa yang sama juga terefleksi dalam studi yang dilakukan Martin dkk (2003) dimana temperatur unggun cenderung menurun seiring bertambahnya persentase biomassa dalam bahan bakar. Martin dkk (2003) mendapatkan bahwa pada kandungan biomassa 47% (berat) temperatur unggunnya 840°C dan pada kandungan biomassa 28% (berat) temperatur unggun naik menjadi 850°C. Hal ini diperkirakan disebabkan oleh perbedaan nilai kalor batubara dan cangkang sawit.

Jika hasil ini dibandingkan dengan efisiensi pembakaran, maka didapat perbedaan yang signifikan antara keduanya. Temperatur unggun maksimum tidak terjadi pada kondisi campuran 50% (berat) cangkang dan udara berlebih 50%. Sudah dipahami dengan baik bahwa dalam proses pembakaran yang melibatkan udara ambien temperatur unggun sangat dipengaruhi oleh nitrogen yang ikut dalam udara. Pada kondisi udara berlebih 50% jumlah nitrogen yang ikut jauh lebih besar dibandingkan kondisi 30% sehingga jumlah panas yang diserap nitrogen juga lebih besar. Fenomena ini akan berakibat terhadap temperatur unggun menjadi rendah. Akan halnya pengaruh kandungan biomassa terhadap temperatur unggun lebih disebabkan oleh perbedaan nilai kalor antara batubara dan cangkang sawit (Tabel 1) sebagaimana disebutkan di atas. Karena rendahnya nilai kalor cangkang sawit, maka peningkatan persentase biomassa ini dalam campuran bahan bakar mengakibatkan penurunan temperatur unggun.

KESIMPULAN

Semakin besar eksep udara yang diberikan maka konsentrasi CO₂ semakin meningkat, sedangkan sebaliknya konsentrasi CO cenderung

menurun. Kondisi temperatur unggun yang dihasilkan sangat bervariasi dimana pada kondisi udara berlebih 10-30% temperatur unggun meningkat sebaliknya untuk udara berlebih 40-50% temperatur unggun cenderung menurun. Semakin tinggi kandungan biomassa dalam campuran bahan bakar maka efisiensi pembakaran semakin tinggi. Efisiensi pembakaran maksimum untuk campuran didapat pada kondisi 50% udara berlebih dengan rasio biomassa/batubara (% berat) 50:50.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kementerian Riset dan Teknologi untuk dukungan pendanaan penelitian ini melalui Proyek Peningkatan Riset Unggulan Terpadu (RUT) XII tahun 2005-2006. Ucapan terimakasih juga kepada mahasiswa (Kasturi, Muhajirin Muttaqin, Muhibbuddin, Fakhrol Andika, Syafrizal, Ridwan Arif, Deleta Rifika dan Asmawati) yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Gani, A., Keiju, M., Kunihiro, N., and Naruse, I., (2005), Characteristics of Co-combustion of Low-Rank Coal with Biomass, *Energy & Fuels*, 19, pp. 1652-1659.

Hanby, V. I., (1994), *Combustion and Pollution Control in Heating Systems*, Springer-Verlag, London.

Hughes, E. E. and Tillman, D. A., (1998), Biomass Co-firing: Status and Prospects 1996, *Fuel Processing Technology*, 54, pp. 127-142.

Krishnaswamy, S., Gunn, R. D., and Agarwal, P. K., (1996), Low-temperature Oxidation of Coal, *Fuel*, 75, pp. 333-343.

Martin, C., Villamanan, M. A., Chamorro, C. R., Otero, J., Cabanillas, A., and Segovia, J. J., (2005), Low-grade Coal and Biomass Co-combustion on Fluidized Bed: Exergy Analysis, *Energy*, 31, pp. 330-344.

Skodras, G., Grammelis, P., Samaras, P., Vourliotis, P., Kakaras, E., and Sakellariopoulos, G.P., (2002), Emissions Monitoring during Coal-Waste Wood Co-combustion in an Industrial Steam Boiler, *Fuel*, 81, pp. 547-554.

Wang, H., Dlugogorski, B. Z., and Kennedy E. M., (2002), Kinetic Modelling of Low-temperature Oxidation of Coal, *Combustion and Flame*, 131, pp. 452-469.