



Karakteristik Pembakaran Beberapa Jenis Biomassa dalam *Fluidized Bed Boiler*

Combustion Characteristics of Several Biomasses in Fluidized Bed Boiler

Mahidin^{1*}, Hamdani², Muhtadin³, M. Faisal³, Mahyuddin³

¹ Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

² Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Darussalam, Banda Aceh, Provinsi Aceh, 23111

³ Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Abulyatama Aceh

Jl. Blangbintang Lama KM 8,3, Lampoh Keude, Aceh Besar, Provinsi Aceh, 23372

* E-mail: mahidin@unsyiah.ac.id

Abstrak

Pembakaran biomassa dalam rangka memproduksi energi termal untuk menghasilkan utilitas lain dapat dilakukan dengan mengkonversi energi tersebut ke bentuk energi lain. Boiler dengan unggun terfluidisasi dipilih sebagai teknologi konversi energi termal menjadi energi listrik, karena kukus yang diproduksi dapat digunakan untuk menggerakkan turbin yang dikopling dengan generator listrik. Unit dimana proses pembakaran berlangsung, yaitu ruang bakar dan *freeboard* dipilih sebagai target pengamatan untuk mengevaluasi kinerja boiler tersebut. Hasil pengamatan terhadap pembakaran tiga jenis biomassa, serpihan kayu ketam, kulit pinang dan ranting kayu kering, memperlihatkan bahwa masing-masing jenis biomassa memiliki karakteristik pembakaran tersendiri. Temperatur pembakaran maksimum untuk serpihan kayu ketam dan ranting kayu kering didapatkan pada waktu pembakaran 30 detik, sementara untuk kulit pinang pada 20 detik. Hasil yang sangat menarik adalah ditemukan bahwa temperatur maksimum dapat ditingkatkan dengan mengubah sistem pengumpanan bahan bakar. Sistem pengumpanan antara memberikan temperatur maksimum yang lebih tinggi dibanding dengan sistem pengumpanan biasa.

Kata kunci: boiler unggun terfluidisasi, *freeboard*, karakteristik pembakaran, ruang bakar, temperatur pembakaran maksimum

Abstract

Combustion of biomass in order to produce a thermal energy for other utility purpose can be done by converting that energy to form another type of energy. Fluidized bed boiler is chosen as conversion technology of thermal energy to electrical energy, since the produced steam can be used to drive the turbine coupled by electrical generator. The unit in which the combustion takes place i.e. combustion chamber and freeboard are addressed as an observation target for evaluating the boiler performance. The result on combustion of three types of biomass, such as saw-chip wood, areca nut fiber, and dry wood waste, shows that each type of the biomass has a specific combustion characteristic. Maximum combustion temperature for the saw-chip wood and dry wood waste is found at combustion time of 30 s, while for the areca nut fiber is at 20 s. A very interesting result is obtained that the maximum temperature can be increased by changing the fuel feeding system. The inter-feeding system provides the much higher maximum temperature rather than that without inter-feeding system.

Keywords: combustion chamber, combustion characteristic, free-board, fluidized bed boiler, maximum combustion temperature

1. Pendahuluan

Krisis energi dan pemanasan global adalah dua permasalahan yang sedang dihadapi dunia. Sumber energi fosil dunia semakin hari semakin menipis, sementara di sisi lain pemanasan global semakin hari semakin meningkat. Salah satu jalan keluar yang ditawarkan para pakar adalah pencarian dan pemanfaatan sumber energi baru dan

terbarukan (*new and renewable energy resources*) dari sumber daya alam yang tersedia. Data tahun 2004 menunjukkan bahwa kontribusi energi terbarukan dalam konsumsi energi Indonesia adalah 1,3%. Berdasarkan *Blueprint* Pengelolaan Energi Nasional yang ditetapkan pada tahun 2005, *sharing* energi terbarukan dalam energi primer ditargetkan mencapai 15% pada 2025 (DESDM, 2005; REN21, 2008).

Riset terhadap pembakaran biomass di dalam *Fluidized Bed Combustor/Boiler (FBC/FBB)* sudah sangat banyak dilakukan di seluruh dunia. Biomassa yang digunakan juga sangat beragam, seperti sekam padi, jerami padi, kulit kopi, cangkang, sabut dan batang kelapa sawit, kulit kacang, tongkol jagung, ampas tebu, sarang biji kapas, batang sorgum, bambu, kayu, serbuk gergaji, lumpur kering/basah, dan lain-lain (Aghamohammadi dkk., 2011; Bapat dkk., 1997; Bhattacharya dkk., 1984; Demirbas, 2004; Liu dkk., 1995; Muthukrishnan dkk., 1995; Natarajan, 1998; Ninduangdee dan Kuprianov, 2014; Ogada dan Werther, 1996; Rao dan Reddy, 2005; Raczeck, 1992).

Permasalahan yang dikaji juga sangat beragam, diantaranya adalah efek kandungan air dalam biomassa (kelembaban), densitas curah (*bulk density*) biomassa, kandungan abu, kandungan bahan volatil terhadap mekanisme pembakaran dan pembentukan/pelepasan emisi gas dan partikulat; fenomena aglomerasi unggun, *fouling* dan *slagging*, serta permasalahan korosi yang ditimbulkan oleh reaksi antara senyawa kimia yang terdapat dalam abu dengan material bahan konstruksi (Bapat dkk., 1997; Chen dkk., 1997; Ninduangdee dan Kuprianov, 2014; Ogada dan Werther, 1996; Raczeck, 1992; Williams dkk., 2012; Yu dkk., 2014).

Lebih lanjut, model atau posisi *feeding* juga menentukan karakteristik pembakaran, baik dalam *combustor* maupun *freeboard*. Biomassa dengan densitas curah rendah seperti serbuk gergaji, ampas tebu dan sekam padi lebih baik digunakan dalam sistem *under-bed feeding*, sebaliknya biomassa dengan densitas curah tinggi seperti serpihan kayu dan tongkol jagung dapat dipakai dalam sistem *feeding* mana saja (*under-* atau *over-bed feeding*). Sekarang ini, sistem *in-bed feeding* sedang diterapkan pada *power plant* yang memakai bahan bakar kayu di Altenburg, Bavaria, Jerman (Werther dkk., 2000).

Di pihak lain, untuk memastikan proses pembakaran dapat berjalan sempurna, maka pembakaran dilangsungkan pada kondisi udara berlebih (*excess air*). Besarnya udara berlebih tergantung pada jenis bahan bakar dan alat/dapur pembakarannya. Menurut Muin (1988), udara berlebih yang diizinkan berkisar antara 25-50%. Dalam penelitian ini, pemilihan dan klasifikasi ruang bakar *FBB* merujuk pada studi Wahyu dkk., (2011); hidrodinamika unggun terfluidisasi, kontak gas-padatan serta kecepatan gas di

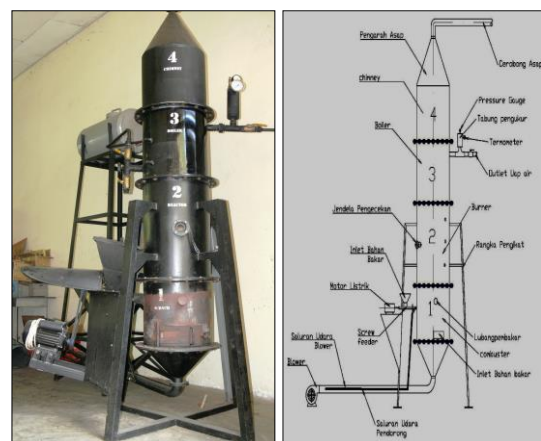
dalam unggun. Sistem unggun terfluidisasi mempunyai hidrodinamika lebih baik dibanding unggun tetap. Hidrodinamika sistem unggun terfluidisasi dapat meningkatkan efektifitas pergerakan dan interaksi gas dan partikel di dalam *combustor* (Basu, 2006). Penambahan bahan *inert* sebagai material unggun sering dilakukan untuk mendapatkan hidrodinamika yang baik terutama untuk biomassa yang densitas curahnya rendah (Pécora dkk., 2014).

Di Laboratorium Sumberdaya Energi, Jurusan Teknik Kimia, Universitas Syiah Kuala, penelitian tentang pembakaran dalam *Fluidized Bed Boiler* sudah dimulai sejak tahun 2005. Sampai dengan 2011, penelitian difokuskan pada pembakaran campuran biomassa (cangkang sawit)-batubara dengan kapasitas 3 kg/jam bahan bakar. *FBB* didesain pada interval campuran bahan bakar 0-100%, artinya unit *FBB* dapat beroperasi pada kondisi bahan bakar 100% batubara sampai dengan 100% biomassa. Penelitian tersebut hanya sampai pada tahap pembangkitan kukus, belum sampai ke tahap pembangkitan daya listrik (Mahidin dkk., 2009 dan 2011). Didasarkan pada pengalaman tersebut, maka tahun 2012-2013 penelitian diarahkan ke pembakaran biomassa (*single combustion*), menggunakan teknologi sejenis berkapasitas 2 kW, sebagaimana dilaporkan dalam artikel ini.

2. Metodologi

2.1. Alat dan Bahan

Pada pengujian ini digunakan satu unit *FBB* yang dilengkapi dengan instrumen pengukur tekanan dan temperatur. *FBB* terdiri atas *combustor*, *freeboard*, *boiler* dan *chimney*. Secara lengkap unit peralatan uji diperlihatkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Fluidized Bed Boiler

Biomassa yang digunakan di sini dipilih berdasarkan kemiripan karakteristik, tetapi beda berat jenis curah dan tingkat kekerasan (Amaral dkk., 2014). Pengamatan terhadap karakteristik pembakaran kayu keras dan lunak yang mereka lakukan memberikan fakta bahwa karakteristik pembakaran antara kedua jenis biomassa tersebut berbeda. Biomassa yang diuji dalam studi ini masing-masing adalah serpihan kayu ketam dan ranting kayu kering (jenis biomassa keras) serta kulit pinang (jenis biomassa lunak) seperti terlihat pada Gambar 2 - 4.



Gambar 2. Serpihan kayu ketam



Gambar 3. Kulit pinang



Gambar 4. Ranting kayu

Serpihan kayu ketam adalah limbah yang diambil pada kilang/panglung kayu dan kulit pinang diambil dari masyarakat yang mem-

produksi biji pinang. Kedua biomassa tersebut langsung dijadikan bahan bakar tanpa perlakuan awal. Sedangkan ranting kayu adalah limbah pembersihan kebun dan pekarangan yang selanjutnya dipotong-potong dengan ukuran 5-10 cm.

2.2. Prosedur Penelitian

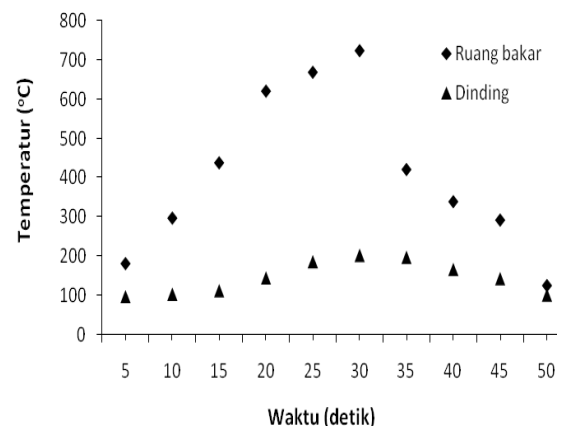
Serpihan kayu ketam ditimbang dengan berat 2 kg, untuk sekali pengujian dengan sekali *loading* tanpa *inter-fuel feeding*. Untuk pengujian model *inter-fuel feeding*, setelah di*loading* mula-mula dengan 2 kg, lalu ditambah 1 kg untuk *inter-feeding* (*semi-continuous feeding*) pada saat pembakaran mencapai 35 detik. Sementara itu, untuk biomassa kulit pinang dan ranting kayu ditimbang dengan berat yang sama, yaitu 2 kg, untuk sekali pengujian tanpa perlakuan *inter-fuel feeding*.

Pengukuran temperatur pembakaran dilakukan setiap interval 10 detik pada dinding dan ruang bakar (*combustor*) masing-masing 1 titik serta 3 titik di *freeboard* (bawah, tengah, dan atas). Karakteristik yang dilaporkan di sini hanya temperatur pembakaran pada titik-titik pengukuran yang disebutkan di atas.

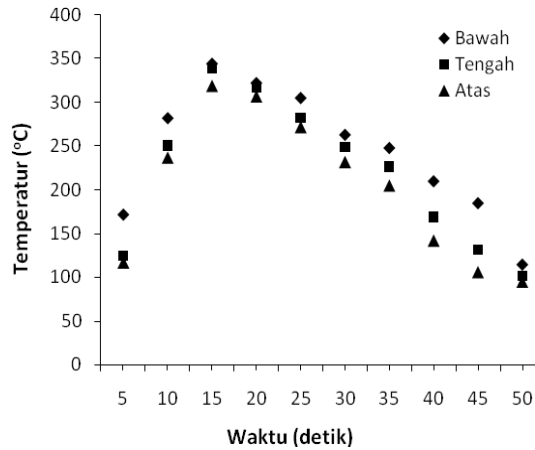
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pembakaran Serpihan Kayu Ketam

Gambar 5 memperlihatkan profil temperatur pembakaran biomassa serpihan kayu ketam. Grafik menunjukkan karakter temperatur pembakaran yang spesifik, dimana temperatur maksimum terdeteksi pada detik ke-30, baik untuk ruang bakar maupun dinding ruang bakar. Temperatur maksimum masing-masing adalah $\pm 700^{\circ}\text{C}$ dan 200°C .



Gambar 5. Profil temperatur pembakaran serpihan kayu ketam di ruang bakar



Gambar 6. Profil temperatur pembakaran serpihan kayu ketam di *freeboard*

Selanjutnya, Gambar 6 menunjukkan profil temperatur di *freeboard*. Kurva memperlihatkan bahwa temperatur maksimum lebih cepat dicapai, yaitu pada saat pembakaran baru berlangsung 15 detik. Fenomena ini sudah diamati sebelumnya oleh Preto dkk. pada tahun 1987 (Werther dkk., 2000) pada pembakaran sekam padi, terutama untuk sistem *over-bed feeding*. Meskipun dalam studi ini sistem yang digunakan adalah *under-bed feeding*, fenomena serupa juga ditemukan.

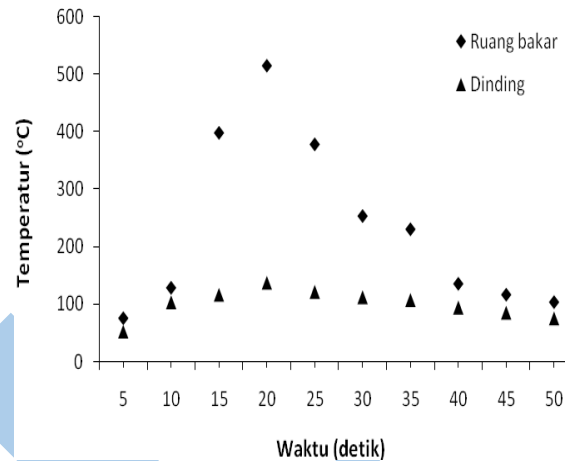
Cepatnya tercapai temperatur maksimum di *freeboard* diprediksikan bahwa sebahagian besar volatil yang terkandung dalam biomassa menguap dan terbakar di awal pembakaran berlangsung. Berbeda halnya dengan yang terjadi di ruang bakar, dimana proses pembakaran arang (*charcoal*) berlangsung, butuh waktu yang lebih lama untuk mencapai pembakaran maksimum. Perihal yang perlu menjadi perhatian adalah fenomena ini mungkin tidak akan teramati pada FBB skala komersial dimana proses pencampuran yang dihasilkan sistem fluidisasi lebih baik dan sempurna.

3.2. Pembakaran Kulit Pinang

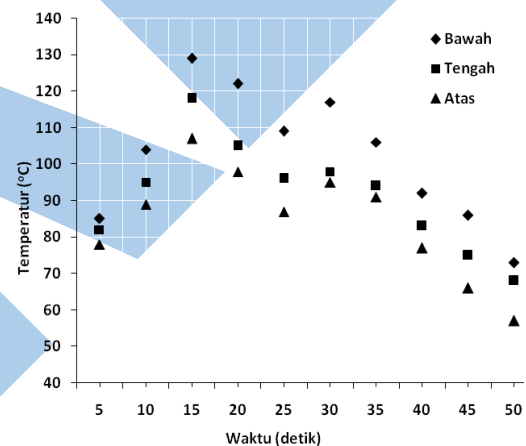
Gambar 7 menunjukkan temperatur hasil pembakaran kulit pinang. Jenis biomassa ini adalah serabut sehingga perubahan temperatur pembakarannya lebih signifikan, dimana pola kurva temperatur ruang bakarnya lebih terjal (*sharp*) sejak awal pembakaran sampai mencapai temperatur maksimum. Fakta ini terlihat pada interval temperatur pembakaran 150°C – 500°C.

Sementara itu, perubahan temperatur dinding ruang bakar tidak terlalu signifikan dibanding data dalam Gambar 5 untuk serpihan kayu ketam. Hal ini dimungkinkan

karena adanya pembatasan jumlah bahan bakar (yaitu 2 kg biomassa untuk satu *batch* pembakaran), tanpa penambahan bahan bakar.



Gambar 7. Profil temperatur pembakaran kulit pinang di ruang bakar



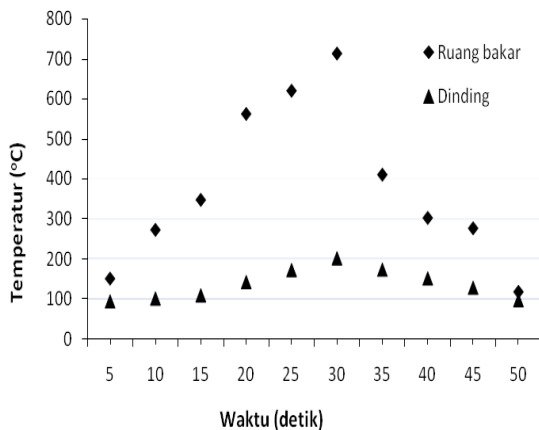
Gambar 8. Profil temperatur pembakaran kulit pinang di *freeboard*

Gambar 8 menjelaskan profil temperatur pembakaran kulit pinang di *freeboard*. Pola yang dihasilkan berbeda dengan serpihan kayu ketam. Terdapat dua puncak temperatur maksimum di *freeboard*, yaitu pada detik ke 15 dan 30. Hal ini diprediksi karena ada pembakaran volatil yang terjadi berulang atau puncak yang pertama adalah pembakaran biomassa yang terbawa ke *freeboard* karena ringan (dibanding dua biomassa lain yang diuji dalam studi ini) dan puncak yang kedua adalah pembakaran volatil.

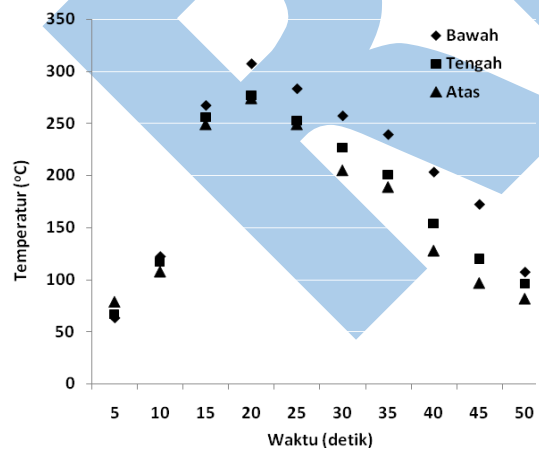
3.3. Pembakaran Ranting Kayu Kering

Gambar 9 dan 10 mengilustrasikan profil temperatur pada pembakaran ranting kayu kering, baik pada ruang bakar maupun *freeboard*. Kurva memperlihatkan bahwa

profil temperatur pada semua titik pengukuran sangat identik dengan profil temperatur serpihan kayu ketam (Gambar 5 dan 6). Temperatur maksimum muncul pada waktu pembakaran yang sama dengan serpihan kayu ketam, terutama pada ruang bakar. Sedangkan pada *freeboard*, titik maksimum untuk ranting kayu sedikit bergeser ke detik 20, dibandingkan dengan serpihan kayu ketam yang berada pada detik ke 15. Titik maksimum yang muncul dalam *freeboard* juga tunggal, berbeda halnya dengan karakteristik pembakaran kulit pinang dimana titik maksimum muncul dua kali.



Gambar 9. Profil temperatur pembakaran ranting kayu di ruang bakar



Gambar 10. Profil temperatur pembakaran ranting kayu di *freeboard*

Secara keseluruhan Gambar 9 dan 10 menggambarkan bahwa karakteristik pembakaran ranting kayu kering mirip dengan serpihan kayu ketam. Fenomena ini dimungkinkan terjadi karena kedua biomassa tersebut termasuk jenis biomassa padat (densitas tinggi), dibandingkan kulit pinang (densitas rendah).

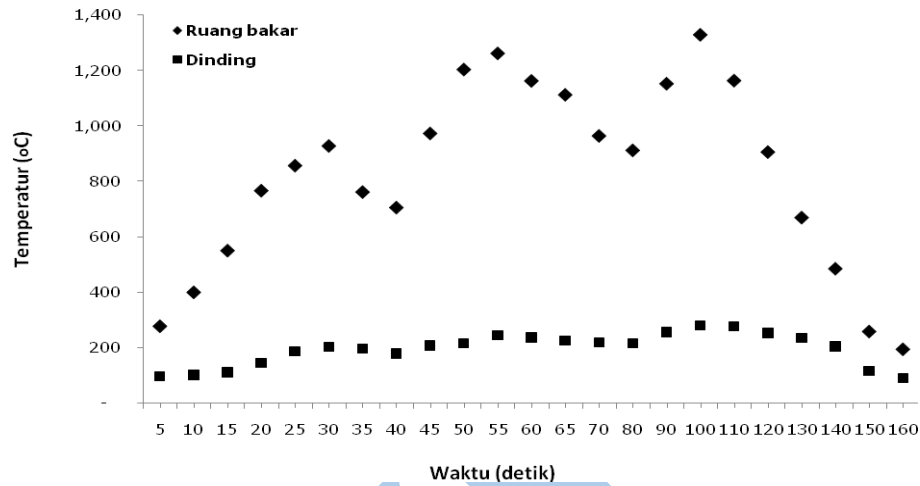
3.4. Profil Temperatur pada Pembakaran dengan *Inter-Feeding System*

Profil temperatur hasil pembakaran biomassa serpihan kayu ketam dengan *inter-feeding system* dapat dilihat pada Gambar 11. Pola temperatur pembakaran mengalami peningkatan seiring dengan waktu *feeding* bahan bakar dilakukan. Dari kurva temperatur dapat diketahui bahwa untuk mendapatkan pola temperatur yang konstan pada nilai maksimum, maka sistem *feeding* harus kontinyu. Satu hal yang cukup menarik bahwa temperatur maksimum juga dapat ditingkatkan dengan sistem ini, dimana tanpa *inter-feeding* temperatur maksimum untuk serpihan kayu adalah 724°C meningkat menjadi 1407°C pada sistem *inter-feeding*. Ini merupakan suatu peningkatan yang sangat signifikan.

Tabel 1. Temperatur pembakaran dengan *inter-fuel feeding system*

Biomassa (Serpihan Kayu Ketam)	Waktu (detik)	Temperatur Ruang Bakar (°C)	Temperatur Dinding (°C)
2 kg (loading)	5	181	97
	10	297	103
	15	438	112
	20	621	145
	25	669	187
	30	724	203
	35	563	198
0,5 kg (feeding)	40	525	180
	45	764	208
	50	985	217
	55	1,015	245
	60	923	238
	65	885	226
	70	743	220
0,5 kg (feeding)	80	695	216
	90	895	256
	100	1,047	280
	110	885	277
	120	652	253
	130	433	236
	140	280	205
0 kg	150	142	117
	160	103	92

Tabel 1 memperlihatkan temperatur pembakaran serpihan kayu ketam di ruang bakar dan dindingnya untuk *inter-fuel feeding system*. Sebagaimana juga dipaparkan pada



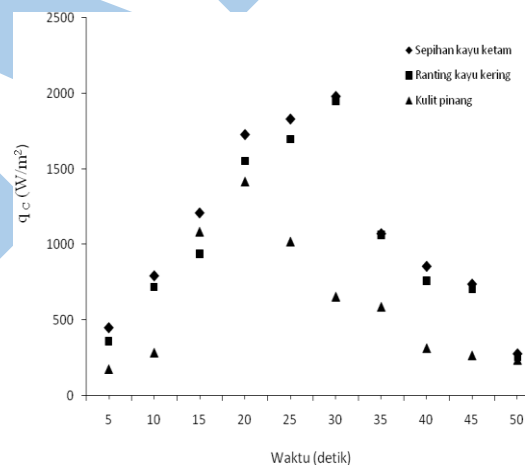
Gambar 11. Profil temperatur pembakaran *inter-fuel feeding system*

Gambar 11, selisih antara temperatur ruang bakar dengan dindingnya sangat jauh. Untuk waktu pengujian sampai dengan 160 detik, perpindahan panas konduksi pada dinding ruang bakar belum mencapai nilai yang maksimum atau belum mencapai kesetimbangan dengan temperatur ruang bakar. Fenomena serupa juga terjadi untuk pembakaran tanpa *inter-fuel feeding system*

peratur, waktu pencapaian laju perpindahan panas maksimum untuk kulit pinang adalah 20 detik, sedangkan serpihan kayu ketam dan ranting kayu adalah 30 detik.

3.5. Laju Perpindahan Panas Konveksi

Pada bagian ini didiskusikan laju perpindahan panas konveksi dalam ruang bakar. Kurva-kurva perpindahan panas untuk ketiga jenis biomassa berkelakuan hampir sama. Hal ini menunjukkan bahwa pola perpindahan panas yang terjadi sama, hanya berbeda dalam besar kecilnya laju perpindahan saja. Besar kecilnya laju perpindahan panas sangat dipengaruhi oleh jumlah energi per satuan biomassa itu sendiri, yang teramati pada tinggi rendahnya temperatur pembakaran sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 5, 7, dan 9.



Gambar 12. Laju pindah panas konveksi pada ruang bakar

Hal lain yang menarik adalah waktu padam (*burn out*) yang mirip untuk semua jenis biomassa seperti terlihat pada Gambar 5 - 10. Meskipun karakter biomassa yang diuji berbeda (terutama densitas curah dan tingkat kekerasannya) dan sebagian dari karakter pembakarannya juga berbeda (yang ditunjukkan oleh profil temperatur pembakaran yang sudah dibahas sebelumnya), tetapi waktu padam yang dimiliki hampir sama. Fakta ini diperkirakan muncul karena karakter arang yang dihasilkan pada pembakaran biomassa-biomassa ini serupa. Perlu dicatat di sini bahwa waktu padam sangat dipengaruhi oleh karakter arang.

4. Kesimpulan

Dari data profil temperatur didapat bahwa temperatur maksimum pembakaran diperoleh pada rentang waktu antara 20 sampai dengan 30 detik, berbeda menurut jenis bahan bakar, untuk proses pembakaran tanpa *inter-fuel feeding system*. *Inter-fuel feeding system* dapat menghasilkan temperatur pembakaran yang lebih konstan sekaligus dapat meningkatkan temperatur pembakaran. Pola laju perpindahan panas mengikuti pola profil temperatur.

Ucapan Terimakasih

Terimakasih penulis sampaikan kepada DP2M Dikti atas pendanaan penelitian ini melalui HIBAH PENELITIAN TIM PASCA-SARJANA-HPTP (HIBAH PASCA) tahun 2012.

Daftar Pustaka

- Aghamohammadi, N., Nik Sulaiman, N.M., Aroua, M.Kh. (2011) Combustion characteristics of biomass in South East Asia, *Biomass and Bioenergy*, 35, 3884-3890.
- Amaral, S. S., de Carvalho Jr, J. A., Costa, M. A. M., Neto, T. G. S., Dellani, R., Leite, L. H. S. (2014) Comparative study for hardwood and softwood forest biomass: chemical characterization, combustion phases and gas and particulate matter emissions, *Bioresource Technology*, 164, 55-63.
- Basu, P. (2006) *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*, CRC Press, Taylor and Francis Group, London.
- Bapat, D.W., Kulkarni, S.V., Bhandarkar, V.P. (1997) Design and operating experience on fluidized bed boiler burning biomass fuels with high alkali ash, *Proceedings of the 14th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, Vancouver, Juni 1997.
- Bhattacharya, S.C., Shah, N., Alikhani, Z. (1984) Some aspects of fluidized bed combustion of paddy husk, *Applied Energy*, 16, 307-16.
- Chen, G., Fang, M., Luo, Z., Li, X., Shi, Z., Cen, K., Ni, M. (1997) Experimental research on rice husk combustion in CFB boiler and the design of a 35 t/h rice husk-fired CFB boiler, *Proceedings of the 14th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, Vancouver, Juni 1997.
- Demirbas, A. (2004) Combustion characteristics of different biomass fuels, *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, 219-230.
- DESDM (2005) *Blueprint Pengelolaan Energi Nasional 2005-2025*, Jakarta.
- Liu, H., Lin, Z., Liu, D., Wu, W. (1995) Combustion characteristics of rice husk in fluidized beds, *Proceedings of the 13th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, Orlando, Mei 1995.
- Mahidin, Khairil, Gani, A., Adisalamun. (2009) Karakteristik pembakaran batubara peringkat rendah, cangkang sawit dan campurannya dalam fluidized bed boiler, *Reaktor*, 12, 253-259.
- Mahidin, Khairil, Gani, A. (2011) Efisiensi *heat recovery* pada pembakaran batubara peringkat rendah, cangkang sawit dan campurannya, *Jurnal Teknik Mesin*, 11, 22-31.
- Muin, S.A. (1988) *Pesawat-pesawat Konversi Energi I: Ketel Uap*, Rajawali Press, Jakarta.
- Muthukrishnan, M., Sundararajan, S., Viswanathan, G., Sarajam, S., Kamalanathan, N., Ramakrishnan, P. (1995) Salient features and operating experience with world's first rice straw fired fluidized bed boiler in a 10 MW power plant, *Proceedings of the 13th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, Orlando.
- Natarajan, E., Nordin, A., Rao, A.N. (1998) Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactors, *Biomass Bioenergy*, 14, 533-546.
- Ninduangdee, P., Kuprianov, V.I., (2014) Combustion of palm kernel shell in a fluidized bed : Optimization of biomass particle size and operating conditions, *Conversion and Management*, 85, 800-808.
- Ogada, T., Werther, J. (1996) Combustion characteristics of wet sludge in a

- fluidized bed: release and combustion of the volatiles, *Fuel*, 75, 617–626.
- Pécora, A.A.B., Ávila, I., Lira, C. S., Cruz, G., Crnkovic, P.M. (2014) Prediction of the combustion process in fluidized bed based on physical–chemical properties of biomass particles and their hydrodynamic behaviors, *Fuel Processing Technology*, 124, 188-197.
- Raczeck, U. V, (1992) Experimental investigation of the emissions and combustion characteristics of sewage sludge in a semi-pilot scale fluidized bed combustor, *Ph.D. Thesis*, Technical University Hamburg-Harburg, Germany.
- Rao, K. V. N. S., Reddy, G. V., (2005) Combustion Studies of Rice Husk in Fluidized Bed, *Journal of Water and Energy International*, 62, 22-28.
- REN21 (2008) *Renewables 2007 Global Status Report*, Worldwatch Institute, Washington DC.
- Wahyu, H., Djunaedi, I. Affendi, M., Sugiyatno, Utomo, Y. S. (2011) *Perancangan dan Pengembangan Model Reaktor Circulating Fluidized Bed untuk Gasifikasi Biomassa*, Pusat Penelitian Fisika LIPI, Bandung.
- Werther, J., Saenger, M., Hartge, E.-U., Ogada, T., Siagi, Z. (2000) Combustion of agricultural residues, *Progress in Energy and Combustion Science*, 26, 1–27.
- Williams, A., Jones, J.M., Ma, L., Pourkashanian, M. (2012) Pollutants from the combustion of solid biomass fuels, *Progress in Energy and Combustion Science*, 38, 113-137.
- Yu, C., Tang, Z., Zeng, L., Chen, C., Gong, B. (2014) Experimental determination of agglomeration tendency in fluidized bed combustion of biomass by measuring slip resistance, *Fuel*, 128, 14-20.