

Simulasi CFD Pembakaran *Non-Premixed* Serbuk Biomass Kayu Jati

Suyitno dan Tri Istanto

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UNS

E-mail: msuyitno@yahoo.com; triis_meuns2000@yahoo.com

ABSTRAK

Krisis energi di Indonesia dalam jangka waktu yang lama sangat berbahaya bagi kehidupan manusia. Oleh karena itu penganeka-ragaman sumber-sumber energi dan metoda untuk mengubahnya menjadi sangat mendesak untuk dilakukan. Salah satu sumber energi yang sangat menarik dan sangat kompetitif adalah biomas. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis karakteristik pembakaran pada kayu jati dengan menggunakan simulasi CFD. Diameter dari ruang bakar adalah 0,5 m dan panjangnya 10 m. Biomas dibuat serbuk dan diayak sampai ukuran 40 mesh. Beberapa parameter yang divariasikan dalam simulasi yaitu temperatur dinding ruang bakar dari 800 K sampai 1000 K, laju aliran massa biomas dari 0,1 kg/s sampai 1 kg/s dan kadar air dalam biomas dari 0% sampai 20% basis kering. Model ini dapat mensimulasikan profil temperatur gas pembakaran, laju devolatilisasi, laju pembakaran arang dan konsentrasi gas pembakaran (CO_2 , H_2O and CO). Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa temperatur gas pembakaran yang tinggi dan polusi CO yang rendah dapat diperoleh dengan menggunakan temperatur dinding lebih tinggi, kadar air lebih rendah dan rasio udara-biomas yang lebih rendah. Temperatur puncak gas pembakaran dapat mencapai 1200K sampai 1500K. Sumber polusi CO tidak hanya berasal dari proses devolatilisasi tetapi juga dari reaksi antara karbon sisa dengan H_2O .

Kata kunci: *CFD, non-premixed, pembakaran, kayu jati.*

ABSTRACT

Energy crisis in Indonesia for the long time is very dangerous for human live. Therefore, diversifications of the energy resources and the energy conversions are urgently required. One of the sources of energy which is very interesting and very competitive is biomass. The objective of this research is to analyse the combustion characteristics of the Tectona Grandis wood by using CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation. The diameter of combusting reactor is 0.5 m and the length is 10 m. The biomass is pulverized and sieved to 40 mesh. Several parameters are varied i.e, wall temperature from 800 K to 1000 K, the mass flow rate of biomass from 0.1 kg/s to 1 kg/s and the moisture content from 0% to 20% d.b. From this model can be simulated combusting gas temperature profile, devolatilization rate, burning rate and concentration of the combusting gas (CO_2 , H_2O and CO). From the simulation can be concluded that higher gas temperature and lower CO pollution can be attained by using higher wall temperature, lower moisture content and lower ratio of air-biomass. The peak temperature of combustion gas can reach 1200K to 1500K. The source of CO pollution is not only from devolatilization process, but also from the reaction between remaining char and H_2O .

Keywords: *CFD, non-premixed, combustion, Tectona Grandis wood.*

PENDAHULUAN

Krisis energi di Indonesia sudah pada tingkat yang membahayakan bagi kehidupan manusia. Untuk itulah diperlukan usaha-usaha penelitian yang mendalam untuk mencari sumber-sumber energi alternatif. Salah satu sumber energi yang sangat menarik untuk dikembangkan adalah biomas karena sifatnya yang dapat diperbaharui

(renewable). Selain biomas, sumber energi yang cadangannya sangat besar di Indonesia adalah batubara. Namun batubara ini mempunyai sifat yang tidak dapat diperbaharui.

Meningkatnya harga BBM yang sangat tajam menyebabkan banyak kalangan industri beralih ke batubara sebagai sumber energi. Namun persediaan batubara dalam jangka panjang juga akan habis. Batubara sebenarnya juga sudah sejak lama di-

gunakan khususnya untuk PLTU dengan menggunakan teknologi *pulverized coal combustion*. Walaupun sama-sama berbentuk padatan, biomas dan batubara pada saat dibakar mempunyai karakteristik yang berbeda (lihat Tabel 1).

Tabel 1. Perbandingan Sifat Batubara dan Biomas

No	Sifat	Batubara	Biomas
1	Kadar volatil	Lebih rendah (umumnya di bawah 50%)	Lebih tinggi (umumnya di atas 50%)
2	Kadar karbon tetap	Tinggi	Rendah
3	Kadar abu	Sedang	Ada yang sangat tinggi, ada yang sangat rendah
4	Nilai kalor	Tinggi (tergantung tingkatannya)	Sedang (tergantung jenis biomas dan kadar airnya)

Biomas pada umumnya mempunyai kadar volatil yang tinggi sehingga pembakarannya dimulai pada temperatur yang rendah [1]. Proses devolatilisasi pada biomas umumnya terjadi pada temperatur rendah dan hal ini mengindikasikan bahwa biomas mudah dinyalakan dan dibakar, meskipun pembakaran yang diharapkan terjadi sangat cepat dan bahkan sulit dikontrol.

Penelitian intensif pada briket campuran biomas dan batubara telah dilakukan oleh beberapa peneliti [2,3,4,5]. Pembakaran campuran antara batubara dan biomas terdapat beberapa keuntungan yang dapat diperoleh yakni tingginya kadar zat volatil dari mayoritas biomas dan tingginya kandungan karbon (*fixed carbon*) batubara dapat melengkapi satu sama lain. Namun dilain pihak karena beberapa jenis biomas mempunyai kadar abu yang tinggi, penggunaan biomas sebagai bahan bakar dapat menimbulkan kendala tersendiri.

Secara umum, proses pembakaran padatan terdiri dari beberapa tahap seperti pemanasan, pengeringan, devolatilisasi, dan pembakaran arang. Karena kadar volatil yang tinggi pada biomas, maka pengetahuan detail pada proses devolatilisasi menjadi sangat penting. Selama proses devolatilisasi, kandungan volatil akan keluar dalam bentuk gas. Umumnya gas-gas yang keluar selama proses devolatilisasi dapat dikelompokkan kedalam gas yang dapat diembunkan dan gas permanen. Masuk dalam kelompok gas permanen utama selama proses devolatilisasi adalah CO, CO₂, CH₄ dan H₂. Menurut Pengmei Lv, et al. [6], komposisi gas selama devolatilisasi tergantung pada jenis bahan yang digunakan (lihat Tabel 2).

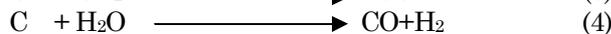
Setelah devolatilisasi akan terjadi oksidasi bahan bakar padat (arang). Laju pembakaran arang tergantung pada konsentrasi oksigen, temperatur gas, bilangan Reynolds, ukuran dan porositas arang [7]. Kenaikan konsentrasi oksigen

dalam gas menimbulkan laju pembakaran bahan bakar padat yang lebih tinggi. Temperatur pembakaran bahan bakar padat yang lebih tinggi menaikkan laju reaksi dan menyebabkan waktu pembakaran bahan bakar padat yang lebih singkat. Kecepatan gas yang tinggi pada permukaan akan menaikkan laju pembakaran bahan bakar padat, terutama disebabkan karena laju perpindahan massa dari oksigen ke permukaan partikel yang lebih tinggi.

Tabel 2. Komposisi Gas selama Proses Devolatilisasi (kering, %vol)

Sampel	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	O ₂
Pinus	16,19	15,36	52,16	9,71	6,58
Lignin	17,10	17,30	26,83	37,52	1,25
Cellulosa	19,28	13,38	53,76	7,41	6,16

Arang karbon bereaksi dengan oksigen pada permukaan partikel membentuk karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂), tetapi secara umum CO merupakan produk utama, selain itu juga permukaan arang karbon juga bereaksi dengan gas karbon dioksida dan uap air. Proses tersebut dinyatakan dalam reaksi-reaksi berikut:



Reaksi (1) merupakan reaksi oksidasi, reaksi (2) merupakan reaksi ketika tidak terdapat uap air dalam campuran, sedangkan reaksi (3) dan (4) merupakan reaksi reduksi yang pada umumnya berlangsung lebih lambat dari pada reaksi oksidasi dan untuk proses pembakaran yang menjadi perhatian penting adalah reaksi oksidasi. Akan tetapi ketika konsentrasi oksigen habis, barulah reaksi-reaksi reduksi ini merupakan faktor penting.

Pembakaran karbon sangat bergantung pada temperatur bahan bakar. Pada temperatur yang lebih rendah, oksigen akan menyelimuti permukaan karbon, diserap dan bereaksi disana. Produk utama dari reaksi permukaan ini adalah CO₂ pada temperatur di bawah sekitar 800K dan CO pada temperatur lebih tinggi. Sehingga, pada reaksi (1) dapat terjadi secara baik jika temperatur permukaan dari karbon sekitar 800K sampai 4000K [8].

METODE PENELITIAN

Analisis proses pembakaran biomas kayu jati akan dilakukan dengan simulasi CFD (Fluent). Biomas dianggap sebagai partikel dengan ukuran 40 mesh. Prosedur pelacakan partikel dalam simulasi Fluent adalah dengan menggunakan metode Euler Lagrangian. Metode ini akan menghitung keseimbangan gaya partikel (Pers. 5) yang kemu-

dian diintegrasikan dalam persamaan kesetimbangan momentum (Pers. 6) (Fluent, 1998).

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g(\rho_p - \rho) / \rho_p + F_x \quad (5)$$

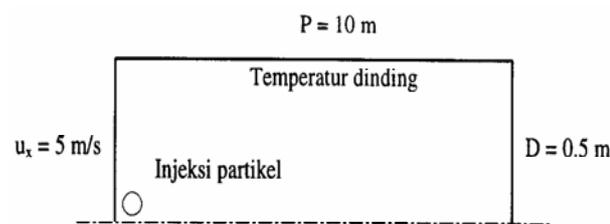
Dimana u adalah kecepatan, F adalah gaya, ρ adalah massa jenis, t adalah waktu. *Subscripts* p menyatakan partikel. Suku pertama pada persamaan sebelah kanan adalah gaya tahanan partikel per satuan massa. Suku kedua di sebelah kanan menyatakan gaya gravitasi dan suku F_x menyatakan gaya tambahan yang dapat berasal dari akibat aliran berputar, gaya termoporetik dan sebagainya.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (6)$$

Pembakaran partikel diasumsikan terjadi tanpa pembakaran awal (*non-premixed*). Kondisi pembakaran biomassa secara *non-adiabatic* dilakukan dengan menggunakan metode PDF (*probability density function*). Tahap-tahap pembakaran dari pemanasan, pengeringan, devolatilisasi, dan pembakaran (*burnout*) dilakukan dengan menggunakan pendekatan *discrete particle model* (DPM). Laju massa selama proses pengeringan, proses devolatilisasi dan proses pembakaran akan diintegrasikan kedalam hukum kekekalan massa (Pers. 7) dalam komponen S_m .

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (7)$$

Simulasi CFD dilakukan secara *implicit-segregated-axisymmetric-steady* dengan menggunakan pendekatan metode volume hingga (*Finite Volume Method*) pada domain seperti tertera pada Gambar 1.



Gambar 1. Domain Kontrol Volume Simulasi CFD

HASIL DAN PEMBAHASAN

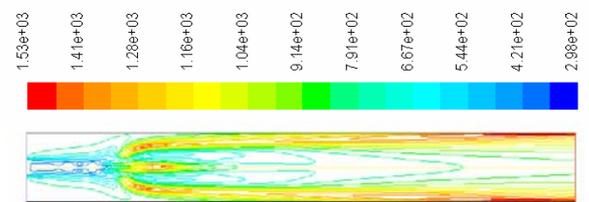
Hasil uji proximate dan ultimate dari sampel biomassa kayu Jati dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4. Dari hasil uji proximate terlihat bahwa kadar volatil dari kayu Jati sangat tinggi, yaitu sampai 88% dengan kadar abu yang rendah (1%). Sedangkan dari analisis ultimate terlihat bahwa zat-zat utama dalam kayu adalah karbon, hidrogen dan oksigen.

Tabel 3. Uji Proximate Sampel Biomassa Kayu Jati

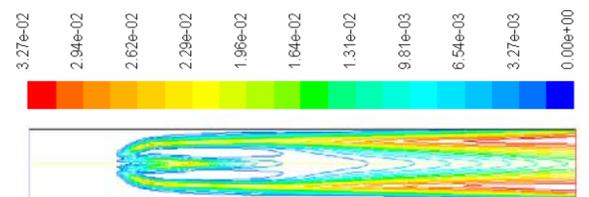
Zat	Komposisi
Volatil %wt, DAF	87,90%
Char, %wt, DAF	12,10%
Ash, %wt	1,19%
Water, %wt,wb	10,74%

Tabel 4. Uji Ultimate Sampel Biomassa

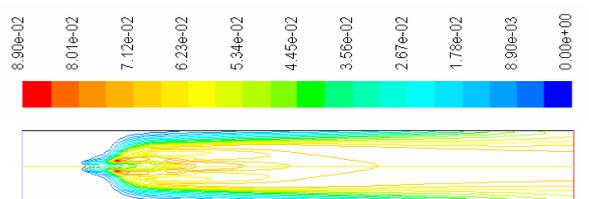
Ultimate	%wt	%wt, DAF	MW	Moles	Mole Fraction
C	48,70%	48,70%	12	4,06	0,306
H	6,40%	6,40%	1	6,4	0,482
O	44,12%	44,12%	16	2,76	0,208
N	0,78%	0,78%	14	0,056	0,004
S	0,00%		32		0,000
Total	100%	100%		13,27	1



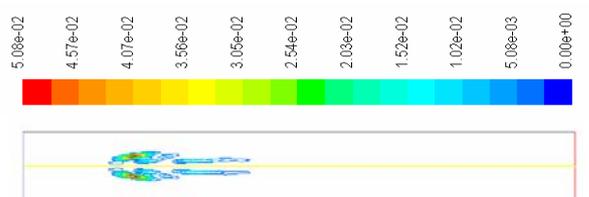
Profil temperatur



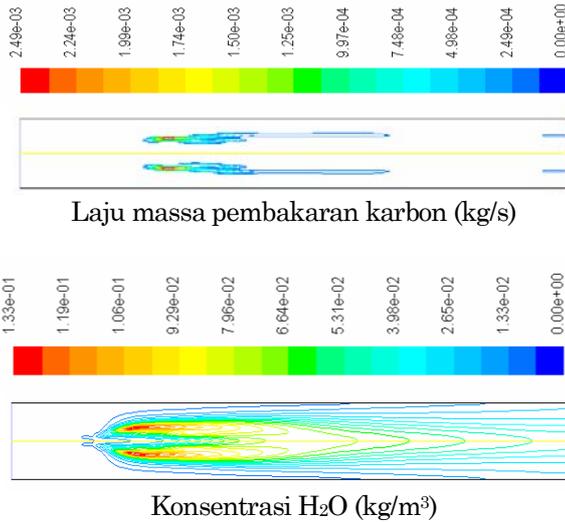
Konsentrasi CO (kg/m³)



Konsentrasi CO₂ (kg/m³)



Laju massa pengeringan dan devolatilisasi (kg/s)



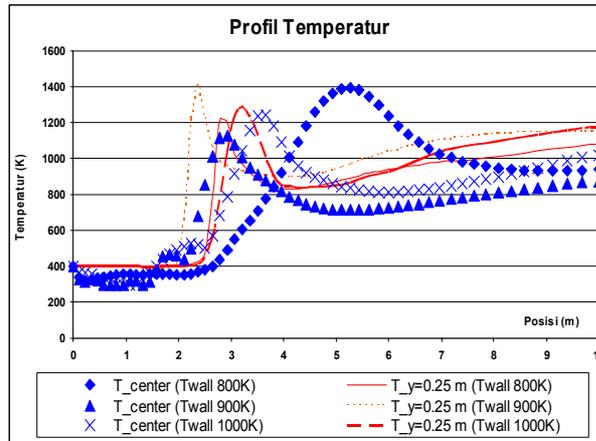
Gambar 2. Karakteristik Pembakaran pada Kondisi Batas Temperatur Dinding 800 K, Kecepatan Udara Masuk 5 m/s, Temperatur Udara Masuk 800 K, Laju Massa Biomasa = 0.1 kg/s, Kadar Air Dalam Biomasa = 0% d.b

Gambar 2 memperlihatkan hasil simulasi untuk profil temperatur, laju massa pengeringan dan devolatilisasi, laju pembakaran karbon sisa, konsentrasi CO, konsentrasi CO₂, dan konsentrasi H₂O dalam ruang bakar. Pada kondisi batas temperatur dinding 800K, kecepatan udara masuk 5 m/s dan temperatur udara masuk 400K diperoleh temperatur puncak pembakaran sekitar 1500K. Laju devolatilisasi maksimum dan laju pembakaran maksimum karbon sisa masing-masingnya adalah 0,0508 kg/s dan 0,00249 kg/s. Konsentrasi tertinggi CO, CO₂ dan H₂O pada gas pembakaran adalah 0,0327 kg/m³, 0,089 kg/m³, dan 0,133 kg/m³. Konsentrasi CO banyak terjadi pada bagian akhir ruang bakar. Fenomena ini menunjukkan bahwa CO terbentuk selain pada proses devolatilisasi tetapi juga terbentuk pada akhir proses. Proses yang mungkin terjadi di akhir pembakaran adalah terbentuknya CO dari reaksi antara karbon sisa dan H₂O (lihat Persamaan 4).

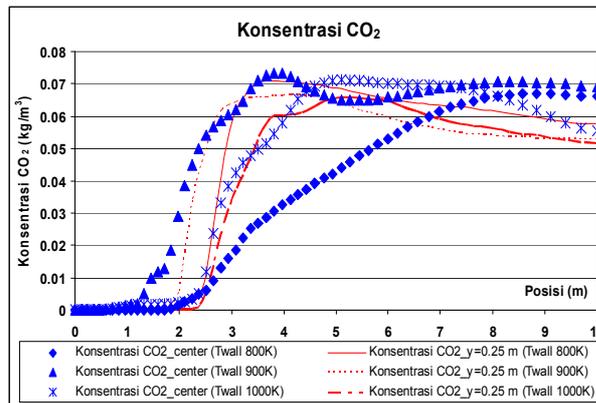
Pengaruh Temperatur Dinding Ruang Bakar

Dari Gambar 3 terlihat bahwa semakin tinggi temperatur dinding akan menyebabkan biomasa kayu Jati terbakar diawal. Sedangkan dengan menggunakan temperatur dinding 800 K proses devolatilisasi dan proses pembakaran karbon lebih lambat dibandingkan pada temperatur dinding 900K dan 1000K. Hal ini dapat dijelaskan karena untuk terjadinya proses devolatilisasi dan proses pembakaran karbon dibutuhkan sejumlah energi untuk mengatasi energi aktivasi dari biomasa. Kenaikan temperatur dinding dari 800K ke 1000K tidak terlalu mempengaruhi temperatur puncak pembakaran dari biomasa kayu Jati. Temperatur

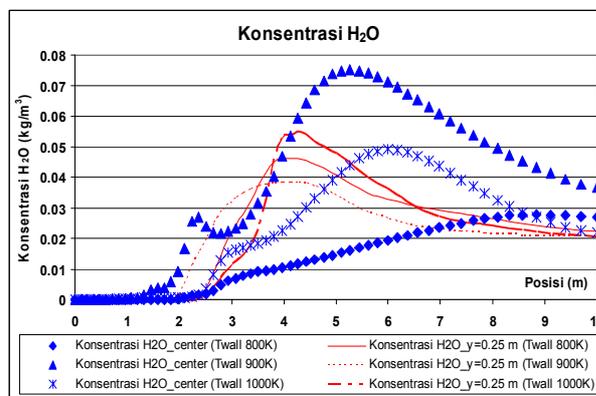
puncak pembakaran biomasa kayu Jati pada kisaran 1200 K sampai 1500 K.



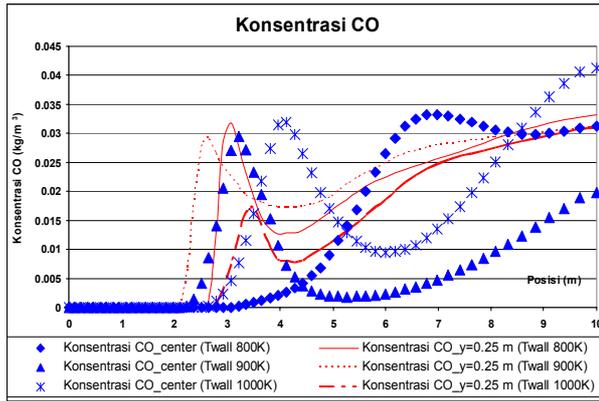
Gambar 3. Profil temperature Gas Pembakaran untuk Variasi Temperatur Dinding Ruang Bakar



Gambar 4. Profil Konsentrasi CO₂ dalam Gas Pembakaran untuk Variasi Temperatur Dinding Ruang Bakar



Gambar 5. Profil Konsentrasi H₂O dalam Gas Pembakaran untuk Variasi Temperatur Dinding Ruang Bakar



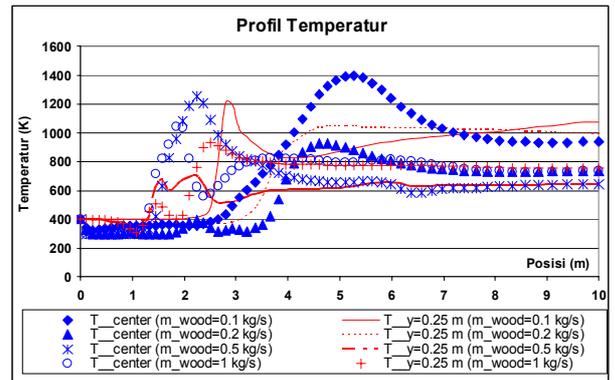
Gambar 6. Profil Konsentrasi CO dalam Gas Pembakaran untuk Variasi Temperatur Dinding Ruang Bakar

Dari Gambar 4 dapat dilihat kadar CO₂ dari hasil pembakaran biomassa kayu Jati. Temperatur dinding ruang bakar terlihat tidak terlalu berpengaruh pada besarnya konsentrasi CO₂. Setelah temperatur puncak pembakaran, kadar CO₂ selanjutnya tidak mengalami penurunan dan kenaikan yang berarti. Ini menunjukkan bahwa konsentrasi CO₂ dari hasil proses devolatilisasi dan pembakaran karbon tidak mengalami reaksi lanjutan (tidak terjadi reaksi seperti pada Persamaan 4). Fenomena ini berbeda dengan konsentrasi CO dan konsentrasi H₂O dimana setelah temperatur puncak pembakaran, terjadi kenaikan kadar CO (lihat Gambar 6) dan penurunan kadar H₂O (lihat Gambar 5). Ini memperlihatkan fenomena bahwa terjadi reaksi antara H₂O dan kadar karbon sisa membentuk CO seperti diperlihatkan pada Persamaan 4.

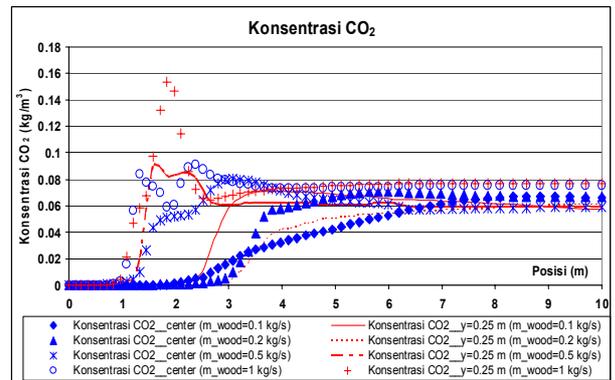
Pengaruh Rasio Udara-Biomassa

Dari Gambar 7 terlihat bahwa temperatur puncak pembakaran tertinggi terjadi pada laju aliran biomassa 0,1 kg/s. Fenomena ini menunjukkan bahwa dengan laju biomassa yang lebih rendah akan lebih menjamin terjadinya pembakaran yang sempurna. Pada jenis biomassa kayu Jati, pembakaran secara stoikiometri terjadi pada perbandingan udara-bahan bakar (A/F) sekitar 22,5. Dengan menggunakan biomassa sebesar 0,1 kg/s dan laju aliran udara 5 m/s akan diperoleh perbandingan A/F sebesar 10. Ini menunjukkan bahwa pembakaran terjadi dalam kondisi campuran kaya bahan bakar. Dengan meningkatkan laju massa biomassa dari 0,1 kg/s menjadi 1 kg/s berarti akan menurunkan perbandingan A/F dari 10 menjadi 1. Artinya pembakaran akan terjadi dalam kondisi sangat kaya bahan bakar (*very rich combustion*). Pengaruh dari kondisi pembakaran dengan campuran kaya biomassa dapat dilihat dari peningkatan kadar CO khususnya di bagian depan ruang bakar.

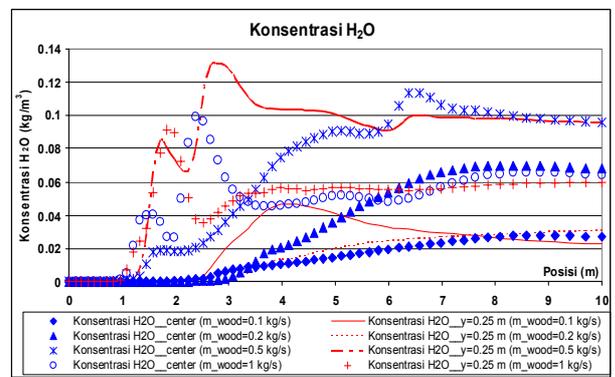
Semakin besar laju alir biomassa ke ruang bakar menyebabkan kadar H₂O meningkat (lihat Gambar 9) tetapi tidak menyebabkan kenaikan kadar CO₂ (lihat Gambar 8). Hal ini menunjukkan bahwa tidak terjadi reaksi seperti pada Persamaan 4. Reaksi ini terjadi secara endotermik dan dengan semakin tingginya laju alir biomassa menyebabkan temperatur pembakaran tidak terlalu tinggi (di bawah 800 K) sehingga tidak tersedia cukup energi untuk berlangsungnya reaksi pada Persamaan 4.



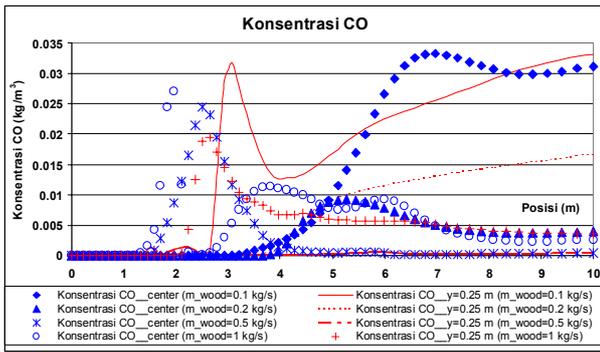
Gambar 7. Profil Temperatur Gas Pembakaran untuk Variasi Rasio A/F



Gambar 8. Profil Konsentrasi CO₂ dalam Gas Pembakaran untuk Variasi Rasio A/F



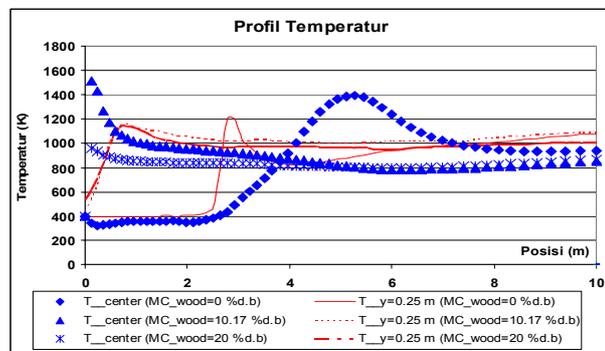
Gambar 9. Profil Konsentrasi H₂O dalam Gas Pembakaran untuk Variasi Rasio A/F



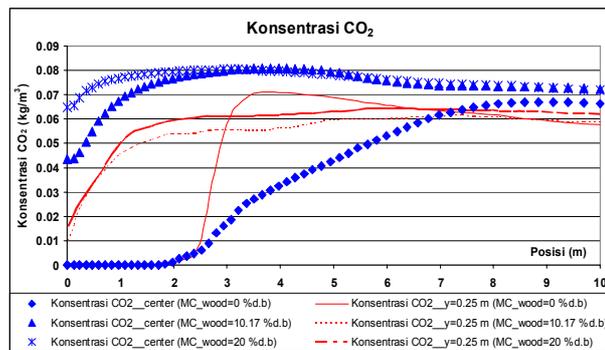
Gambar 10. Profil Konsentrasi CO dalam Gas Pembakaran untuk variasi rasio A/F

Pengaruh Kadar Air

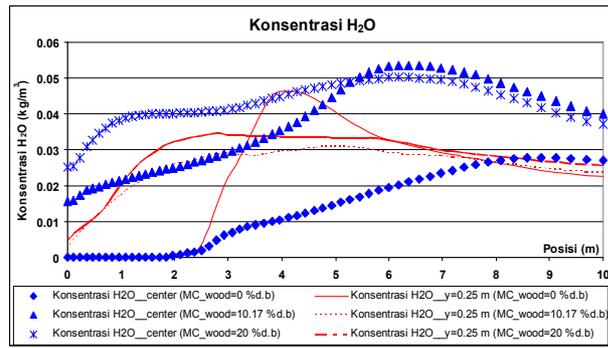
Dengan semakin tingginya kadar air dalam biomasa menyebabkan temperatur pembakaran menurun (lihat Gambar 11) dan kadar H₂O meningkat (lihat Gambar 13). Dengan semakin tingginya kadar air menyebabkan biomasa kayu Jati lebih sulit dibakar sehingga terbentuk CO yang tinggi di awal proses pembakaran (lihat Gambar 14). Massa biomasa secara keseluruhan juga akan meningkat dengan semakin tingginya kadar air sehingga dibutuhkan tekanan yang lebih besar dari nosel untuk menyemburkan biomasa. Dengan tanpa mengubah tekanan nosel, maka pembakaran pada kondisi biomasa yang mempunyai kadar air tinggi akan terjadi pada bagian depan ruang bakar (lihat Gambar 15).



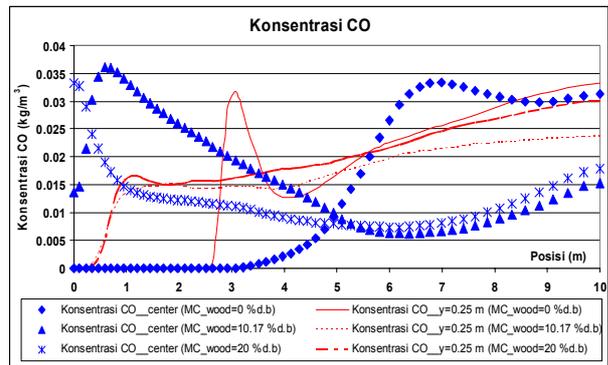
Gambar 11. Profil Temperatur Gas Pembakaran untuk Variasi Kadar Air



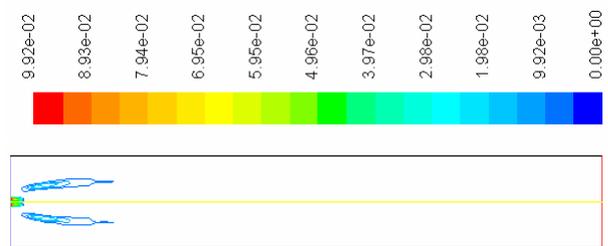
Gambar 12. Profil Konsentrasi CO₂ dalam Gas Pembakaran untuk Variasi Kadar Air



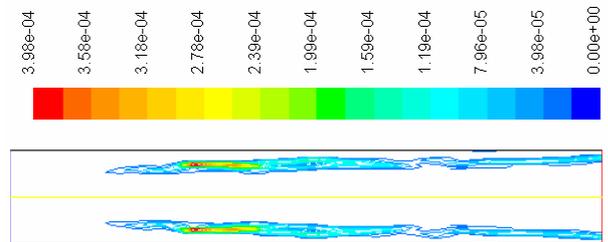
Gambar 13. Profil Konsentrasi H₂O dalam Gas Pembakaran untuk Variasi Kadar Air



Gambar 14. Profil Konsentrasi CO dalam Gas Pembakaran untuk Variasi Kadar Air



Laju pengeringan dan devolatilisasi



Laju pembakaran karbon sisa

Gambar 15. Laju Pengeringan dan Devolatilisasi dan Laju Pembakaran Karbon Sisa pada Biomasa dengan Kadar Air 20% d.b.

KESIMPULAN

Dari analisis di atas dapat ditarik beberapa kesimpulan:

1. Simulasi CFD dengan bantuan *software* Fluent sangat berguna untuk menjelaskan detail fenomena pembakaran biomas baik proses pembakaran maupun komposisi gas pembakaran.
2. Temperatur gas pembakaran yang tinggi dan polusi CO yang rendah dapat diperoleh dengan menggunakan temperatur dinding lebih tinggi, kadar air lebih rendah dan rasio udara-biomas yang lebih rendah.
3. Temperatur puncak gas pembakaran dapat mencapai 1200K sampai 1500K.
4. Sumber polusi CO tidak hanya berasal dari proses devolatilisasi tetapi juga dari reaksi antara karbon sisa dengan H₂O.

Untuk selanjutnya penelitian akan dikembangkan untuk pembakaran campuran miskin biomas dengan berbagai jenis biomas. Dengan berhasilnya simulasi pembakaran biomas dengan kadar air tinggi diharapkan dapat dijadikan bahan rujukan untuk simulasi proses pembakaran campuran biomas dengan minyak.

DAFTAR PUSTAKA

1. Werther, J., Saenger, M., Hartge, E.U., Oged, T., Siagi, Z., *Combustion of Agricultural Residues, Progress in Energy and Combustion Science*, 2000, vol 26.
2. Bahillo. A., Cabanillas. P.A, Gayan. L.P., De Diego. L., dan Adanez, J., Co-combustion of coal and biomass in FB boilers : model validation with experimental results from CFB pilot plant, *Energy Agency-Fluidized Bed Conversion*, 2003.
3. Saptoadi, H., Energy from Indigenous for Enhancing the Regional Competitiveness, *the 2nd Asean Science congress and Subcomitte Conferences*, 7th ASTW, 5-7 August 2005, Indonesia.
4. Saptoadi, H., The best composition of coal-biomass briquettes, *A two day Collaboration Workshop on Energy, Enviromental, and New Trend in Mechanical Engineering*, Department of Mechanical Engineering Brawijaya University_Keio University, 2004.
5. Saptoadi, H., Cofiring of agriculture wastes for small and medium scale industries, *International Conference on Integrated Renewable Energy for Regional Development*, Bali, Indonesia, 2001.
6. Pengmei Lv, Chang, J., Wang, T., dan Wu, C. A Kinetic Study on Biomass Fast Catalytic Pyrolysis. *Energy & Fuels* 2004, vol 18 hal. 1865-1869.
7. Borman, G.L. dan Ragland, K.W. *Combustion Engineering*, McGrawHill Publishing Co, New York, 1998.
8. Williams, F.A., *Combustion Theory*, Addison-Wesley Publishing Company, Canada, 1985.