

KAJIAN TEORITIK PEMBAKARAN ARANG KAYU PINUS

Danang Dwi Saputro¹⁾, Purnomo²⁾, Harwin Saptoadi²⁾, Tri Agung Rohmat²⁾, Budhijanto³⁾

¹⁾ Staf Jurusan Teknik Mesin FT-Universitas Negeri Semarang

Mahasiswa Program S-3 Pada Jurusan Teknik Mesin dan Industri Universitas Gadjah Mada

Email: dwis_05@yahoo.com

²⁾ Staf Jurusan Teknik Mesin dan Industri FT-Universitas Gadjah Mada

³⁾ Staf Jurusan Teknik Kimia FT-Universitas Gadjah Mada

Abstrak

Saat ini pemanfaatan bahan bakar padat sudah jauh berbeda dan mengalami banyak perubahan, pembakaran adalah metode utama untuk mengubah bahan bakar padat menjadi energi. Hasil kajian menunjukkan bahwa proses pembakaran bahan bakar dapat didekati dengan *Shrinking Core Model* (SCM), dimana dalam pemodelan ini reaksi terjadi dari bagian luar permukaan partikel dan zona reaksi bergerak secara radial menuju inti partikel setelah mengubah partikel yang beraksi menjadi abu. Hasil kajian menunjukkan bahwa nilai koefisien kinetik lebih kecil dibandingkan dengan koefisien perpindahan massa oksigen ke permukaan bahan bakar (k_{ch}). Pada pembakaran arang kayu Pinus terjadi penurunan massa yang lambat tetapi tidak tampak adanya proses pengeringan dan devolatilisasi. Pembakaran arang dengan kandungan abu 0% tampak bahwa arang terbakar habis, tetapi pada arang dengan kandungan 5%, 10% dan 20% menyisakan abu.

Key word : model, pembakaran, arang, pinus

1. Pendahuluan

Berdasarkan sejarahnya, sebenarnya manusia telah lama akrab dengan biomassa, baik yang bersumber dari alam maupun turunan biologisnya, hanya saja pemanfaatan biomasa sebagai sumber energi masih sangat sederhana. Pada zaman dahulu, khususnya sebelum manusia mahfum akan keberadaan potensi alam seperti batubara, minyak bumi dan gas didalam perut bumi, manusia purba telah memanfaatkan biomassa untuk kelangsungan hidup mereka. Contohnya, untuk memasak, mereka memanfaatkan kayu bakar sebagai sumber energinya.

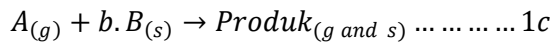
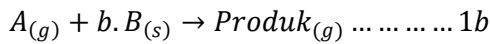
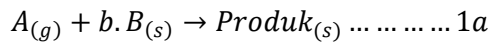
Penelitian mengenai pembakaran bahan bakar padat antara lain diteliti oleh Chin dan Siddiqui (2000), meneliti laju pembakaran briket yang terbuat dari sampah pengergajian kayu, sekam padi, kulit kacang tanah, serat kulit kelapa dan serat kulit kelapa sawit. Briket dibuat dengan metode piston-press dengan bahan perekat *starch* dan *molasse*. Briket yang dibuat diuji karakteristik pembakarannya. Peneliti menyimpulkan (1) laju pembakaran naik seiring dengan kenaikan *dwel time* dan prosentase perekat.

(2) briket dari limbah pengergajian kayu mempunyai sifat paling baik dibandingkan dengan bahan yang lain. Secara umum disimpulkan bahwa briket dari biomassa mempunyai potensi untuk dijadikan bahan bakar, tetapi setiap material mempunyai karakteristik optimum yang berbeda-beda. Sedangkan Rhen dkk(2007) meneliti tentang pengaruh komposisi bahan penyusun pellet biomassa dengan bahan baku kayu terhadap karakteristik pembakaran, menyatakan bahwa pembakaran pellet lebih dipengaruhi oleh komponen penyusun kayu dibandingkan terhadap densitas pellet. Himawanto dkk (2010) dalam penelitiannya tentang analisa thermogravimetri pembakaran *char* bambu mengungkapkan bahwa proses pirolisa mampu menaikkan nilai kalor *char* yang dihasilkan disamping itu akan menurunkan energi aktivasi *char* yang dihasilkan.

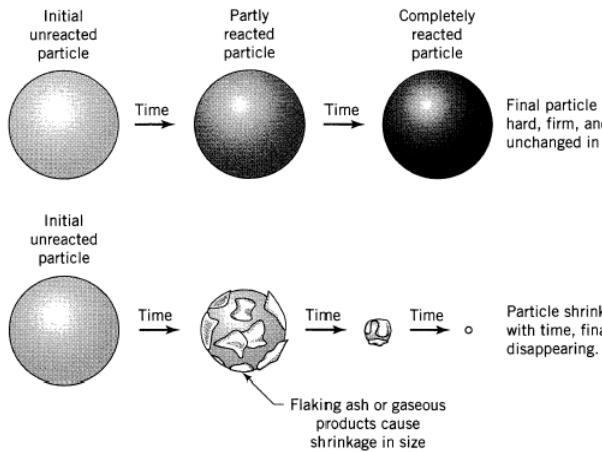
2. Model reaksi gas-padat

Pada bagian ini akan membahas tentang reaksi heterogen antara gas dengan padatan dan berubah menjadi padatan, reaksi dapat direpresentasikan sebagai berikut :

(c)

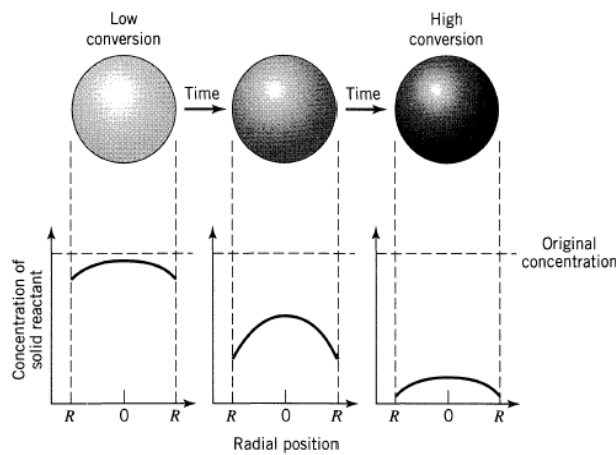


Partikel padat tidak akan mengalami perubahan ukuran partikel selama reaksi berlangsung apabila partikel mengandung



Gambar 1. Prilaku reaksi partikel padat (Sumber :Levenspiel 1999)

Untuk reaksi nonkatalitik partikel padat dengan gas, terdapat dua model sederhana yang bisa digunakan yaitu *Progressive Conversion Model* (PCM) dan *Shrinking Core Model* (SCM). *Progressive Conversion Model* terjadi pada suatu reaksi yang hasilnya berupa padatan, jika partikel yang bereaksi



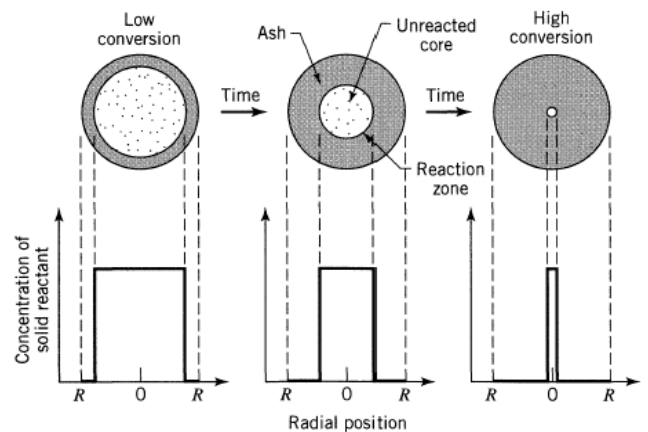
(a)
(b)

Gambar 2. Perbandingan *Progressive Conversion Model* (a) dan *Shrinking Core Model* (b) (Levenspiel 1999)

2.1. Shrinking Core Model untuk partikel berbentuk bola tanpa terjadi perubahan ukuran (*Constant Size Particles*)

Model ini diungkapkan oleh Yagi dan Kunii (1951 & 1961), mereka mengungkapkan bahwa mekanisme reaksi gas-padat menjadi lima tahapan :

- Difusi reaktan gas dari lingkungan ke permukaan partikel
- Penetrasi dan difusi reaktan melalui selimut abu ke permukaan yang belum bereaksi
- Reaksi reaktan dengan partikel yang belum bereaksi
- Difusi produk gas melewati/melalui abu kembali ke permukaan luar padatan
- Difusi produk gas ke lingkungan



$$\begin{aligned} dN_B &= b \cdot dN_A \\ -\frac{1}{A_p} \frac{dN_B}{dt} &= -\frac{1}{4\pi R^2} \frac{dN_B}{dt} = -\frac{b}{4\pi R^2} \frac{dN_A}{dt} \\ &= bk_g(C_{A,g} - C_{A,s}) \\ &= bk_g C_{A,g} \end{aligned}$$

Partikel B mempunyai densitas molar (ρ_B) dan mempunyai volume (V) tertentu, sehingga jumlah mol B dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut :

$$N_B = \rho_B V \left[\frac{\text{mol B}}{m^3} m^3 \right]$$

Penurunan volume atau radius inti partikel yang tidak bereaksi atas hilangnya mol reaktan dN_B adalah

$$\begin{aligned} -dN_B &= -b \cdot dN_A = -\rho_B d \frac{4}{3} \pi r_c^3 \\ &= -4\rho_B \pi r_c^2 dr_c \text{ [mol]} \end{aligned}$$

Laju reaksi penurunan radius inti yang tidak bereaksi dapat dicari dengan substitusi persamaan (5) ke dalam persamaan (3).

$$\begin{aligned} -\frac{1}{4\pi R^2} \frac{dN_B}{dt} &= -\frac{1}{4\pi R^2} \frac{4\rho_B \pi r_c^2 dr_c}{Ct} \\ &= -\frac{\rho_B r_c^2}{R^2} \frac{dr_c}{dt} = bk_g C_{A,g} \end{aligned}$$

Dimana k_g adalah koefisien perpindahan massa antara gas dengan partikel. Waktu yang dibutuhkan reaktan gas dari lingkungan ke permukaan partikel yang belum bereaksi dapat diketahui dengan mengintegrasikan persamaan 6.

$$\begin{aligned} -\frac{\rho_B r_c^2}{R^2} \frac{dr_c}{dt} &= bk_g C_{A,g} \\ t_{film} &= \frac{\rho_B R}{3bk_g C_{A,g}} \left[1 - \left(\frac{r_c}{R} \right)^3 \right] \end{aligned}$$

b. Difusi reaktan melalui selimut abu ke permukaan yang belum bereaksi

Gambar 5 menunjukkan resistensi untuk difusi melalui lapisan abu ke inti partikel yang belum bereaksi. Laju reaksi di setiap titik sama dengan laju difusi ke permukaan reaksi.

$$\begin{aligned} -\frac{dN_A}{dt} &= 4\pi r^2 Q_A = 4\pi r R^2 Q_{As} \\ &= 4\pi r_c^2 Q_c \quad (8) \end{aligned}$$

Fluks A di dalam lapisan abu dinyatakan dalam hukum Fick's

$$Q_A = D_e \frac{dC_A}{dr} \quad (9)$$

Dimana D_e adalah koefisien difusi efektif reaktan gas pada lapisan abu.

$$-\frac{dN_A}{dt} = 4\pi r^2 D_e \frac{dC_A}{dr}$$

$$-\frac{dN_A}{dt} \left[\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R} \right] = 4\pi D_e C_{A,g} \quad (10)$$

Persamaan diatas menggambarkan koefisien reaksi partikel pada setiap waktu, dengan substitusi persamaan 3 dan 10

$$\begin{aligned} -\frac{4\rho_B \pi r_c^2}{b} \frac{dr_c}{dt} \left[\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R} \right] \\ = 4\pi D_e C_{A,g} \quad (11) \end{aligned}$$

Dengan metode pemisahan variabel (5) persamaan 11 dan diintegrasikan pada kedua ruas akan dihasilkan waktu yang dibutuhkan reaktan melalui selimut abu ke permukaan partikel yang belum bereaksi.

$$\begin{aligned} -\rho_B \left[\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R} \right] r_c^2 dr_c &= b D_e C_{A,g} dt \quad (6) \\ t_{ash} &= \frac{\rho_B R^2}{6b D_e C_{A,g}} \left[1 - 3 \left(\frac{r_c}{R} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + 2 \left(\frac{r_c}{R} \right)^3 \right] \quad (12) \end{aligned}$$

c. Reaksi reaktan dengan partikel

Gradient konsentrasi sebuah partikel dalam reaksi dijelaskan dalam gambar 6, karena reaksi tidak dipengaruhi oleh kandungan abu yang ada dipermukaan partikel sehingga laju sebanding dengan permukaan inti yang belum bereaksi. Dengan demikian, berdasar (7) permukaan inti yang tidak bereaksi, maka laju reaksi sebagai berikut.

$$-\frac{1}{4\pi R^2} \frac{dN_B}{dt} = -\frac{b}{4\pi R^2} \frac{dN_A}{dt} = bk_f C_{A,g}$$

k_f (m/s) adalah konstanta reaksi orde satu. Penurunan radius inti partikel yang tidak bereaksi atas hilangnya mol reaktan dN_B adalah

$$\begin{aligned} -\frac{1}{4\pi r^2} \frac{dN_B}{dt} &= -\frac{1}{4\pi r^2} \frac{4\rho_B \pi r_c^2 dr_c}{dt} \\ &= -\rho_B \frac{dr_c}{dt} = bk_f C_{A,g} \end{aligned}$$

$$t_{Reaksi} = \frac{\rho_B}{bk_f C_{A,g}} (R - r_c)$$

Mekanisme reaksi yang terjadi pada *Shrinking Core Model* (partikel berbentuk bola tanpa terjadi perubahan ukuran) terjadi dalam tiga tahapan utama yaitu difusi reaktan gas dari lingkungan ke permukaan partikel, penetrasi dan difusi reaktan melalui selimut abu ke permukaan yang belum bereaksi dan reaksi

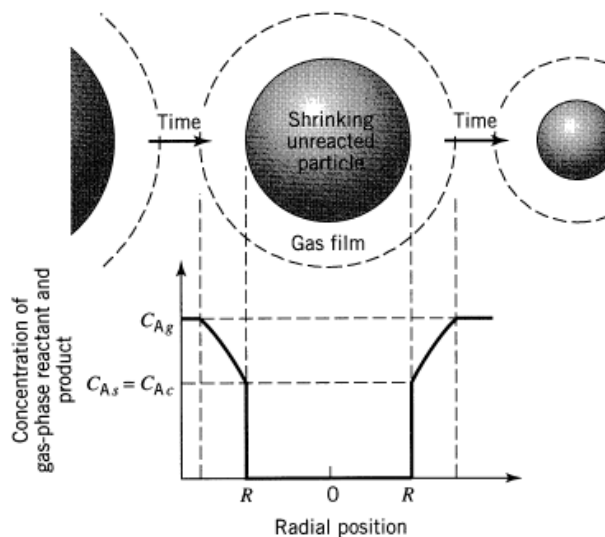
reaktan dengan partikel. Reaksi terjadi secara simultan dari permukaan abu menuju inti partikel yang belum bereaksi sehingga waktu yang dibutuhkan untuk reaksi total diasumsikan bahwa resistansi tunggal yang mengontrol seluruh reaksi partikel. Proses konversi dapat dianalogikan sebagai rangkaian seri, sehingga waktu total yang dibutuhkan adalah jumlah total dari t_{film} (pers. 7), t_{ash} (pers.12) dan t_{reaksi} (pers.15).

$$t_{total} = t_{Film} + t_{Ash} + t_{Reaksi} \quad (16)$$

2.2. Shrinking Core Model untuk partikel berbentuk bola dengan ukuran partikel menyusut (Shrinking Sphere)

Ketika tidak terbentuk abu selama reaksi, partikel menyusut sampai habis. Proses ini diilustrasikan dalam gambar 3, mekanisme reaksi terjadi dalam tiga tahap :

1. Difusi O_2 dari lingkungan ke permukaan partikel C
2. Reaksi dipermukaan antara O_2 dan C
3. Difusi produk reaksi dari permukaan partikel ke lingkungan.



Gambar 3. Representasi *Shrinking Core Model*. (Levenspiel 1999)

$$-\frac{1}{4\pi r^2} \frac{dN_B}{dt} = bk_f C_{A,g} \quad (17)$$

Dimana :

$$dN_B = \rho_B dV$$

$$dN_B = \rho_B d\frac{4}{3}\pi r^3$$

$$dN_B = \rho_B 4\pi r^2 dr$$

Sehingga persamaan 17 menjadi

$$-\frac{\rho_B 4\pi r^2 dr}{4\pi r^2} = bk_f C_{A,g} \tau$$

$$t = -\frac{\rho_B R}{bk_f C_{A,g}} \left[1 - \frac{R_0}{R} \right] \quad (18)$$

Dimana k_f merupakan koefisien efektif reaksi yang dipengaruhi oleh difusi oksigen ke permukaan bahan bakar dan temperatur di permukaan bahan bakar.

3. Pembahasan

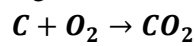
3.1. Proximate analysis kayu pinus

Hasil analisis proksimat kayu pinus menunjukkan kandungan karbon terikat 15,7%, volatile matter 73,6% dan kadar abu 11,3% (Parikh et al, 2005). Kadar karbon terikat (*Fixed Carbon*) dapat didefinisikan sebagai fraksi karbon dalam bahan bakar selain abu, air dan volatile matter. Kadar karbon mempunyai peranan penting untuk menentukan kualitas bahan bakar karena akan mempengaruhi besarnya nilai kalor. Semakin tinggi kandungan kadar karbon terikat dalam bahan bakar, semakin tinggi pula nilai kalor yang dihasilkan. Kandungan abu pada bahan bakar padat (0,5%-20%) lebih tinggi dibandingkan bahan bakar cair (0,03% – 0,07%), kadar abu erat hubungannya anorganik yang terdapat dalam bahan bakar. Abu terbentuk dari sisa pembakaran yang berbentuk partikel halus amorf dan abu tersebut merupakan bahan anorganik yang terbentuk dari perubahan bahan mineral (*mineral matter*) karena proses pembakaran. Kandungan abu bervariasi tergantung jenis bahan bakar, secara umum kandungan abu residu biomassa rendah. *Volatile matter* adalah zat yang teruapkan pada saat pembakaran, bahan bakar biomassa kandungan zat volatilnya berkisar antara 60-80% lebih tinggi dibandingkan bahan bakar fosil hanya mempunyai 20-30%. Komponen utama *volatile matter* tersusun atas CO , H_2 , CO_2 dan C_xH_y . Kandungan *volatile matter* tinggi

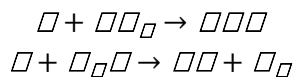
mempunyai beberapa keuntungan diantaranya, penyalaan dan pembakaran lebih mudah.

3.2. Model pembakaran arang kayu pinus

Dari persamaan pemodelan diatas dapat diduga bahwa proses pembakaran arang kayu pinus dapat didekati dengan *Shrinking Core Model*(SCM), dimana dalam pemodelan ini reaksi terjadi dari bagian luar permukaan partikel dan zona reaksi bergerak secara radial menuju inti partikel setelah mengubah partikel yang beraksi menjadi abu. Model SCM merupakan model yang realistis untuk digunakan dalam pemodelan pembakaran bahan bakar padat. Dari jenis pemodelan SCM, yang tepat digunakan dalam menganalisis pembakaran bahan bakar padat adalah *shrinking sphere*. Laju pembakaran arang (*char*). dirumuskan dalam istilah laju reaksi massa arang per satuan luas permukaan luar dan per satuan konsentrasi oksigen di luar lapis batas partikel. Sehingga reaksi global bisa diasumsikan sebagai berikut :



dimana permukaan karbon juga bereaksi dengan karbondioksida dan uap air dengan reaksi reduksi sebagai berikut :



Proses akhir dalam pembakaran bahan bakar padat adalah pembakaran arang. Setelah proses devolatilization selesai maka yang tertinggal adalah arang dan abu. Arang mempunyai porositas tinggi sehingga udara mampu masuk kedalam pori-pori tersebut. Laju pembakaran arang dipengaruhi oleh konsentrasi oksigen, temperatur udara, *Reynolds Number*, ukuran serta porositas arang.

Proses pembakaran arang kayu pinus dapat didekati dengan persamaan 17, dengan asumsi bahwa arang berbentuk bola dengan diameter 2,5 cm, massa awal 6 gr, tidak ada kandungan abu dalam arang, kecepatan udara pembakaran 10 m/s, pembakaran pada temperature 240 °C dan kanduang air dalam arang 0 %. Secara umum laju pembakaran dapat didekati dengan persamaan 17:

$$-\frac{1}{4r^2} \frac{dC_{O_2}}{dt} = \frac{dC_{O_2}}{dt}$$

$$\frac{dC_{O_2}}{dt} = -4r^2 \frac{dC_{O_2}}{dt} \cdot (C_{O_2} - C_{O_2,s})$$

$$r \cdot (C_{O_2} - C_{O_2,s}) = \frac{dC_{O_2}}{dt} \cdot r$$

$$r = \frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{h}}$$

$$\frac{r \cdot r}{r_{2,2}} = rh = r \cdot r \cdot r \cdot r \cdot r^{\frac{1}{3}}$$

$$r = \frac{r}{r} \quad (19)$$

$$r = \frac{r}{r_{2,2}}$$

Kecepatan udara pembakaran (u) sebesar 10 m/s dan diameter arang 0.025 m sehingga *Reynolds Number* mencapai $2,1 \times 10^5$, karena *Reynolds Number* lebih kecil dari 5×10^5 alairan yang terjadi di sekitar arang adalah laminar dan *Schmidt Number* sebesar 0,8025, sehingga persamaan 24 menjadi sebagai berikut:

$$(20)$$

$$\frac{r \cdot r}{r_{2,2}} = rh = r \cdot r \cdot r \quad (21)$$

dari persamaan (25) koefisien transfer massa oksigen sebesar 0,07109 m/s. Dengan Persamaan (26) (Borman, 1998), koefisien kinetik reaksi sebesar $0,4796 \times 10^{-3} \text{ m/s}$.

$$r_{O_2}(C/O) = \left[\frac{r_{O_2} \cdot r \cdot \hat{V}}{r_{O_2}} \right]$$

dimana $k_p = 20,4 \times 10^{-2} \text{ (g/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm)}$; $T_C = 240 \text{ (}^\circ\text{C)}$; $\hat{V} = 8,31497 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K}$; $r_{O_2} = 18 \text{ g/mol}$

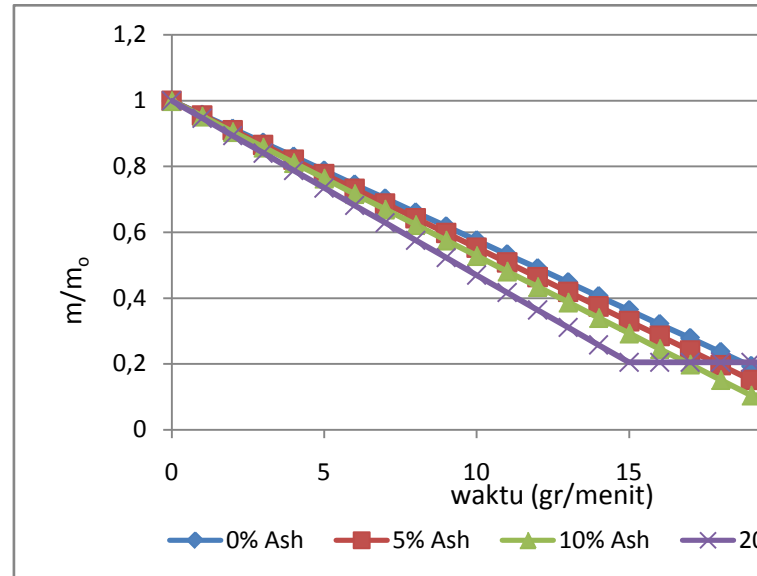
Berdasarkan persamaan (23), koefisien reaksi total sebesar 0.071 m/s, sehingga tampak bahwa koefisien reaksi total (r_{O_2}) mempunyai peranan penting dalam pembakaran arang, dimana r_{O_2} dipengaruhi oleh koefisien perpindahan massa oksigen dari lingkungan ke

permukaan partikel ($\frac{1}{r}$) dan koefisien kinetik (k_c). Apabila nilai $\frac{1}{r}$ lebih besar dibandingkan dengan k_c disebut *diffusion controlled combustion*, atau sebaliknya apabila nilai k_c lebih besar dibandingkan dengan $\frac{1}{r}$ maka proses pembakaran disebut *kinetic controlled combustion*. Nilai yang dihasilkan pada kajian ini tampak bahwa nilai koefisien kinetik lebih besar dibandingkan dengan koefisien perpindahan massa oksigen ke permukaan bahan bakar ($\frac{1}{r} > k_c$), sehingga dalam reaksi ini dikendalikan oleh difusi oksigen ke permukaan bahan bakar (*kinetic controlled combustion*). Berdasarkan persamaan 22, laju aliran massa ($\frac{dm}{dt}$) selama reaksi pembakaran berlangsung sebagai berikut,

$$\frac{dm}{dt} = -4\pi r^2 \rho_p D_p (C_{O_2} - C_{O_2,s})$$

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{12}{16} 4\pi r^2 \rho_p D_p (C_{O_2} - C_{O_2,s})$$

laju aliran massa yang terjadi selama reaksi sebesar $4,2423 \times 10^{-3}$ g/s. Pada gambar 8, disajikan grafik hasil kajian teoritik pembakaran arang kayu Pinus, tampak dalam grafik dalam pembakaran arang dengan kandungan abu 0% terjadi penurunan massa yang lambat. Sesuai dengan teori pembakaran bahan bakar padat bahwa pembakaran bahan bakar padat dibagi menjadi tiga tahapan yang terjadi secara berurutan (Nussbaumer, 2003). Tahap pertama adalah proses pemanasan dan pengeringan yang ditandai dengan penurunan massa yang lambat, tahap kedua adalah devolatilisasi yaitu proses degradasi termal sehingga pecahnya ikatan kimia secara termal dan zat terbang (*volatile matter*) akan keluar dari partikel yang ditandai dengan penurunan massa yang cepat.



Gambar 4. Perubahan massa yang terjadi pada pembakaran arang kayu Pinus

Tahapan selanjutnya adalah pembakaran arang yang ditandai dengan penurunan massa yang lambat. Hasil analisis pada kajian ini tidak tampak adanya proses pengeringan dan devolatilisasi, karena dengan asumsi bahwa kandungan air adalah 0% sehingga proses pengeringan bahan bakar tidak terjadi. Proses devolatilisasi juga tidak tampak, karena arang merupakan hasil akhir dari proses devolatilisasi atau dengan kata lain arang tidak mengandung zat volatile, sehingga tidak terjadi proses degradasi termal yang mengakibatkan pecahnya ikatan kimia dalam arang. Pembakaran arang dengan kandungan abu 0% tampak bahwa arang terbakar habis (ditandai dalam grafik, tidak ada garis yang horizontal).

Gambar 8 disajikan pula hasil kajian teoritik pembakaran arang dengan kandungan abu 5%, 10% dan 20%. Dalam grafik tampak bahwa terjadi penurunan massa yang lambat dan diakhir proses pembakaran tampak tidak terjadi penurunan massa sampai proses pembakaran selesai. Hal ini terjadi karena bahan bakar tersebut mengandung abu. Abu merupakan bahan anorganik yang terdapat dalam bahan bakar dan mempunyai sifat tidak mampu bakar (*non combustible matter*) sehingga menyisakan sejumlah massa abu diakhir pembakaran. Abu yang terkandung

dalam bahan bakar mempunyai titik leleh yang rendah, berakibat meninggalkan kotoran pada permukaan tungku, korosi dan menurunkan konduktifitas termal sehingga menurunkan kualitas pembakaran. Secara umum tampak bahwa pembakaran arang dengan kandungan abu 5%, 10% dan 20%, tidak melalui tahapan pengeringan dan devolatilisasi hal ini terjadi karena kandungan air 0% dan bahan bakar berupa arang.

4. Kesimpulan

Hasil kajian menunjukkan bahwa proses pembakaran bahan bakar dapat didekati dengan *Shrinking Core Model*(SCM), dimana dalam pemodelan ini reaksi terjadi dari bagian luar permukaan partikel dan zona reaksi bergerak secara radial menuju inti partikel setelah mengubah partikel yang beraksi menjadi abu. Hasilkan kajian menunjukkan bahwa nilai koefisien kinetik lebih kecil dibandingkan dengan koefisien perpindahan massa oksigen ke permukaan bahan bakar ($\frac{D}{r}k_{ch}$), sehingga dalam reaksi ini dikendalikan oleh temperatur permukaan bahan bakar (*kinetic controlled combustion*). Pada pembakaran arang kayu Pinus terjadi penurunan massa yang lambat tetapi tidak tampak adanya proses pengeringan dan devolatilisasi, karena dengan asumsi bahwa kandungan air adalah 0% sehingga proses pengeringan bahan bakar tidak terjadi. Proses devolatilisasi juga tidak tampak, karena arang merupakan hasil akhir dari proses devolatilisasi atau dengan kata lain arang tidak mengandung zat volatile, sehingga tidak terjadi proses degradasi termal yang mengakibatkan pecahnya ikatan kimia dalam arang. Pembakaran arang dengan kandungan abu 0% tampak bahwa arang terbakar habis, tetapi pada arang dengan kandungan 5%, 10% dan 20%. menyisakan abu.

Referensi :

- Borman G.L., Reiland K.W., 1998, *Combustion Engineering*, McGraw-Hill.
- Chengel Y.A., Boles Y.A., *Thermodynamics an Engineering Approach Fifth Edition*, McGraw-Hill
- Chin O.C., Siddiqui K. M., 2000, *Particle Density Determination of Pellets and Briquettes*, Biomass and Bioenergi. 18, pp. 223-228
- Cussler E.L., 2007, *Diffusion Mass Transfer in Fluid Systems-Third Edition*, Cambridge University Press
- Himawanto D.A., Indarto, Saptoadi H., Rochmat T.A., Pratama R. S., 2010, Analisis thermogravimetry Pembakaran Briket Char Bambu, *Jurnal Teknik Mesin-ITS*.
- Levenspiel O., 1999, *Chemical Reaction Engineering Third Edition*, John Willey & Son.
- Miller B., Tillman D. A., 2008, *Combustion Engineering Issues for Solid Fuel System*, Academic Press.
- Nussbaumer T, 2003, *Combustion and Co-combustion of Biomass:Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction*, *Energi& Fuels*, 17, pp. 1510-1521
- Parikh J, Channiwala S.A., Ghosal G.K., 2005, A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels, *Fuel*, 84, pp. 487-494.
- Rhen C., Gref R. Sjoström M., Wasterlund I., 2005, *Effect Raw Material, Moisture Content, Densification Pressure and Temperatur on Some Properties of Norway Spruce Pellets*, *Fuel Processing Technology*, 87, pp. 11-16.
- Turns S.R., 2000, *An Introduction to Combustion*, McGraw-Hill, Second Edition.
- Werther J., Saenger M., Hartgea E.U., Ogada T., Siagi Z., 2000, *Combustion of Agricultural Residues*, *Progress in*

Energy and Combustion Science, 26 ,
pp. 1–27