

Modifikasi Mekanisme Koufopanos pada Kinetika Reaksi Pirolisis Ampas Tebu (*Bagasse*)

Emi Erawati^{1*}, Wahyudi Budi Sediawan², Panut Mulyono²

¹Teknik Kimia-UMS Jl. A. Yani Tromol Pos I Pabelan Kartasura, Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia

²Teknik Kimia, UGM, Jl. Grafika, Yogyakarta, Indonesia

Abstract

Bagasse is a side product of sugar cane extraction. A sugar factory produces bagasse of about 13% of the total cane milled. According to the data from BPPS (1999-2007), the total bagasse produced is about two million tons. In the present work, bagasse from sugar factory was pyrolyzed and the reaction kinetics was studied.

Pyrolysis was carried out in a reactor made of steel pipe type 5737 with a dimension of 7.62 cm dia and 37 cm long. The reactor was inserted into a furnace with a diameter of 15.24 cm and a length of 40 cm. One hundred and fifty grams of bagasse was added into the reactor in the absence of oxygen at atmospheric pressure. Pyrolysis was carried out with a variation of particle sizes of (-20+25) mesh, (-25+30) mesh, (-30+35) mesh, (-35+40) mesh and -40 mesh and at different heating rate with the use of heating voltage setting of 100, 105, 115, and 120 volt.

Modified Koufopanos mechanism proposed in the present work consisted of four reaction steps, namely the reaction to produce intermediate product and further reactions in which intermediate product was converted into gas, bio-oil, and char product. Simulation results showed that the model was suitable to approach experimental data. However, model improvement to consider intra-particle heat and mass transport was necessary.

Keywords: activation energy, *bagasse*, Koufopanos mechanism, pyrolysis, kinetics.

Abstrak

Ampas tebu merupakan produk samping dari ekstraksi gula. Ampas tebu yang dihasilkan di pabrik gula sekitar 13% dari tebu yang digiling. Menurut data BPPS (1999-2007), terdapat dua juta ton ampas hasil penggilingan tebu. Pada penelitian, ampas tebu dipirolisis dan kinetika reaksi yang terjadi dipelajari.

Pirolisis dilakukan dalam suatu reaktor yang terbuat dari pipa besi jenis 5737 dengan diameter 7,62 cm dan panjang 37 cm. Reaktor ini dimasukkan ke dalam *furnace* yang berdiameter 15,24 cm dan panjang 40 cm. Seratus lima puluh gram ampas tebu dimasukkan ke dalam reaktor tanpa oksigen pada tekanan atmosferis. Pirolisis dilakukan pada berbagai ukuran bahan, yakni: (-20+25),(-25+30),(-30+35),(-35+40) -40 mesh dan laju pemanasan yang divariasikan pada tegangan listrik pemanasan 100, 105, 115, dan 120 volt.

Modifikasi mekanisme Koufopanos yang diajukan pada penelitian ini terdiri dari empat tahap reaksi, yaitu: bahan baku bereaksi menjadi *intermediate* dan *intermediate* bereaksi menjadi gas, cair, dan padatan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model yang diajukan cukup baik digunakan untuk mendekati data percobaan. Namun, perbaikan model perlu dilakukan dengan mempertimbangkan gradien suhu dan konsentrasi di dalam padatan.

Kata kunci: energi aktivasi, ampas tebu, mekanisme Koufopanos, pirolisis, kinetik.

Pendahuluan

Tanaman tebu (*Saccharum officinarum L.*) merupakan bahan baku industri gula. Proses pembuatan gula dimulai di stasiun penggilingan, yaitu proses ekstraksi dengan cara pengambilan nira sebanyak-banyaknya dalam tebu. Batang tebu dicacah menjadi bagian-bagian kecil, kemudian diperah pada unit gilingan beberapa kali. Cacahan tebu selanjutnya melewati *elevator* untuk memisahkan nira dan ampas. Ampas hasil

gilingan biasanya merupakan ampas kering yang digunakan sebagai bahan bakar ketel uap (Istianah, 1999). Ampas tebu yang dihasilkan di pabrik gula sekitar 13% dari tebu yang digiling. Potensi ampas tebu di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 1.

Berdasarkan ketersediaan bahan baku ampas tebu yang melimpah tersebut, peneliti tertarik untuk melakukan penelitian tentang pirolisis ampas tebu, terutama tinjauan kinetiknya.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari kinetika reaksi pirolisis ampas tebu (*bagasse*). Dalam hal ini diajukan suatu model matematis

* Alamat korespondensi: emisupriyono@gmail.com

berdasarkan mekanisme Koufopoulos yang dimodifikasi.

Tabel 1. Potensi Ampas Tebu Indonesia

No.	Tahun	Tebu (ton/tahun)	Ampas Tebu (ton/tahun)
1.	1999	2.187.200	284.336
2.	1998	1.928.700	250.731
3.	1999	1.801.400	234.182
4.	2000	1.780.100	231.413
5.	2001	1.824.600	237.198
6.	2002	1.901.300	247.169
7.	2003	1.991.600	258.908
8.	2004	2.051.600	266.708
9.	2005	2.241.700	291.421
10.	2006	2.266.800	294.684
11.	2007	2.297.000	298.610

(Badan Pusat Statistik, 1999-2007)

Tinjauan Pustaka

Basu (2010) dan Blasi (1998) mengatakan bahwa model kinetika reaksi pirolisis selulosa dapat diklasifikasikan menjadi tiga tipe: *one-step global single reaction*, *one stage multiple reactions*, dan *two-stage semi-global model*. Dengan menggunakan mekanisme *one-step global reaction*, yield dari produk hanya bisa diprediksi berdasarkan kondisi reaksi dengan mengasumsikan ratio bahan-bahan *volatile* dan *bio-char* tetap. Pada *multi-reaction model*, beberapa reaksi digunakan untuk mengkorelasikan antara data percobaan, tetapi model kinetika ini tidak berlaku secara umum. Menurut Blasi (1998, 2000) *two stage semi-global* merupakan mekanisme kinetika reaksi dengan menggunakan hasil reaksi utama dan reaksi samping dengan hasil pirolisis dikelompokkan menjadi tiga, yaitu *tar*, *gas*, dan *bio-char*.

Ada beberapa mekanisme yang dapat digunakan untuk menentukan kinetika reaksi pada pirolisis ampas tebu. Guo dan Lua (2001) mengatakan bahwa model sederhana untuk menggambarkan dekomposisi biomassa adalah *one-step global model*. Menurut Basu (2010) persamaan reaksi untuk model ini seperti ditunjukkan pada persamaan (1).



Kecepatan pirolisis tergantung pada massa biomassa yang belum terpirolisis. Kecepatan dekomposisi dari biomassa dinyatakan dengan persamaan (2).

$$\frac{dm_B}{dt} = -k(m_B - m_C) \quad (2)$$

Frakasi massa dari biomassa dinyatakan dengan persamaan

$$x = \frac{(m_0 - m_B)}{(m_0 - m_C)} \quad (3)$$

Substitusi persamaan (2) ke persamaan (3) akan menghasilkan persamaan (4).

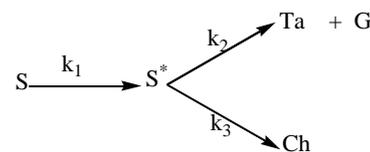
$$\frac{dx}{dt} = k(1 - x) \quad (4)$$

$$\int_{x=0}^{x=X} \frac{dx}{1-x} = \int_{t=0}^{t=t} k dt \quad (5)$$

Penyelesaian persamaan (5) akan menghasilkan persamaan (6).

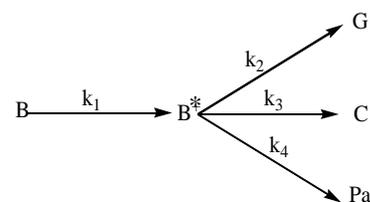
$$-\ln(1-x) = kt \quad (6)$$

Model reaksi lainnya, *semi-global pyrolysis mechanism* telah dikembangkan oleh Koufopoulos (1989) pada dekomposisi kayu dan biomassa. Mekanisme reaksi Koufopoulos dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Mekanisme Reaksi Koufopoulos

Dalam penelitian ini digunakan mekanisme reaksi yang merupakan modifikasi dari mekanisme Koufopoulos (1989), seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Modifikasi Mekanisme Reaksi Koufopoulos

Di mana dalam penelitian ini pada awal reaksi $B = 150$ gram, $B^* = C = 0$.

Menurut Koufopoulos (1989) *residual weight* (padatan sisa) dinyatakan dengan Persamaan 7.

$$M = B + B^* + Pa \quad (7)$$

Pada percobaan, data massa C diukur setiap 10 menit, sedangkan data massa G dihitung dengan menggunakan Persamaan 8.

$$G = \left(\frac{PV}{RT}\right) BM_{rata-rata} \quad (8)$$

$$BM_{rata-rata} = \frac{[\% \text{ volume CO} \times BM \text{ CO}] + [\% \text{ volume CO}_2 \times BM \text{ CO}_2] + \% \text{ volume HC} \times BM \text{ HC}}{(\% \text{ volume CO} + \% \text{ volume CO}_2 + \% \text{ volume HC})} \quad (9)$$

P diukur dengan manometer terbuka, V diukur dengan banyaknya volume air yang dikeluarkan dari galon, T diukur dengan termokopel. Komposisi gas diukur dengan *exhaust gas analyzer*. BM (berat molekul) rata-rata gas dihitung dengan Persamaan 9. Persamaan 10 digunakan untuk menghitung M.

$$M = B - (C + G) \quad (10)$$

Persamaan matematis untuk masing-masing komponen dinyatakan dengan persamaan (11), (12), (13), (14), (15), dan (16).

$$\frac{dB}{dt} = -k_1 B \quad (11)$$

$$\frac{dB^*}{dt} = k_1 B - (k_2 + k_3 + k_4) B^* \quad (12)$$

$$\frac{dG}{dt} = k_2 B^* \quad (13)$$

$$\frac{dC}{dt} = k_3 B^* \quad (14)$$

$$\frac{dPa}{dt} = k_4 B^* \quad (15)$$

$$\frac{dM}{dt} = \frac{dB}{dt} + \frac{dB^*}{dt} + \frac{dPa}{dt} \quad (16)$$

Persamaan Arrhenius digunakan untuk menghitung konstanta kecepatan reaksi, seperti pada Persamaan (17).

$$k_i = A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \quad (17)$$

Metode Penelitian

Bahan Penelitian

Ampas tebu yang digunakan diambil dari Pabrik Gula (PG) Mojopanggung, Tulungagung, Jawa Timur. Ampas tebu yang digunakan dalam penelitian telah diuji di Laboratorium Kimia dan Biokimia, Pusat Studi Pangan dan Gizi, Universitas Gadjah Mada.

Alat Penelitian

Reaktor yang digunakan terbuat dari pipa besi jenis 5737 dengan diameter 7,62 cm dan panjang 37 cm. Reaktor dimasukkan ke dalam *furnace* yang berdiameter 15,24 cm dan panjang 40 cm. Bagian luar *furnace* ditutup dengan isolator nikelin sepanjang 12 meter. Suhu di dalam reaktor diukur dengan termokopel. Kecepatan pemanasan dalam reaktor diukur dengan

regulator 25 Ampere yang dihubungkan dengan arus listrik. Hasil cairan yang keluar dari reaktor didinginkan dengan kondensor pipa lurus. Hasil cair ditampung dalam penampung *bio-oil*. Gas yang tidak terkondensasi dimasukkan ke dalam 2 galon yang berisi air masing-masing berukuran 19 liter. Gas yang keluar diukur suhunya dengan termokopel, sedangkan tekanannya diukur dengan manometer terbuka. Volume air yang didesak gas yang dihasilkan ditampung dalam gelas ukur yang berukuran 2000 mL dan 3000 mL.

Variabel Penelitian

Penelitian dilakukan dengan memvariasikan diameter partikel (d_p) dan laju pemanasan pada tegangan listrik pemanasan yang berbeda.

- Variasi diameter partikel, yaitu: -20+25, -25+30, -30+35, -35+40, dan -40 mesh. Pada variasi percobaan ini, digunakan kecepatan pemanasan konstan sebesar 110 volt.
- Tegangan listrik pemanasan, yaitu: 100, 105, 110, dan 120 volt. Pada variasi percobaan ini, diameter partikel yang digunakan sebesar -25+30 mesh.

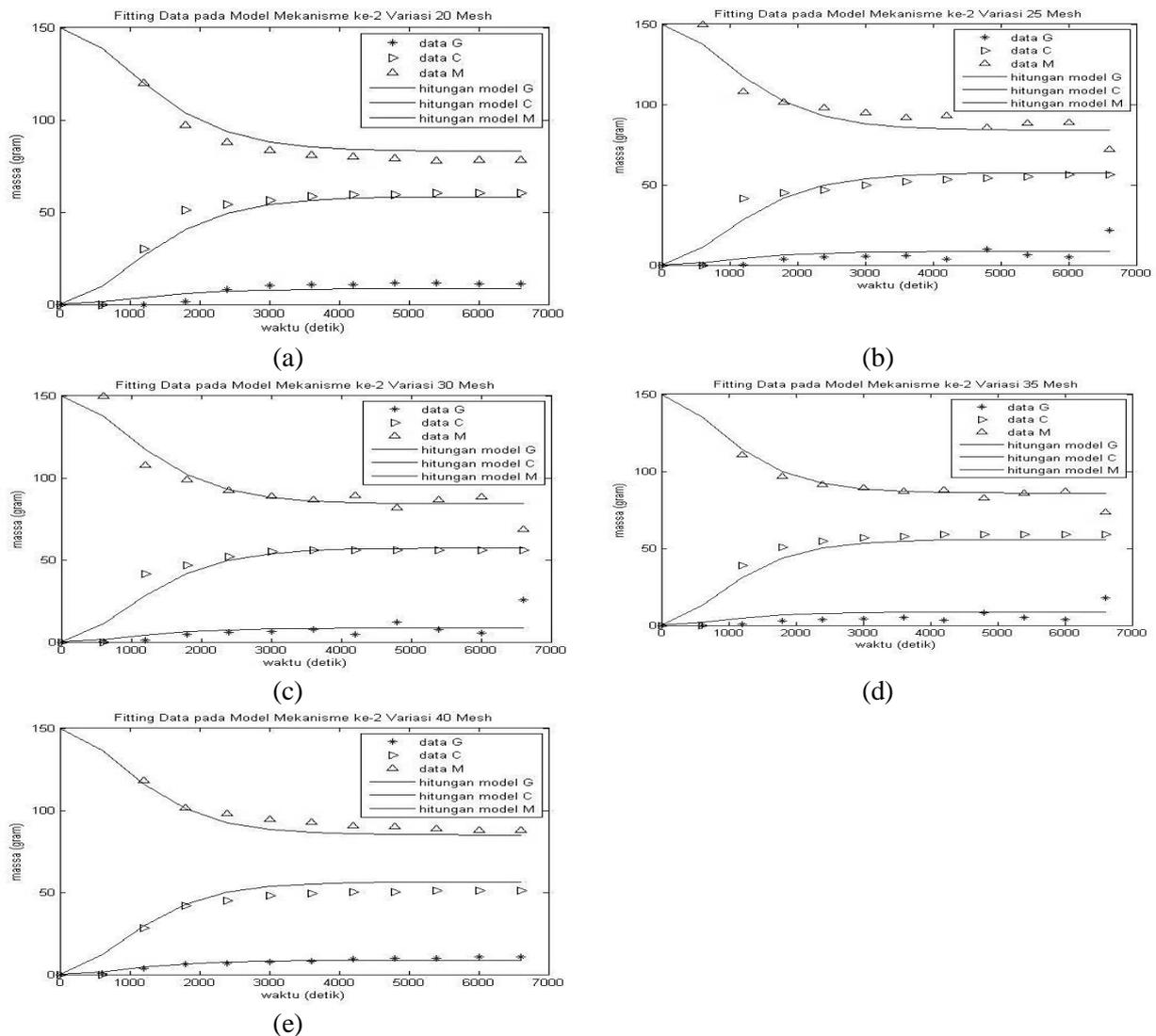
Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini mekanisme Koufopanos dimodifikasi dimana bahan baku berubah menjadi bahan *intermediate* yang kemudian berubah menjadi produk cairan (C), gas (G), dan padatan (Pa). Gambar 3 menunjukkan profil massa gas, cairan dan residu padat yang terbentuk pada tegangan pemanas 110 volt untuk diameter partikel yang berbeda. Seperti terlihat pada gambar, kenaikan massa cairan yang terbentuk sepanjang waktu pirolisis disertai dengan kenaikan massa gas. Sementara itu, massa residu padat yang ada semakin kecil. Hal ini terjadi sampai tercapainya massa yang relatif tetap terhadap waktu. Namun, terlihat bahwa ukuran butir padatan tidak mempunyai pengaruh yang cukup berarti terhadap laju pembentukan produk.

Pada penelitian ini data perubahan massa sepanjang waktu pirolisis digunakan untuk memverifikasi model matematis yang diajukan. Tetap dalam model yang tidak diketahui nilainya dicari dengan metoda *trial and error*

Tabel 2. Parameter Kinetika Modifikasi Mekanisme Koufopanos

Variasi Penelitian	Modifikasi Mekanisme Koufopanos								
	E ₁ (J/mol)	E ₂ (J/mol)	E ₃ (J/mol)	E ₄ (J/mol)	A ₁ (detik)	A ₂ (detik)	A ₃ (detik)	A ₄ (detik)	SSE
Diameter Partikel	5.000,48	2.200,70	1.110,97	3.200,99	5,33x10 ⁻³	1,30x10 ⁻⁴	6,78x10 ⁻⁴	1,62x10 ⁻³	4.981,70
Tegangan listrik Pemanasan	12.500,48	2.500,70	21.060,97	10.050,99	1,71x10 ⁻²	4,24x10 ⁻²	3,33x10 ¹	4,62	6.172,41

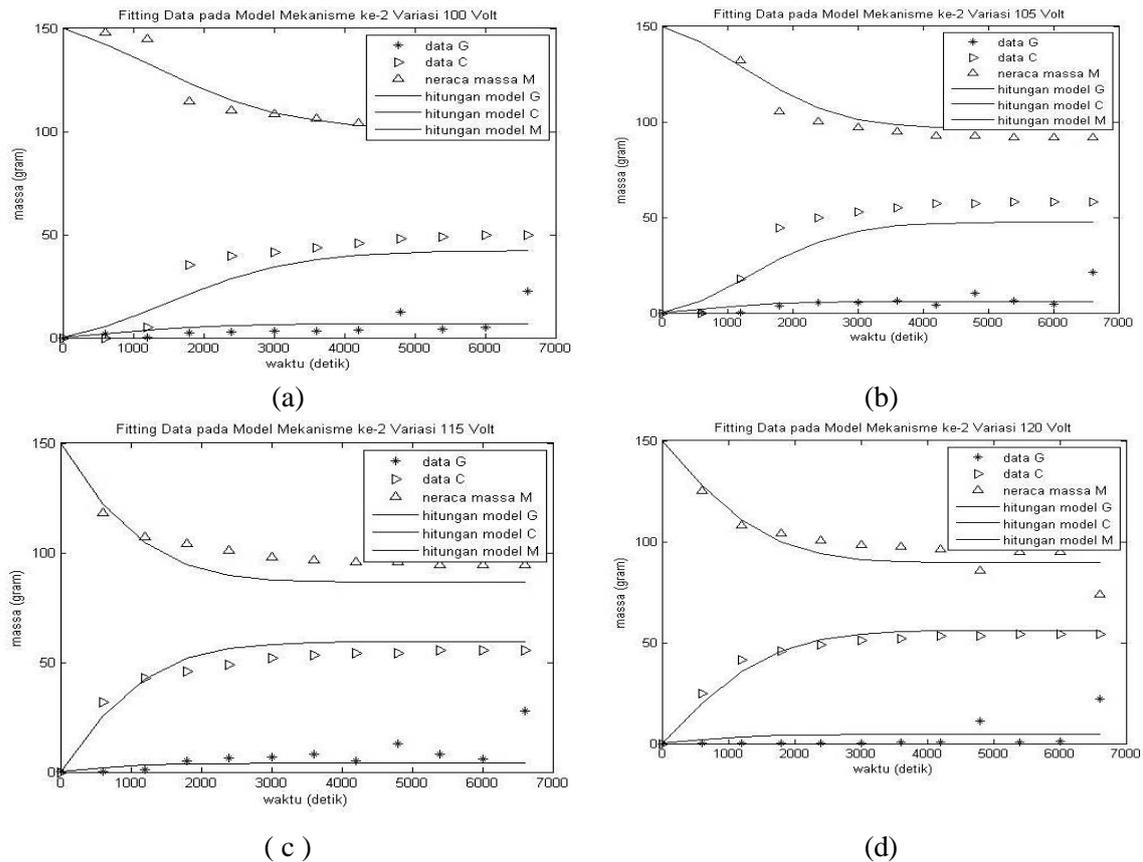


Gambar 3. Perubahan Massa terhadap Waktu pada 110 volt Modifikasi Mekanisme Koufopanos (a) Diameter Partikel (-20+25) mesh, (b) Diameter Partikel (-25+30) mesh, (c) Diameter Partikel (-30+35) mesh, (d) Diameter Partikel (-35+40) mesh, dan (e) Diameter Partikel -40 mesh

untuk memperoleh nilai *sum of squares of errors* (SSE) antara data percobaan dan hasil hitungan yang terkecil. Seperti terlihat pada Gambar 3, hasil perhitungan cukup dekat dengan data percobaan.

Gambar 4 menunjukkan profil massa bahan selama proses pirolisis pada laju pemanasan yang berbeda untuk ukuran partikel yang sama (-25 +30) mesh. Untuk setiap laju pemanasan, perubahan massa gas, cairan dan residu padat

selama proses pirolisis memiliki kecenderungan yang mirip dengan perubahan massa saat pirolisis dengan ukuran partikel yang berbeda. Namun, seperti terlihat pada gambar hasil perhitungan berdasarkan model mekanisme Koufopanos yang dimodifikasi tidak sebaik hasil perhitungan untuk variasi ukuran partikel. Untuk perhitungan dengan variasi laju pemanasan, deviasi hasil perhitungan tampak lebih besar.



Gambar 4. Perubahan Massa terhadap Waktu pada (-25+30) mesh Modifikasi Mekanisme Koufopanos (a) Kecepatan Pemanasan 100 volt, (b) Kecepatan Pemanasan 105 volt, (c) Kecepatan Pemanasan 115 volt, dan (d) Kecepatan Pemanasan 120 volt

Tetapan energi aktivasi dan faktor pre-eksponensial setiap tahapan reaksi hasil hitungan untuk kedua jenis variasi yang ditinjau dapat dilihat pada Tabel 2. Pada beberapa tahapan reaksi, nilai energi aktivasi dan faktor pre-eksponensial memiliki nilai yang cukup berbeda antara hasil perhitungan dengan variasi ukuran partikel dan variasi laju pemanasan.

Model matematis yang diajukan dalam penelitian ini mengabaikan faktor tahanan transfer massa dan transfer panas di butiran padatan. Model ini akan baik digunakan bila gradien suhu dan konsentrasi di dalam butir padatan tidak cukup besar. Asumsi ini dapat dipenuhi bila ukuran partikel cukup kecil dan laju pemanasan setimbang dengan kebutuhan panas untuk reaksi. Sehingga untuk ukuran padatan yang sama, laju pemanasan akan sangat mempengaruhi kesesuaian antara data percobaan dan hasil perhitungan menggunakan model yang diajukan. Oleh karena itu, model kinetika hasil modifikasi mekanisme Koufopanos yang diajukan dalam penelitian ini akan lebih baik bila dilengkapi dengan model intra-partikel untuk transfer panas dan massa.

Kesimpulan

Pada penelitian ini, kinetika pirolisis ampas tebu dipelajari dengan memodifikasi mekanisme Koufopanos yang terdiri dari empat tahap reaksi yaitu reaksi bahan baku menjadi bahan *intermediate* dan dilanjutkan dengan reaksi bahan *intermediate* menjadi produk gas, cair, dan padatan. Model matematis yang diajukan cukup baik digunakan untuk mendekati data percobaan. Namun, hasil perhitungan menunjukkan bahwa tahanan transfer massa dan panas dalam partikel padatan memiliki pengaruh yang cukup berarti. Model intra-partikel perlu dipertimbangkan untuk melengkapi model kinetika yang diajukan pada penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Badan Pusat Statistik, 1999-2007. Statistik Indonesia 1999-2007 Jakarta.
- Basu, P., 2010. Biomassa Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory. Elsevier,
- Blasi, C. D., 1998. Comparison of Semi-Global Mechanisms for Primary Pyrolysis of Lignocellulosic Fuels, *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 47, 43-64.
- Blasi, C. D., 2000. Modelling The Fast Pyrolysis of Cellulosic Particles in Fluid-Bed Reactors, *Chemical Engineering Science* 55, 5999-6013.
- Guo, J., Lua, A.C., 2001. Kinetic Study on Pyrolytic Process of Oil-palm Solid Waste Using Two-Step Consecutive Reaction Model, *Biomass and Bioenergy* 20, 223-233.
- Istianah, 1999. Laporan Kerja Praktek di Pabrik Gula Sragi Pekalongan, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta.
- Koufopoulos, C.A., Maschio, G., Lucchesi, A., 1989. Kinetic Modelling of the Pyrolysis of Biomass and Biomass Components, *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 67, 75-84.