

Received: 27-06-2022

Accepted: 29-06-2022

Published: 30-06-2022

Kinetika Reaksi Gasifikasi Arang Batubara Bituminus dengan Gas CO₂

Saripah sobah

Program Studi Teknik Kimia, Sekolah Tinggi Teknologi Industri Bontang
Jl Brigjend Katamso No. 40, Bontang
Email: sobahbtg@gmail.com

Abstract

This study aims to obtain kinetic data on the gasification reaction of bituminous coal from East Kalimantan using CO₂. The research was conducted under atmospheric conditions using a fixed bed reactor in a temperature range of 700°C - 900°C. Coal with a size of 4 - 5.6 mm is pyrolyzed at a temperature of 700°C for 90 minutes with a heating rate of 20°C/minute. Coal charcoal from pyrolysis weighing 10 grams was then gasified at a constant heating rate of 20°C/min at 700°C, 750°C, 800°C, 850°C and 900°C. The variables studied were reaction temperature and time. The reaction kinetics of coal charcoal gasification with CO₂ gas can be approximated by the shrinking unreacted core model. value of k with activation energy parameters and frequency factor of 61.73 kJ/mol and 1.37/minute.

Keywords: gasification, coal, carbon dioxide, shrinking unreacted core.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan data kinetika reaksi gasifikasi arang batubara bituminus yang berasal dari Kalimantan Timur menggunakan gas CO₂. Penelitian dilakukan pada kondisi atmosferik menggunakan reaktor *fixed bed* pada rentang suhu 700°C – 900°C. Batubara dengan ukuran 4 - 5,6 mm dipirolisis pada suhu 700°C selama 90 menit dengan laju pemanasan 20°C/menit. Arang batubara hasil pirolisis seberat 10 gram selanjutnya digasifikasi dengan laju pemanasan tetap yaitu 20°C/menit pada suhu 700°C, 750°C, 800°C, 850°C dan 900°C. Variabel yang dipelajari adalah suhu reaksi dan waktu. Kinetika reaksi gasifikasi arang batubara dengan gas CO₂ dapat didekati dengan model *shrinking unreacted core*. nilai *k* dengan parameter energi aktivasi dan faktor frekuensi sebesar 61,73 kJ/mol dan 1,37/menit.

Kata kunci: gasifikasi, batubara, karbondioksida, *shrinking unreacted core*.

Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara produsen batubara di dunia dengan sumber daya dan cadangan yang tersebar hampir diseluruh wilayah. Cadangan dan sumber daya Batubara Indonesia per tahun 2019 adalah sebesar 186,6 miliar Ton [1]. Jumlah produksi batubara Indonesia meningkat 7,2% pada tahun 2021 yaitu 606,22 juta ton. Pada tahun 2020 produksi sebesar 565,69 juta ton. Realisasi kewajiban penjualan batubara di dalam negeri atau *domestic market obligation* (DMO) hingga akhir Desember 2021 mencapai 63,57 juta ton, hanya sebesar 10% dari total produksi [2]

Meskipun jumlah sumber maupun cadangan batubara di Indonesia cukup besar akan tetapi pemanfaatannya masih terbatas. Salah satu proses pemanfaatan batubara adalah melalui proses gasifikasi. Gasifikasi batubara dapat dilakukan dengan medium udara, *steam*, H₂, CO₂, atau campuran dari medium-medium tersebut. Gasifikasi dengan medium gas CO₂ menghasilkan gas sintesis terutama gas CO yang dapat digunakan sebagai bahan baku industri petrokimia. Biasanya, 1 kg batubara bituminus dapat diubah menjadi 1,5 -1,7 m³ *syngas*. Rantai produk industri kimia batubara bisa sangat luas. Industri kimia batubara tradisional meliputi produksi amonia, kokas dan kalsium karbida. Pertumbuhan industri kimia

batubara dengan sistem gasifier modern di Cina cukup signifikan seperti untuk produksi pupuk, hidrogen, pengganti petrokimia seperti etilen glikol, olefin dan SNG [1].

Gas CO₂ merupakan salah satu gas rumah kaca yang memiliki kontribusi terhadap pemanasan global. Indonesia telah menyatakan komitmennya pada Conference of Parties (COP) 15 tahun 2009 untuk menurunkan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) sebesar 26% (dengan usaha sendiri) dan sebesar 41% (jika mendapat bantuan internasional) pada tahun 2020. Komitmen Indonesia tersebut diperkuat melalui dokumen Nationally Determined Contribution (NDC) Republik Indonesia yang pertama pada bulan November 2016 dengan ditetapkannya rget unconditional sebesar 29% dan target conditional sampai dengan 41% dibandingkan skenario business as usual (BAU) di tahun 2030. Secara nasional, target penurunan emisi pada tahun 2030 berdasarkan NDC adalah sebesar 834 juta ton CO₂e pada target unconditional (CM1) dan sebesar 1,081 juta ton CO₂e pada target conditional (CM2)[3].

Emisi gas CO₂ dapat dikurangi dengan mengkonversi gas tersebut menjadi gas CO melalui proses gasifikasi batubara. Gasifikasi batubara merupakan teknologi yang bersih karena tidak menghasilkan gas SO_x dan NO_x. Keuntungan yang diperoleh dari proses gasifikasi tersebut adalah mengurangi jumlah gas CO₂ yang dibuang ke atmosfer, meningkatkan nilai ekonomis dari CO₂ dan batubara, dan menjadi alternatif untuk memenuhi kebutuhan gas sintesis sebagai bahan baku industri petrokimia[4]

Penelitian-penelitian mengenai kinetika reaksi gasifikasi batubara telah banyak dilakukan namun penelitian mengenai gasifikasi batubara bituminus dari Kalimantan Timur dengan gas CO₂ dengan diawali proses pirolisis belum banyak dilakukan. Studi kinetik yang untuk menentukan beberapa parameter kinetik yang menggambarkan perilaku sampel arang selama gasifikasi isothermal bertekanan telah dilakukan oleh Tomaszewicz dkk. Penelitian tentang gasifikasi batubara Jenina dengan medium CO₂ tersebut menggunakan pendekatan model persamaan yaitu volumetric (VM), the modified volumetric (MVM), the grain (GM), the random pore (RPM), dan model Langmuir. Hasil yang diperoleh untuk VM dan LH dianggap tidak memuaskan, tetapi hasil dari GM, RPM dan MVM secara signifikan lebih baik, terutama untuk dua model terakhir. Ditetapkan bahwa untuk Arang batubara Janina perilaku reaktivitasnya sangat baik [5]. Pengaruh luas permukaan, struktur pori, derajat gasifikasi, dan jumlah gugus fungsi karbon pada kinetika gasifikasi arang batubara pada reaktor mini telah diteliti oleh Efendi dan Sofaety[6]. Liu dkk juga telah melakukan penelitian kinetika gasifikasi batubara dengan CO₂ dan karakteristik Struktural dari arang batubara yang dipirolisis pada Suhu Tinggi. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa model RPM tidak dapat sepenuhnya menggambarkan gasifikasi CO₂ dari batubara karena kandungan abu yang tinggi sangat mempengaruhi struktur arang selama pirolisis dan gasifikasi [7]. Penelitian tentang Kinetika reaksi gasifikasi arang batubara dengan gas CO₂ pada tekanan tinggi juga telah dilakukan oleh Liu dkk dan hasil penelitian menunjukkan bahwa laju gasifikasi mengalami peningkatan yang awalnya lambat ketika konversi karbon di bawah 0,6, kemudian meningkat pesat ketika konversi karbon antara 0,6 dan 0,9 dan terakhir menurun ketika konversi karbon di atas 0,9 sesuai dengan efisiensi konversi karbon. Kavand dkk telah melakukan penelitian gasifikasi batubara dengan menggunakan 5 model persamaan dan menemukan bahwa model RPM adalah model yang paling sesuai [8]. Dampak Pembatasan Perpindahan Panas, Laju Reaksi, dan Kinetika gasifikasi batubara dengan CO₂ juga telah dieliti oleh Czajka [9]

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan data potensi konversi batubara bituminus menjadi gas CO dan mendapatkan data kinetika reaksinya. Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah diperolehnya data kinetika reaksi dan kondisi proses gasifikasi arang batubara bituminus.

Tinjauan Teori

Gasifikasi batubara dengan medium gas CO₂ menghasilkan produk utama berupa gas CO. Reaksi utama yang terjadi adalah reaksi Boudouard. Reaksi Boudouard adalah reaksi yang sangat endotermis sehingga tanpa katalisator reaksi ini berlangsung sangat lambat pada suhu di bawah 1000 K [10].

Reaksi Boudouard :



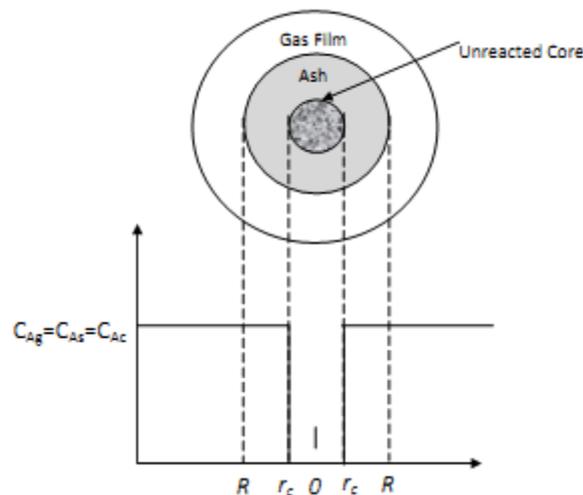
Reaksi heterogen antara gas dan padatan selalu melibatkan proses transfer massa (difusi) dan proses kimia. Efek difusi pada penelitian ini diminimalkan dengan melakukan reaksi pada suhu relatif rendah (700 °C -900 °C). Menurut Kim dkk, pada suhu rendah (kurang dari 1050 °C) laju gasifikasi dikontrol oleh reaksi kimia, pada suhu tinggi (di atas 1050 °C) laju gasifikasi dikontrol oleh difusi melalui pori [11].

Asumsi yang digunakan untuk menentukan model reaksi yang digunakan adalah :

1. Partikel batubara berbentuk bola
2. Reaksi gas CO₂ dan batubara hanya terjadi dipermukaan batubara
3. Reaksi yang terjadi hanya reaksi antara karbon dari batubara dan gas CO₂
4. Konsentrasi gas CO₂ di aliran gas sama dengan konsentrasi gas di lapisan film, di lapisan abu, dan dipermukaan batubara
5. Reaksi keseluruhan dikontrol oleh reaksi kimia dipermukaan.
6. Sistem *unsteady state*
7. Sistem isothermal

Berdasarkan kondisi operasi dan asumsi-asumsi yang digunakan, maka model kinetika reaksi gasifikasi arang batubara bituminus pada penelitian ini dapat didekati dengan model *shrinking unreacted core*.

Jika persamaan reaksi batubara dengan gas CO₂ adalah $CO_{2(g)} + C_{(s)} \rightarrow 2CO_{(g)}$, representasi reaksi tersebut dapat dijelaskan seperti pada Gambar 2 [12].



Gambar 2. Representasi reaksi $CO_{2(g)} + C_{(s)} \rightarrow 2CO_{(g)}$ jika reaksi kimia yang mengontrol

Data yang diperoleh dari analisis dengan menggunakan GC adalah data kadar gas CO, CO₂, H₂, dan CH₄ dalam % volume atau % mol gas yang digunakan untuk menghitung laju pembentukan gas CO. Laju pembentukan gas CO digunakan untuk menghitung konversi karbon sehingga dapat disajikan grafik konversi versus waktu.

$$x = \frac{W_o - W}{W_o} \tag{2}$$

$$x = \frac{1/2^{n_{CO}}}{W_o} \tag{3}$$

Metode Penelitian

Bahan Penelitian

Bahan penelitian yang digunakan dalam penelitian adalah batubara Bituminus yang berasal dari Kalimantan Timur, gas CO₂ 99%, dan Gas Nitrogen teknis 95%. Hasil Analisis Ultimat batubara dan arang hasil pirolisis disajikan pada Tabel 1

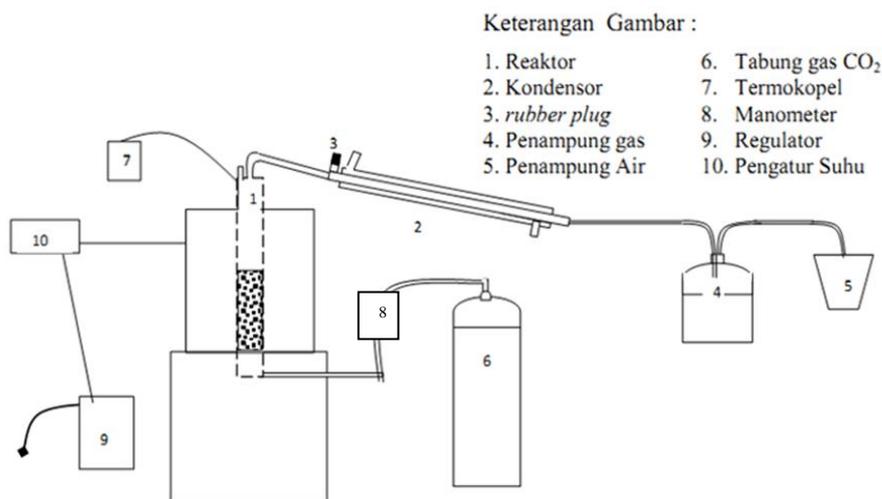
Tabel 1. Hasil Analisis Ultimat Batubara Bituminus Hasil Pirolisis
 (T= 700°C , t= 90 menit, q= 20°C/menit,)

Tanda Contoh	Abu %, adb	Karbon %, adb	Hidrogen %, adb	Nitrogen %, adb	Belerang Total %, adb	Oksigen %, adb
Bahan Baku	5,76	63,63	5,52	1,50	1,06	22,53
Hasil pirolisis	13,03	80,93	1,73	1,70	1,16	1,45
Metode:	ASTM D.5373	ASTM D.5373	ASTM D.5373	ASTM D.5373	ASTM D.4239	ASTM D. 3176

Ket: Adb = air dried basis [4]

Alat Penelitian

Alat gasifikasi terdiri dari reaktor *fixed bed* yang terbuat dari bahan kuarsa dengan ukuran: panjang 41,5 cm, diameter dalam 3,81 cm, diameter luar 3,97 cm, Pendingin (condenser) dengan ukuran panjang 34 cm, penampung gas dengan ukuran 19 L, tabung gas CO₂, *termocouple*, dan pengatur suhu yang dirangkai seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian Alat Gasifikasi

Prosedur Penelitian

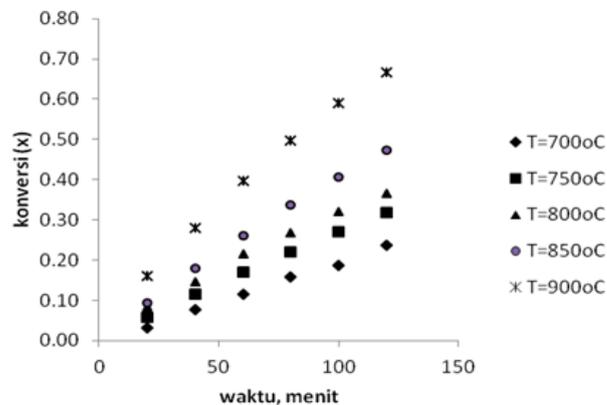
Batubara dengan ukuran 4 - 5,6 mm sebanyak 100 gram dipirolisis pada suhu 700°C selama 90 menit dengan laju pemanasan 20°C/menit. Proses pirolisis diawali dengan pembilasan menggunakan gas nitrogen selama 30 menit. Arang batubara hasil pirolisis seberat 10 gram digasifikasi selama 120 menit dengan laju pemanasan 20°C/menit. Proses ini dimulai dengan pembilasan menggunakan gas Nitrogen selama 20 menit. Setelah suhu yang diinginkan tercapai, gas CO₂ dialirkan dengan kecepatan 544 ml/menit. Pengambilan sampel gas dilakukan setiap 20 menit selama 120 menit. Gas yang dihasilkan ditampung di dalam penampung gas dan volumenya dicatat. Volume gas yang dihasilkan dihitung dengan cara menghitung volume air yang keluar dari penampung gas.

Pengambilan sampel gas keluar reaktor dilakukan untuk menganalisis kadar CO, CO₂, H₂, dan CH₄ dengan menggunakan alat Kromatografi Gas. Analisis terhadap arang sisa juga dilakukan untuk mengetahui berapa besar pengurangan berat arang setelah digasifikasi.

Hasil dan Pembahasan

Pengaruh Suhu

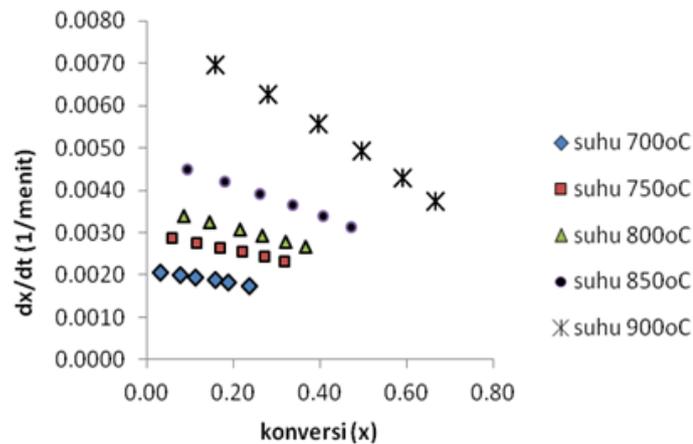
Pengaruh suhu terhadap konversi disajikan pada Gambar 3. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa konversi semakin besar dengan kenaikan suhu. Hal tersebut terjadi karena kenaikan suhu akan menyebabkan energi kinetik molekul-molekul zat pereaksi meningkat sehingga semakin banyak molekul-molekul yang energinya melampaui energi pengaktifan reaksinya.



Gambar 3. Hubungan Konversi dan Waktu pada Berbagai Suhu

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu semakin besar konversi yang dapat dicapai. Pada suhu 900°C konversi meningkat lebih tajam jika dibandingkan dengan suhu dibawahnya. Hal ini menunjukkan bahwa pada kisaran suhu 700°C sampai 900°C, laju reaksi keseluruhan dikontrol oleh reaksi kimia. Menurut Wu dkk, gasifikasi pada temperatur di bawah 1100°C meningkat dengan meningkatnya temperatur dan laju reaksi hampir tidak berubah dengan naiknya temperatur pada suhu diatas 1100°C[12]. Hasil penelitian Kim dkk, tentang pengaruh suhu mulai dari 1050°C hingga 1350° C pada konversi karbon selama gasifikasi menunjukkan bahwa ketika suhu gasifikasi meningkat, waktu gasifikasi yang dibutuhkan untuk konversi karbon berkurang. Menurut mereka pada 1350°C waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan konversi adalah setengah dari waktu konversi pada suhu 1050°C[11].

Pengaruh suhu terhadap laju reaksi disajikan pada Gambar 4. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kenaikan suhu menyebabkan kenaikan laju reaksi. Laju reaksi pada suhu 900°C cukup tinggi di awal reaksi kemudian turun dengan tajam. Menurut Wu dkk, penurunan laju reaksi yang lebih tajam pada suhu tinggi kemungkinan disebabkan karena pori-pori yang terbentuk akibat gasifikasi semakin banyak dengan naiknya suhu sehingga luas permukaan kontak bertambah, akan tetapi efek tersebut segera diikuti dengan meleburnya pori yang telah terbentuk di sekitarnya [13].



Gambar 4. Hubungan antara Laju Reaksi dan Konversi pada Berbagai Suhu

Pengaruh Waktu

Waktu gasifikasi mempunyai pengaruh terhadap konversi yang dicapai. Semakin lama waktu gasifikasi, konversi yang dihasilkan semakin besar akan tetapi laju reaksi semakin berkurang. Hal ini disebabkan karena seiring dengan waktu jumlah reaktan berkurang dan luas permukaan reaktan yang bereaksi semakin kecil sehingga jumlah reaktan yang bereaksi juga semakin semakin berkurang. Penurunan laju reaksi juga disebabkan oleh perubahan struktur batubara dan pengurangan jumlah situs aktif pada permukaan karbon.

Menurut Kodama dkk, pada kondisi konversi yang tinggi atau waktu reaksi yang lama, laju reaksi dapat berubah karena perubahan jumlah situs aktif pada permukaan karbon, struktur pori, dan kristalisasi karbon [14]. Menurut Feng dan Bathia, pada arang batubara bituminus dari Bolga dan Bayswater, luas permukaan dan volume pori-pori mula-mula bertambah dengan meningkatnya konversi kemudian turun pada konversi yang lebih tinggi. Hal tersebut berbeda dengan arang batubara dari jenis semi antrasit (Yarrabee) yang tidak banyak mengalami peningkatan jumlah pori dengan peningkatan temperatur. Artinya peningkatan jumlah pori-pori selama gasifikasi berbeda untuk jenis batubara yang berbeda [15].

Pengaruh waktu terhadap konversi dan laju reaksi dapat dilihat sebagaimana yang disajikan pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Kinetika Reaksi

Data yang diperoleh dianalisis berdasarkan model *shrinking unreacted core*. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Kim dkk, pada gasifikasi arang batubara menunjukkan bahwa model *shrinking unreacted core* lebih sesuai untuk ukuran partikel yang besar dan model MVM (*Modified volumetric model*) lebih sesuai untuk ukuran partikel yang lebih kecil [11]. Asumsi yang digunakan pada model *shrinking un-reacted core* menganggap partikel arang batubara

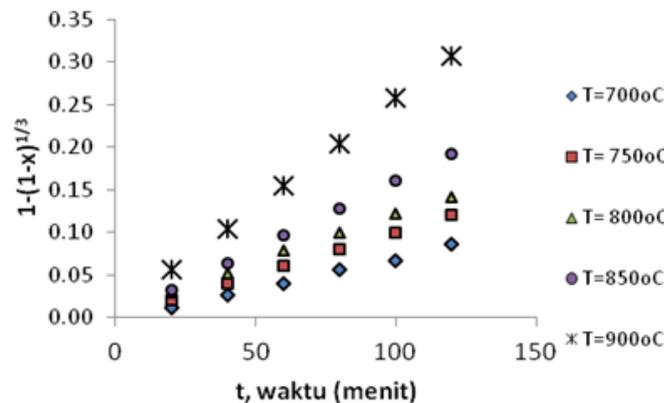
yang bereaksi merupakan butiran bulat. Reaksi antara arang batubara dengan reaktan gas terjadi pada permukaan eksternal dan berlanjut selangkah demi selangkah ke bagian dalam (interior). Reaksi yang terjadi menghasilkan lapisan abu (*ash layer*) pada bagian luarnya. Pada saat yang sama terbentuk inti yang tidak bereaksi. Selama reaksi berlangsung inti yang belum bereaksi ukurannya berkurang setiap saat. Model ini tidak mempertimbangkan perubahan struktural fisik selama reaksi gasifikasi[13].

Persamaan laju reaksi dengan menggunakan model *shrinking unreacted core* adalah sebagai berikut [10]:

$$\frac{dx}{dt} = 3k(1-x)^{2/3} \tag{4}$$

$$x = 1 - (1-kt)^3 \tag{5}$$

Nilai k dari persamaan 5 dilukiskan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hubungan antara $1-(1-x)^{1/3}$ dan t

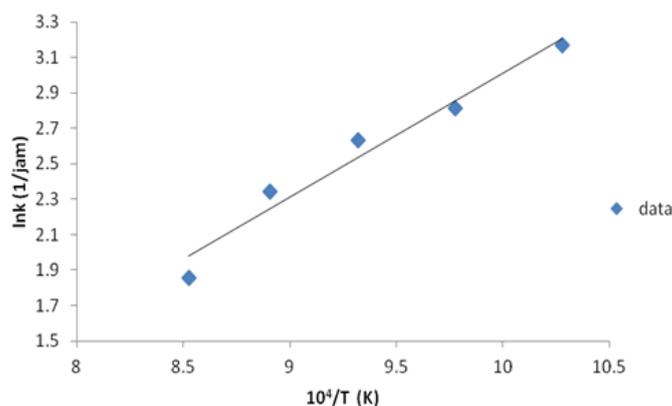
Nilai k yang diperoleh disajikan pada Tabel 2. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada rentang suhu 700°C-900°C nilai k semakin besar dengan bertambahnya suhu. Nilai SEE dengan model *shrinking unreacted core* cukup kecil, sehingga dapat disimpulkan model *shrinking core* sesuai untuk proses ini.

Tabel 2. Nilai k pada Berbagai Suhu

(m_{ao} =10 gram, d_p =3,5-5 mesh, Q_{CO_2} =544 ml/L, q = 20°C/menit)

Suhu (°C)	Model <i>Shrinking unreacted core</i>		
	k data (1/menit)	k hitung (1/menit)	SSE
700	0,0007	0,0006	$1,33 \times 10^{-9}$
750	0,0010	0,0096	$1,40 \times 10^{-9}$
800	0,0012	0,0013	$2,28 \times 10^{-8}$
850	0,0016	0,0018	$5,78 \times 10^{-8}$
900	0,0026	0,0024	$2,65 \times 10^{-9}$

Hubungan linear antara $-\ln k$ dan $1/T$ untk disajikan pada Gambar 6 berikut:



Gambar 6. Hubungan $-\ln k$ dan $1/T$

Nilai energi aktivasi (E) dan faktor frekuensi (A) pada gasifikasi diperoleh 61,7315 kJ/mol dan 1,37/menit. Jika dibandingkan dengan hasil beberapa penelitian sebelumnya, maka nilai E pada penelitian ini cukup kecil akan tetapi masih berada dalam rentang nilai E yang ada yaitu 22.5 kJ/mol sampai dengan 270 kJ/mol. Nilai A yang diperoleh pada penelitian ini lebih kecil dibandingkan dengan penelitian yang pernah dilakukan yaitu antara 11,67/menit sampai $9,23 \times 10^{10}$ /menit. Hal ini disebabkan karena ukuran butir, laju alir gas CO_2 dan jenis reaktor yang digunakan berbeda. Jenis reaktor yang digunakan pada penelitian ini adalah reaktor *fixed bed* sedangkan pada penelitian lain yang nilai faktor frekuensinya lebih besar [11] digunakan reaktor *fluidized bed*. Luas permukaan kontak pada reaktor *fluidized bed* lebih besar jika dibandingkan dengan reaktor *fixed bed*.

Kesimpulan

Model *shrinking unreacted core* dapat digunakan untuk menggambarkan model kinetika reaksi gasifikasi batubara bituminus yang berasal dari Kalimantan Timur dengan gas CO_2 . Tetapan reaksi dapat didekati dengan persamaan Arrhenius dengan nilai energi aktivasi dan faktor frekuensi adalah 61,7315 kJ/mol dan 1,37/menit.

Referensi

- [1] Afin, A.P., Kiono, B.F.T. 2021. Potensi Energi Batubara serta Pemanfaatan dan Teknologinya di Indonesia Tahun 2020 –2050 : Gasifikasi Batubara. Jurnal Energi Baru dan Terbarukan Volume 2.
- [2] <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/cadangan-batubara-masih-3884-miliar-ton-teknologi-bersih-pengelolaannya-terus-didorong>. Diakses tanggal 28 Mei 2022
- [3] <http://ditjenppi.menlhk.go.id/berita-ppi/3150-kontribusi-penurunan-emisi-grk-nasional,-menuju-ndc-2030.html> Diakses tanggal 28 Mei 2022
- [4] Sobah, S., Sulistyono, H., Syamsiah, S. 2013. Pengolahan Gas CO_2 Hasil Samping Industri Amoniak Melalui Gasifikasi Batubara yang Telah dipirolisis dengan Menambahkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Jurnal Rekayasa Proses Vol.7
- [5] Tomaszewicz1, M., Tomaszewicz1 G., Sciazko, M. 2017. *Experimental study on kinetics of coal char– CO_2 reaction by means of pressurized thermogravimetric analysis*. Jurnal *Therm Anal Calorim*. 130:2315–2330.

- [6] Efendi, M.A.A., Sofaeti, Y. 2016. Analisis Kinetika Reaksi Gasifikasi Batubara pada Reaktor Gasifikasi Mini. *Jurnal Indonesian Mining* Volume 19.
- [7] Liu L, Kong, B., Yang, J., Liu, Q., Liu, X., 2020. *CO₂ Gasification Kinetics and Structural Characteristics of Tri-High Coal Char Prepared at Elevated Temperature*. *Jurnal ACS Omega* Volume 5.
- [8] Kavand, M., Mollaabbasi, R., Ziegler, D., Larachi, F., Picard, D., Alamdari, H. 2021. *Reaction–Diffusion Model for Gasification of a Shrinking Single Carbon-Anode Particle*. *Jurnal ACS Omega* Volume 6.
- [9] Czajka, K.M. 2021. *Gasification of Coal by CO₂: The Impact of the Heat Transfer Limitation on the Progress, Reaction Rate and Kinetics of the Process*. *Jurnal Energies* Volume 14.
- [10] Cortés, C. G., Tzimas, E., and Peteves, S. D. 2009. *Technologies for Coal Based Hydrogen and Electricity Co-production Power Plants with CO₂ Capture*, JRC Publication Repository.
- [11] Kim, Y. T., Seo, D. K., and Hwang, J. 2011. *Study of the Effect of Coal Type and Particle Size on Char -CO₂ Gasification via Gas Analysis*. *Jurnal Energy ACS Publications*.
- [12] Levenspiel, O. 1999. *Chemical Reaction Engineering*, Department of Chemical Engineering Oregon States University, 3rd Ed, John Wilwy & Sons, New York, Chichester Brisbane, Toronto, p. 572, 575-577
- [13] Wu, Y., Wu, S., and Gao, J. 2009. *A Study on the Applicability of Kinetic Models for Shenfu Coal Char Gasification with CO₂ at Elevated Temperatures*. *Jurnal Energies* Volume 2.
- [14] Kodama, T., Funatoh, A., Shimizu, K., and Kitayama, Y. 2001. *Kinetics of Metal Oxide-Catalyzed CO₂ Gasification of Coal in a Fluidized-Bed Reactor for Solar Thermochemical Process*. *Jurnal Energy and Fuel* volume 15.
- [15] Feng, B., & Bhatia, S. K. 2003. *Variation of the pore structure of coal chars during gasificatio*. *Jurnal Carbon* Volume 41.

Profil Penulis:



Saripah Sobah, Kelahiran Banjarmasin, 15 September 1975. Penulis merupakan staf pengajar Sekolah Tinggi Teknologi Industri Bontang dengan bidang keahlian Energi.
Email: sobahbtg@gmail.com