SIMULASI PENGERINGAN BATUBARA MUDA DENGAN METODE RANGKAIAN PORI PADA KONDISI ISOTHERMAL

Anton Irawan* dan Indar Kustiningsih

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik

Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Jalan Jendral Soedirman Km. 3 Cilegon Banten 42135

Email : anton@ft-untirta.ac.id

Abstrak

Indonesia merupakan negara yang memiliki cadangan batubara yang besar yang dapat digunakan sebagai sumber energi utama untuk industri, tetapi batubara yang dimiliki oleh Indonesia sebagian besar merupakan batubara muda yang memiliki kandungan energi yang rendah (< 4.800 kcal/kg) serta kandungan air yang tinggi ($> 25\%$). Kandungan air batubara yang tinggi menyulitkan dalam proses konversi batubara untuk dijadikan sebagai sumber energi utama seperti pada sistem tenaga. Kandungan air dalam batubara dapat dikurangi dengan pengeringan dengan mengamati data kinetika pengeringan berupa laju pengeringan. Laju pengeringan batubara dipengaruhi oleh beberapa variabel antara lain kecepatan fluida panas, temperatur fluida panas, ukuran partikel yang dikeringkan serta struktur pori-pori dari partikel yang dikeringkan. Beberapa sampel batubara muda dianalisis strukturnya untuk mendapatkan data distribusi pori. Ukuran pori yang digunakan terdiri atas 2 macam yaitu 40 dan 100 nm serta panjang pori 500 nm. Empat macam struktur pori disimulasikan dengan metode rangkaian pori. Dari simulasi rangkaian pori memperlihatkan bahwa ukuran pori yang besar akan memberikan waktu yang lebih lama untuk laju pengeringan tetap sedangkan struktur pori dengan ukuran pori kecil akan memberikan laju pengeringan tetap yang lebih pendek waktunya.

Kata Kunci: batubara, pengeringan, rangkaian pori, kandungan air, difusi uap

Abstract

Indonesia has large coal reserve with most of them are low rank coal. Low rank coal has low energy content ($< 4,800$ kcal/kg) and high moisture content ($> 25\%$). High moisture content of coal will make a problem for coal conversion processing to be a main energy source such as power plant so that the moisture of coal must be removed from inside of coal. The moisture content in the coal can be removed by drying based on drying kinetic (drying rate). Drying kinetic is influenced by several variables such as hot fluid velocity and temperature, size and pore structure of material. In this model, sample of low rank coal are analyzed to obtain the data of pore size distribution. The size of pore were used 40 and 100 nm, the pore length was 100 nm. Four different pore structures were simulated by pore network modelling. From pore network simulation, the structure with large pore had long time for drying constant period, but the structure with small pore had short time for drying constant period.

Keywords: coal, drying, pore network, moisture, vapour diffusion.

*korespondensi

1. Pendahuluan

Harga bahan bakar minyak (BBM) yang tinggi pada akhir-akhir ini mengakibatkan banyak industri beralih ke bahan bakar lain. Salah satu alternatif bahan bakar adalah batubara yang jumlahnya melimpah di Indonesia. Sebagian besar (60%) batubara yang ada di Indonesia berupa batubara muda (*low rank coal*) dengan kandungan air (*moisture content*) yang cukup tinggi. Kandungan air batubara muda Indonesia sekitar 25-40%. Dengan kandungan air yang tinggi maka batubara akan mudah lengket satu sama lain yang kemudian akan bergumpal saat batubara tersebut dialirkan bersama-sama. Gumpalan batubara menyulitkan dalam transportasi batubara khususnya saat batubara dialirkan di dalam pipa setelah batubara dihaluskan pada industri tenaga listrik (*power plant*). Selain itu batubara dengan kandungan air yang tinggi akan mengurangi kadar kalor saat dibakar dalam suatu tungku pembakaran. Batubara harus dikeringkan hingga kandungan air tertentu untuk mencegah masalah saat ditransportasikan atau proses selanjutnya.

Kondisi pengeringan dapat diketahui dari kinetika pengeringan yang diwakili oleh kurva laju pengeringan. Kinetika pengeringan batubara memperlihatkan perubahan massa batubara untuk tiap satuan waktu selama proses pengeringan. Hasil dari kinetika pengeringan adalah laju pengeringan dari batubara terhadap kandungan air dari batubara. Laju pengeringan dipengaruhi oleh faktor eksternal dan internal dari material. Bila udara sebagai media pemanas maka faktor eksternal adalah kecepatan udara, relative humidity dari udara, temperatur udara. Sedangkan faktor internal adalah struktur batubara yang berupa ukuran dan distribusi dari pori-pori dari batubara.

Tujuan penelitian ini adalah mengamati fenomena perpindahan massa dalam fasa cair dan gas dengan menggunakan suatu model simulasi yang memperlihatkan kinetika pengeringan batubara untuk berbagai struktur.

Dasar Teori

Pengeringan merupakan suatu proses penghilangan kandungan air dari dalam suatu padatan dengan metode penguapan air. Tujuan dari pengeringan adalah untuk meningkatkan kualitas padatan dan mempermudah penanganan produk untuk proses selanjutnya. Udara panas dengan

kandungan air yang rendah sering digunakan sebagai media untuk menguapkan air yang ada di dalam padatan melalui permukaan padatan. Air yang terdapat dalam padatan dapat bergerak ke atas permukaan padatan disebabkan oleh perbedaan konsentrasi dan tekanan parsial antara bagian dalam dari padatan dengan bagian luar dari padatan. Proses perpindahan yang terjadi selama pengeringan merupakan proses perpindahan simultan antara perpindahan massa dan panas yang dipengaruhi oleh temperatur, kelembaban relatif, kecepatan udara (faktor eksternal) serta besar dan distribusi dari pori-pori di dalam padatan (faktor internal).

Laju pengeringan merupakan suatu faktor penting untuk mengkarakterisasi fenomena pengeringan dalam skala makro. Pada kasus isothermal drying, laju pengeringan bergantung pada kompetisi antara gaya kapiler, gaya friksi dan laju penguapan. Gaya kapiler merupakan suatu gaya yang disebabkan oleh tegangan permukaan antara cairan dan gas yang membentuk suatu meniskus (Gambar 1).

Gambar 1. Gaya kapilar dari suatu air yang membentuk suatu meniskus.

Laju pengeringan dari suatu proses pengeringan dapat dibagi dalam dua tahap (Gambar 2) yaitu perioda laju pengeringan tetap (*constant drying rate*) dan perioda laju pengeringan menurun (*falling drying rate*). Laju pengeringan tetap dikendalikan oleh laju dari perpindahan massa dan panas dibagian luar dari padatan apabila permukaan padatan masih dalam kondisi saturated atau basah (Schlünder, 1988). Pada kondisi permukaan padatan masih basah (*wet condition*) maka laju penguapan uap air di permukaan padatan lebih kecil daripada laju penyedia air dari dalam padatan ke permukaan. Laju pengeringan konstan berakhir pada titik kandungan air kritis (*critical moisture content*, X_c). Kandungan air kritis terjadi bergantung pada laju pengeringan tetap, ketebalan dari padatan serta temperatur proses pengeringan.

Gambar 2. Kurva Pengeringan untuk material higroskopik.

Bila sebagian permukaan dari padatan mulai kering maka tekanan di permukaan yang kering merupakan tekanan parsial yang lebih kecil dari tekanan uap. Akibatnya laju pengeringan mulai menurun. Tetapi sebagian laju alir cairan dari dalam permukaan serta distribusi difusi uap di permukaan padatan masih memungkinkan memberikan laju pengeringan yang tinggi (Schlünder, 1988; Irawan dkk., 2005; Irawan, 2006). Pada laju pengeringan menurun, perpindahan panas dan massa dari bagian dalam padatan merupakan faktor pengendali karena suplai uap air ke permukaan mulai menurun akibat faktor tahanan vapour difusi.

Laju pengeringan dari suatu proses pengeringan sebagai parameter untuk mengetahui fenomena dan unjuk kerja proses pengeringan dapat diketahui dengan melakukan simulasi. Simulasi dengan menggunakan metode rangkaian pori (*pore network*) akan dapat memberikan informasi kondisi kandungan air untuk tiap-tiap pori dalam suatu media berpori (batubara). Metode rangkaian pori pertama kali digunakan oleh Fatt (1956) dengan memperlihatkan suatu percobaan koneksi antar tubing-tubing yang mewakili gaya kapiler. Tubing-tubing tersebut mempunyai ukuran diameter dan panjang tertentu yang terhubung dengan memberikan tekanan kapiler yang berbeda-beda. Tubing-tubing tersebut juga terhubung satu sama lain sebagai rangkaian pori-pori (*pore network*). Saat itu simulasi dengan metode *pore network* sulit dilakukan dengan keterbatasan sarana dan kemampuan komputasi karena metode rangkaian pori memerlukan sarana komputasi yang tinggi untuk perhitungan kondisi masing-masing pori. Simulasi pengeringan dengan metode rangkaian pori akan dapat memperlihatkan kondisi masing-masing pori sehingga hasil dari metode ini mendekati kondisi nyata dari proses pengeringan.

Metode rangkaian pori untuk pengeringan akhir-akhir ini berkembang semakin cepat dengan makin meningkatnya kemampuan sarana komputasi. Penelitian pengeringan dengan metode rangkaian pori meliputi aspek thermal gradient (Prat, 2002), viscous effect, film flows (Yiotis dkk., 2006), rangkaian pori 3D (Yiotis dkk., 2006; LeBray dan Prat, 1999), percobaan dengan mikro model (Segura dan Toledo, 2005).

2. Metodologi

Tahapan awal dari simulasi rangkaian pori adalah menyusun rangkaian pori dan tenggorokan dari data struktur batubara. Struktur tersebut meliputi diameter, panjang dan jumlah dari pori-pori dari media berpori yang akan disimulasikan. Simulasi ini dilakukan pada 2D rangkaian pori pada bentuk bujur sangkar dengan ukuran 51×51 pada kondisi isothermal. Tenggorokan sebagai penghubung antar pori mengandung air sedangkan pori hanya berupa titik pertemuan 4 buah tenggorokan.

Saat awal pengeringan, seluruh tenggorokan terisi oleh cairan air. Proses pengeringan dimulai dari bagian atas secara konveksi melalui lapisan batas. Ketebalan lapisan batas (ε) dipengaruhi oleh koefisien perpindahan massa (β) dan koefisien difusivitas uap (δ).

$$\varepsilon = \frac{\delta}{\beta} \quad (1)$$

Permukaan pori yang berkontak langsung dengan gas akan membentuk suatu meniskus. Semua pori yang mengandung meniskus akan mengalami proses penguapan

Gambar 3. Rangkaian pori dengan lapisan batas saat pengeringan (node untuk air = hitam, gas = putih dan gas pada kondisi kesetimbangan dengan warna abu-abu)

tetapi hanya tenggorokan yang memiliki meniskus terbesar yang akan berkurang kandungan air. Hal ini terjadi karena tenggorokan yang memiliki ukuran besar akan memiliki gaya gesekan cairan yang terkecil. Akibat dari ukuran tenggorokan yang random maka tenggorokan yang akan habis terlebih dahulu juga random. Suatu saat rangkaian pori yang mengandung air akan terpisah-pisah membentuk suatu kluster selama proses pengeringan. Gambar 3 memperlihatkan proses rangkaian pori yang memiliki 2 kluster (klaster no 1 dan 2) serta tenggorokan tunggal (S).

Kinetika pengeringan dapat diperoleh dengan mengasumsikan kondisi seperti tunak karena sepanjang pengeringan hanya 1 tenggorokan yang habis. Laju alir massa untuk masing-masing pori gas yang belum diketahui nilainya dapat dirumuskan dengan persamaan berikut.

$$\sum_j \dot{M}_{v,ij} = \sum_j A_{ij} \frac{\delta \rho \bar{M}_v}{L} \ln \left(\frac{p - p_{v,i}}{p - p_{v,j}} \right) = 0 \quad (2)$$

$$A_{ij} = \begin{cases} \pi r_{ij}^2 & \text{di daerah rangkaian} \\ L^2 & \text{di lapisan batas} \end{cases}$$

Kondisi batas untuk pers. (2) adalah

- Tekanan uap dari udara pengeringan pada posisi paling atas ($p_{v,\infty}$)
- Tekanan uap kesetimbangan pada setiap pori yang memiliki meniskus (p_v^*).

Dengan diketahui kondisi batas maka persamaan 2 dapat diselesaikan untuk mendapatkan nilai tekanan uap dari pori-pori yang terhubung dengan tenggorokan yang kosong (p_v). Jika suatu pori terhubung dengan tenggorokan yang memiliki meniskus lebih dari 1 tenggorokan seperti pori A yang terlihat pada Gambar 3 maka laju penguapan terdistribusi berdasarkan luas bidang permukaan dari masing-masing meniskus. Pada Gambar 3 terlihat bahwa pori B terjebak karena pori B terhubung dengan pori-pori yang memiliki kondisi kesetimbangan. Kondisi ini menyebabkan laju penguapan menuju pori B nol karena seluruh kondisi batas dari pori B adalah tekanan uap kesetimbangan.

Setiap kluster memiliki waktu penguapan masing-masing dari tiap tenggorokan terbesar di klasternya. Kemudian waktu penguapan dari kluster-kluster tersebut dibandingkan dengan waktu penguapan untuk kluster lainnya. Waktu

penguapan terkecil dipilih sebagai waktu penguapan. Setelah diketahui waktu penguapan maka laju penguapan dari tenggorokan terbesar untuk kluster-kluster yang lain perlu diperbarui. Tentu setiap waktu penguapan akan dihasilkan satu tenggorokan dalam kondisi kosong tidak mengandung air. Dengan kosongnya tenggorokan tersebut memungkinkan untuk menghasilkan kluster baru sehingga penomoran kluster perlu

Gambar 4. Algoritma pemodelan rangkaian pori untuk pengeringan batubara

diperbarui kembali. Metode yang digunakan untuk memberikan label kluster dari tiap-tiap tenggorokan adalah algoritma Hoshen-Kopelman (Al-Futaisi dan Patzek, 2003; Metzger dkk., 2007). Seluruh algoritma

rangkaian pori untuk pengeringan media berpori dapat dilihat pada Gambar 4.

Data tentang distribusi ukuran pori dari batubara yang didapatkan dari pustaka adalah 10-100 nm (Taske, 2000). Pada simulasi ini akan digunakan ukuran pori kecil sebesar 40 nm dan ukuran pori besar 100 nm sedangkan panjang tenggorokan adalah 500 nm. Kemudian ukuran pori besar dan kecil didistribusikan secara normal random dengan standar deviasi 10%. Struktur media pori yang digunakan dalam simulasi ini terdiri dari 4 macam, yaitu 1 struktur monomodal yang hanya terdiri dari ukuran pori kecil dan 3 struktur bimodal yang terdiri atas ukuran pori kecil dan besar. Tiga struktur bimodal tersebut adalah:

1. Struktur bimodal membentuk saluran dari atas hingga ke bagian bawah rangkaian pori
2. Struktur bimodal dengan pori kecil dikelilingi oleh pori besar
3. Struktur bimodal dengan pori besar dikelilingi oleh pori kecil

3. Hasil dan Pembahasan

Simulasi rangkaian pori telah dilakukan untuk 4 macam struktur. Gambar 5 memperlihatkan bahwa struktur monomodal (struktur 1) menghasilkan laju pengeringan konstan yang lebih singkat dibandingkan dengan struktur bimodal (struktur 2, 3, dan 4). Kondisi ini disebabkan permukaan air di struktur 1 yang hanya memiliki ukuran pori-pori kecil akan lebih cepat habis teruapkan. Dengan makin cepat habisnya air yang terdapat di permukaan struktur 1 maka permukaan tersebut akan membentuk suatu area uap. Area uap tersebut merupakan

tahanan di daerah rangkaian pori yang akan memperlambat laju difusi uap.

Struktur 2 yang membentuk saluran dari bagian atas hingga ke bagian bawah rangkaian pori memiliki laju pengeringan konstan yang terlama. Kondisi ini disebabkan pori besar yang dimiliki struktur 2 akan membentuk saluran yang bertindak seperti pompa kapilar terhadap tenggorokan-tenggorokan lainnya. Dengan demikian uap selalu menginvasi bagian pori-pori besar sedangkan pori-pori kecil yang terdapat dipermukaan masih belum terinvasi. Dengan demikian pada jangka waktu tertentu daerah permukaan masih terbasahi oleh cairan air dan menghasilkan laju pengeringan yang tinggi.

Gambar 6 dan 7 memperlihatkan distribusi air di dalam rangkaian pori untuk 2 posisi saturation (S). Pada struktur 1 terlihat bahwa saat $S = 94.25\%$ (Gambar 6a), sebagian besar tenggorokan yang terletak pada bagian atas permukaan telah teruapkan sehingga laju pengeringan mulai turun. Adapun arah dari aliran cairan menuju ke permukaan yang masih basah seperti diperlihatkan arah panah pada Gambar 6a tersebut. Selain itu gas mulai menginvasi bagian dalam dari rangkaian pori (Gambar 6b) sehingga rangkaian pori terbelah menjadi 2 klaster besar. Dengan terbelahnya rangkaian pori maka distribusi cairan terbatas hanya untuk masing-masing klaster tersebut. Klaster nomer 1 memiliki area yang lebih luas dibandingkan dengan klaster no 2 sehingga *capillary pumping* masih berjalan baik pada klaster nomer 1 (Gambar 6b). Dengan terbelahkan rangkaian pori menjadi 2 klaster maka laju penguapan juga menurun akibat terbentuknya tahanan uap di lapisan bagian atas.

Gambar 5. Kurva pengeringan untuk 4 macam struktur hasil simulasi rangkaian pori.

Gambar 6. Distribusi air di dalam rangkaian pori untuk struktur 1 (a) $S = 94.25\%$ dan (b) $S = 80.71\%$ dengan no 1 dan 2 menunjukkan jumlah klaster yang terbentuk.

Gambar 7. Distribusi air didalam rangkaian pori untuk struktur 2 (a) $S = 94.31\%$ dan (b) $S = 80.73\%$ dengan no 1 dan 2 menunjukkan jumlah klaster yang terbentuk.

Kondisi laju penguapan dari struktur 1 berbeda dengan struktur 2 yang memiliki saluran panjang dari atas hingga bagian bawah. Pada $S = 94.31\%$ dan $S = 80.73\%$ (Gambar 7a) memperlihatkan bahwa seluruh pori dan tenggorokan masih dalam satu klaster. Dengan terhubungnya rangkaian pori dalam satu klaster maka distribusi cairan ke bagian atas dari permukaan rangkaian pori masih berjalan baik seperti terlihat pada Gambar 7a. Laju pengeringan akan menurun saat $S = 80.73\%$ karena struktur dari pori membentuk 2 buah klaster yang diperlihatkan pada Gambar 7b dengan klaster no 1 memiliki area yang lebih luas dibandingkan area 2.

4. Kesimpulan

Simulasi pengeringan dengan metode rangkaian pori untuk struktur 1 memiliki laju pengeringan konstan tersingkat. Struktur 2 yang memiliki saluran pori besar memiliki laju pengeringan konstan terlama. Distribusi air dalam rangkaian pori struktur 1 menggambarkan fenomena laju pengeringan konstan dengan waktu yang pendek dan struktur 2 yang memiliki waktu terlama untuk laju pengeringan konstan.

Pada masa mendatang penelitian ini akan dilanjutkan untuk kondisi non-isothermal. Selain itu image struktur secara detail dari batubara diperlukan agar hasil diperoleh dapat lebih akurat. Hasil dari pengembangan diatas akan dibandingkan dengan percobaan pengeringan batubara untuk mendapatkan data kinetika pengeringan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dirjen Dikti melalui hibah bersaing untuk pendanaan penelitian ini.

Daftar Notasi

A	luas bidang pertukaran, m^2
L	panjang tenggorokan, m
M	laju alir massa, kg/s
M	fluks massa $kg/(m^2.s)$
P	tekanan, Pa
R	konstanta gas ideal, $J/(kmol.K)$
R	jari-jari tenggorokan, m
S	saturation –
T	temperatur, K
β	koefisien perpindahan massa, m/s
δ	koefisien difusi uap, m^2/s
ε	ketebalan lapisan batas, m
ρ	rapat massa, kg/m^3

Subscripts and superscripts

v	vapor
w	liquid water
*	saturation / equilibrium

Daftar Pustaka

- Al-Futaisi, A.; Patzek, T. W., *Extension of Hoshen-Kopelman algorithm to non-lattice environments*, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2003, Vol. 321(3-4), 665-678.
- Schlünder, E. U., *On the mechanism of the constant drying rate period and its relevance to diffusion controlled catalytic gas phase reactions*, Chemical Engineering Science, 1988, Vol. 43(10), 2685-2688.
- Fatt, I., *The network model of porous media*, Petroleum Transactions AIME, 1956, Vol. 207(34), 144-181.
- Irawan, A.; Metzger, T.; Tsotsas, E., *Pore network modelling of drying: combination with a boundary layer model to capture the first drying period*, 7th World Congress of Chemical Engineering, Glasgow, Scotland, July 10-14, 2005.
- Irawan, A., *Isothermal Drying of Pore Networks: Influence of Pore Structure on Drying Kinetics*, Dissertation, OvG-Universität Magdeburg, Magdeburg, Germany, May 31, 2006.
- LeBray, Y.; Prat, M., *Three-dimensional pore network simulation of drying in capillary porous media*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, Vol. 42(22), 4207-4224.

Metzger, T.; Irawan, A.; Tsotsas E., *Influence of pore structure on drying kinetics: a pore network study*, American Institute of Chemical Engineers Journal, 2007, Vol. 53(12), 3029-3041.

Prat, M., *Recent advances in pore-scale for drying of porous media*, Chemical Engineering Journal, 2002, Vol. 86(1-2), 153-164.

Segura, L. A.; Toledo, P. G., *Pore-level modelling of isothermal drying of pore networks: effect of gravity and pore shape and size distributions on saturation and transport parameters*,

Chemical Engineering Journal, 2005, Vol. 111(2-3), 237-252.

Taske, K., *An investigation into the pore size distribution of coal using mercury porosimetry and the effect that stress has on this distribution*, Master Thesis, University of Queensland, Australia, 2000.

Yiotis, A. G.; Tsimpanogiannis, I. N.; Stubos, A. K.; Yortsos, Y. C., *Pore network study of characteristic periods in the drying of porous media*, Journal of Colloid and Interface Science, 2006, Vol. 297(2), 738-748.