SIMULASI DIFUSI DAN ADSORPSI MATRIKS PADA PROSES ENHANCED COALBED METHANE

Ade Nurisman^{1*,} Retno Gumilang Dewi¹, Ucok WR Siagian² ¹Kelompok Keahlian Perancangan dan Pengembangan Proses Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri ²Program Studi Teknik Perminyakan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesha No. 10, Bandung 40132 Email: adenurisman@yahoo.com

Abstrak

Carbon capture and storage (CCS) dapat dipertimbangkan sebagai salah satu upaya mitigasi perubahan iklim, yaitu dengan menangkap CO₂ dan menginjeksikannya ke dalam formasi bawah permukaan. Injeksi CO₂ pada lapangan *coalbed methane* (CBM) berpotensi mengurangi emisi CO₂ dan meningkatkan produksi CBM (ECBM). Pada proses injeksi CO₂ di lapangan CBM, fenomena yang terjadi di dalam matriks lapisan batubara (coalbed) adalah difusi dan adsorpsi. Penelitian ini bertujuan memahami fenomena difusi dan adsorpsi pada proses injeksi CO2 untuk ECBM melalui model matematika, dan memperkirakan potensi penyimpanan CO₂ di dalam lapangan CBM dan potensi recovery CH₄. Pada penelitian dilakukan pengembangan model matematika untuk menjelaskan fenomena di dalam matriks pada proses ECBM. Model matematika, yang telah yalid, disimulasikan dengan memvariasikan beberapa variabel, yaitu makroporositas (0,001, 0,005, dan 0,01), tekanan (1, 3, dan 6 MPa), suhu (305, 423, dan 573 K), dan fraksi CO₂ awal (0,05, 0,1, 0,3, dan 0,5). Hasil penelitian menunjukkan pada makroporositas 0,001, tekanan 1 Pa, suhu 305 K, dan fraksi CO_2 awal 0,5, fraksi CO_2 yang teradsorpsi pada permukaan mikropori bernilai 0,9936 dan sisa fraksi CH₄ yang teradsorpsi pada permukaan mikropori bernilai 0,0064.

Kata kunci: carbon capture and storage (CCS), coalbed methane (CBM), ECBM, difusi, adsorpsi

Abstract

DIFFUSION AND MATRIX ADSORPTION SIMULATIONS IN ENHANCED COALBED METHANE PROCESS. Carbon capture and storage (CCS) can be considered as one of climate change mitigation efforts, through capturing and injecting of CO₂ in underground formations for reducing CO₂ emissions. CO₂ injection in coalbed methane (CBM) reservoir has potentially attracted for reducing CO_2 emissions and enhancing coalbed methane (ECBM) recovery. Diffusion and sorption are phenomenon of gas in the matrix on CO₂ injection in CBM reservoir. The objectives of the research are focused on understanding of diffusion and sorption of gas in the coal matrix with mathematical model and estimating of CO_2 storage in coalbed and CH_4 recovery. In this research, mathematical model is developed to describe the mechanism in the matrix on ECBM process. Mathematical model, which have been valid, is simulated in various variables, i.e. macroprosity (0.001, 0.005, and 0,01), pressure (1, 3, and 6 MPa), temperature (305, 423, and 573 K), and initial fraction of CO_2 (0.05, 0.1, 0.3, and 0.5). The results of this research show that preferential sequestration of CO₂ and preferential recovery of CH₄ in the surface of micropore on macroporosity 0.001, pressure 1 MPa, temperature 305 K, and inital fraction CO₂ 0,5 conditions are 0.9936 and 0.0064.

Keywords: carbon capture and storage (CCS), coalbed methane (CBM), ECBM, diffusion, adsorption

*penulis korespondensi

PENDAHULUAN

Karbondioksida (CO_2) merupakan salah satu gas yang berkontribusi besar terhadap peningkatan konsentrasi emisi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer. Konsentrasi CO_2 di atmosfer bumi terus mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan aktivitas industri. Salah satu penyebab utama meningkatnya konsentrasi CO_2 di atmosfer adalah penggunaan bahan bakar fosil (Olivier dan Peters, 2010).

GRK sangat berperan penting bagi kelangsungan keseimbangan iklim bumi dan kehidupan manusia. Tanpa adanya GRK di atmosfer, maka suhu udara di bumi pada malam hari dapat mencapai -184 °C. Akan tetapi, keberadaan GRK perlu dipantau dan dikendalikan dengan baik agar tidak menimbulkan dampak yang buruk bagi iklim bumi, seperti pemanasan global (Boer, 2000). Salah satu metode mitigasi emisi CO₂ adalah carbon capture and storage (CCS). CCS merupakan suatu konsep teknologi untuk mengurangi emisi CO2 ke atmosfer dengan cara menangkap gas CO₂, dan menyimpannya ke dalam formasi geologi bawah tanah, serta mempertahankannya agar gas CO₂ tidak terlepas ke atmosfer sehingga mampu mengurangi efek pemanasan global (Kheshgi dkk., 2006).

Menurut Javadpour (2008), penyimpanan CO₂ terdiri atas tiga pilihan lokasi, yaitu lapisan tanah, lapangan minyak, dan lapangan gas. Penyimpanan CO₂ di lapangan minyak dan gas memberikan keuntungan lebih daripada penyimpanan CO₂ di dalam lapisan tanah. Hal tersebut disebabkan pengaruh injeksi CO₂ terhadap peningkatan produksi minyak dan gas. Salah satu lapangan gas yang potensial untuk dijadikan lokasi penyimpanan CO₂ adalah *coalbed methane* (CBM).

Menurut Gou dkk. (2003), CBM merupakan gas alam nonkonvensional yang sebagian besar terdiri dari gas metana dan sebagian kecil gas hidrokarbon lain yang tercebak di dalam lapisan batubara (*coalbed*). CBM sebagian besar tersimpan di dalam struktur pori lapisan batubara. Struktur utama pori lapisan batubara terdiri atas matriks dan rekahan (*cleat*). Menurut Shi dan Durucan (2003), matriks tersusun atas yaitu mikropori (<2 nm), mesopori (2-50 nm), dan makropori (>50 nm). Mikropori lapisan matriks memiliki sifat permeabilitas rendah dan mampu menyimpan gas dengan kapasitas

besar. Fenomena yang terjadi di matriks adalah proses difusi, dan dipengaruhi oleh perubahan konsentrasi di matriks lapisan batubara. *Cleats* merupakan rekahan yang terbentuk secara alami selama proses pembentukan batubara. Rekahan (cleat) memiliki sifat permeabilitas yang lebih besar daripada mikropori lapisan matriks. Fenomena yang terjadi sepanjang rekahan adalah aliran laminar Darcy dan dipengaruhi oleh perbedaan tekanan. Fenomena yang terjadi di matriks diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema fenomena proses pada proses produksi CBM

Proses pengambilan gas metana pada CBM secara konvensional dilakukan dengan memompa air keluar (dewatering) terlebih tekanan dahulu, sehingga menurunkan reservoir (Reznik dkk., 1984). Proses produksi CBM secara konvensional hanya mampu menghasilkan CH₄ dengan volume yang sedikit, dan semakin lama produksi CH4 yang dihasilkan akan menurun. Hal tersebut disebabkan oleh pengaruh penurunan tekanan di lapangan CBM. Oleh sebab itu, diperlukan mekanisme untuk meningkatkan produksi CBM, yang dikenal dengan Enhanced Coalbed Methane (ECBM).

Menurut Busch dkk. (2004), proses ECBM dilakukan dengan menginjeksikan gas ke dalam lapisan batubara, untuk menjaga tekanan lapangan batubara saat tekanan menurun. CO2 memiliki sifat lebih mudah teradsorpsi pada lapisan batubara daripada CH₄. CO₂ akan teradsorpsi ke dalam pori matriks lapisan batubara. Hal ini menyebabkan CH4 terdesorpsi dan kemudian berdifusi dari matriks menuju rekahan, sehingga terjadi peningkatan tekanan di rekahan dan menyebabkan CH4 mengalir menuju sumur produksi. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi CCS dengan proses ECBM tidak hanya berpotensi untuk mengurangi peningkatan emisi CO₂ di atmosfer, namun juga berpotensi menjaga keamanan suplai energi di Indonesia.

Pada proses ECBM, injeksi gas ke dalam lapisan batubara berpengaruh terhadap proses penjerapan (adsorpsi) gas. Menurut Clarkson dan Bustin (2000) dan Shi dan Durucan (2003), persamaan yang umum digunakan untuk menjelaskan penyerapan multikomponen gas oleh lapisan batubara, yaitu *Extended Langmuir Isotherm*.

$$V = \frac{V_{Li} pY i bi}{1 + p \sum Y j bj}$$
(1)

Selain fenomena adsorpsi dan desorpsi, penelitian ini juga menitikberatkan pada fenomena difusi. Menurut Bird dkk. (2002), persamaan yang sering digunakan untuk menjelaskan fenomena difusi adalah Hukum Fick yang ditampilkan pada persamaan berikut:

$$Ji = -Dij\nabla Ci \tag{2}$$

Menurut Shi dan Durucan (2003), persamaan neraca massa fluida di matriks merupakan akumulasi dari fenomena konveksi, difusi dan sorpsi. Fenomena konveksi dipengaruhi oleh perbedaan tekanan, dan fenomena difusi dipengaruhi oleh perbedaan konsentrasi. Menurut Busch dkk (2004), proses aliran fluida di matriks hanya dipengaruhi oleh fenomena difusi, proses aliran fluida di rekahan dipengaruhi oleh perbedaan tekanan.

Fenomena difusi yang terjadi di matriks batubara umumnya lapisan dijelaskan menggunakan dua jenis model, yaitu unipore diffusion model dan bidisperse pore diffusion model. Unipore diffusion model lebih sesuai digunakan untuk lapisan batubara dengan kualitas tinggi. Selain itu, unipore diffusion model tidak cukup menjelaskan bahwa batubara memiliki pori yang heterogen. Bidisperse diffusion model pore mempertimbangkan bahwa difusi yang terjadi di dalam matriks terjadi di mikropori (<2 nm), mesopori (2-50 nm), dan makropori (>50 nm). Bidisperse pore diffusion lebih menggambarkan bahwa matriks lapisan batubara terdiri atas beberapa lapisan pori (Shi dan Durucan, 2003; Clarkson dan Bustin, 1999).

Penelitian ini bertuiuan untuk memahami fenomena difusi, adsorpsi dan desorpsi pada proses injeksi CO₂ untuk ECBM melalui model matematika. dan memperkirakan potensi penyimpanan CO2 dalam lapangan CBM dan potensi recovery CH4 dari lapangan CBM. Fenomena proses yang diamati adalah difusi, adsorpsi, dan desorpsi pada matriks lapisan batubara pada proses ECBM melalui injeksi CO₂. Senyawa yang diamati kelakuannya adalah gas CH₄ dan gas CO₂. Penelitian ini juga mempelajari fenomena difusi, adsorpsi, dan desorpsi pada proses injeksi CO2 pada proses ECBM: pemodelan matematika fenomena proses difusi, adsorpsi, dan desorpsi pada proses ECBM.

METODE

Sistem yang diamati dan dipelajari pada penelitian ini adalah fenomena proses di matriks pada proses injeksi CO₂ dalam integrasi CCS dengan ECBM. Langkah awal penelitian ini adalah memahami fenomena di matriks pada proses injeksi CO₂ dalam integrasi CCS dengan ECBM. Langkah selanjutnya adalah membangun pemodelan matematik fenomena di matriks menggunakan pendekatan model satu dimensi dan bidisperse pore diffusion. Asumsi vang digunakan pada pemodelan matematika fenomena di matriks pada proses ECBM, antara lain:

- 1. Satu dimensi;
- 2. Partikel *coalbed* berbentuk *spherical* dan berukuran seragam;
- 3. Fenomena difusi molekular menggunakan persamaan Fick dan fenomena adsorpsi menggunakan persamaan *Extended Langmuir Isotherm*;
- 4. Fenomena difusi yang terjadi bersifat *counter current;*
- 5. Gas teradsorpsi dengan mengabaikan volume permukaan lapisan batubara;
- 6. Gas bersifat ideal dan tidak terdapat fasa cair di matriks;
- 7. Adsorpsi gas pada permukaan makropori diabaikan;
- 8. Sistem isotermal;
- 9. Koefisien difusivitas tetap.

Ilustrasi *Bidisperse Pore Diffusion Model* ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi Bidisperse Pore Diffusion Model

[laju akumulasi massa i] = [laju massa]_{difusi} + [laju massa i]_{sorpsi}

$$\alpha \frac{\partial Ci}{\partial t} = \frac{(Di)}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial Ci}{\partial R} \right) - \frac{(Dij)}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial Cj}{\partial R} \right) + (1 - \alpha) \frac{\partial Cadsi}{\partial t}$$
(4)

Model persamaan matematika fenomena di matriks pada proses injeksi CO₂ dalam integrasi CCS dengan ECBM yang dibangun dan digunakan dalam simulasi model (3) dan (4), dengan kondisi awal:

$$t = 0; Ci = Cio$$
 (5)

dan dengan kondisi batas:

$$\left(\frac{\partial Ci}{\partial R}\right)_{R=0} = 0 \tag{6}$$

$$\left(\frac{\partial Ci}{\partial R}\right)_{R=Rmaks} = 0 \tag{7}$$

Nilai Cads didapatkan dari persamaan berikut: $C_{ads}i = \frac{CLi.bi.Rg.T.Ci}{1+Rg.T \sum bi.Ci}$ (8)

Pada persamaan 4, laju massa difusi dipengaruhi oleh laju massa i yang keluar karena difusi dan laju massa j yang masuk karena difusi. Pada penelitian ini digunakan perangkat lunak untuk simulasi model persamaan matematika fenomena proses di matriks. Perangkat lunak yang digunakan adalah FlexPDE. Prosedur operasi vang dilakukan oleh FlexPDE untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial (PDP) adalah membangun model elemen, menyelesaikan secara numerik, dan menampilkan hasil dalam format grafik dan tabulasi. Hasil yang didapatkan dari simulasi model adalah profil konsentrasi gas di dalam kaitannya terhadap proses injeksi CO₂ untuk ECBM.

Variasi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah nilai makroporositas (0,001, 0,005, 0,01) sesuai dengan rentang makroporositas sebesar 0,001-0,01 (Clarkson dan Bustin, 1999); variasi tekanan di matriks (1, 2, dan 3 MPa) yang merupakan rentang nilai tekanan di matriks pada lapangan batubara *sub bituminous*. Lapangan ini merupakan jenis umum lapangan batubara di Indonesia (Busch dkk., 2004). Selain itu dilakukan pula variasi suhu (305, 423, dan 573 K) dan variasi fraksi CO₂ awal di matriks (0,05, 0,1, 0,3, dan 0,5).

(3)

HASIL DAN PEMBAHASAN Validasi Model

Pada penelitian ini, validasi model dilakukan dengan membandingkan profil hasil simulasi model matematika dengan data hasil model analitik adsorpsi CO_2 pada lapisan batubara, yang didapatkan dari Clarkson dan Bustin (1999) yang ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Profil dinamik fraksi adsorpsi CO₂ pada lapisan batubara

Pada Gambar 3 terlihat bahwa profil adsorpsi CO₂ menurut hasil simulasi model matematika pada penelitian ini memiliki tren serupa dengan data hasil penyelesaian model analitik untuk adsorpsi CO₂ oleh Clarkson dan Bustin (1999). Perbedaan rentang nilai fraksi adsorpsi CO₂ yang cukup jauh tersebut karena profil adsorpsi CO₂ hasil simulasi model matematika pada penelitian ini merupakan pengaruh dari hasil fenomena difusi gas CO₂ dan CH4 dan fenomena desorpsi CH4 dari lapisan batubara pada proses ECBM. Selain itu, perbedaan rentang karena model matematika yang digunakan pada penelitian ini mengasumsikan CO₂ yang teradsorpsi telah terdifusi terlebih dahulu di sepanjang matriks lapisan batubara. Dengan demikian, model persamaan yang dikembangkan pada penelitian ini layak dan dapat digunakan untuk menjelaskan fenomena injeksi CO₂ pada proses ECBM.

Simulasi Model Matematika

Hasil simulasi model persamaan matematika berupa profil fraksi konsentrasi CH₄ dan CO₂. Pada keadaan awal dilakukan simulasi model persamaan dengan kondisi tekanan 3 MP, suhu 310 K, dan makroporositas 0,001 selama 100 hari. Hasil simulasi model profil perubahan fraksi disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Profil dinamik fraksi CH₄ dan fraksi CO₂ pada proses injeksi CO₂ untuk ECBM

Gambar 4 menunjukkan profil dinamik fraksi CH_4 menurun hingga mencapai nilai 0,076 pada hari ke-100, sedangkan profil dinamik fraksi CO_2 meningkat hingga mencapai nilai 0,924 pada hari ke-100. Penurunan profil dinamik fraksi CH_4

dipengaruhi oleh peristiwa difusi dan adsorpsi CO₂ di matriks. CO₂ memiliki nilai difusivitas yang lebih tinggi daripada CH₄, sehingga CO₂ lebih cepat berdifusi di makropori. Selain itu, CO₂ memiliki nilai konstanta volume Langmuir yang lebih tinggi dan berat molekul yang lebih besar daripada CH₄, sehingga CO₂ dapat lebih mudah teradsorpsi di permukaan mikropori dan akibatnya CH₄ terdesorpsi menuju makropori, kemudian menuju rekahan, dan terakhir menuju sumur pipa produksi.

Pengaruh Injeksi CO₂ pada Peningkatan Produksi CBM

Pada Gambar 5 terlihat bahwa dalam waktu 50 hari, proses injeksi CO_2 pada lapisan CBM dapat meningkatkan produksi CBM hingga 9,5e7 mol/m³. Nilai tersebut 2-3 kali lebih besar daripada produksi CBM tanpa injeksi CO_2 yang hanya memproduksi CBM sejumlah 3,9e7 mol/m³.



Gambar 5. Profil dinamik pengaruh injeksi CO₂ terhadap peningkatan produksi CBM

Peningkatan produksi CBM melalui injeksi CO₂ dipengaruhi oleh proses adsorpsi dan difusi di matriks. Lapisan batubara bersifat lebih mudah mengadsorpsi CO₂ daripada CH₄. Selain itu, konstanta volume Langmuir CO2 dan nilai difusivitas CO₂ lebih besar daripada CH₄. Oleh karena itu, CO₂ lebih mudah teradsorpsi di permukaan mikropori dan menyebabkan CH₄ lebih mudah terdesorpsi dari permukaan mikropori.

Pada proses produksi CBM tanpa injeksi CO₂, CBM terdesorpsi dari mikropori karena pengaruh penurunan tekanan akibat *dewatering* tanpa adanya gas pendorong. Oleh sebab itu, dalam waktu proses yang sama, produksi CBM dengan proses injeksi CO_2 menghasilkan jumlah produksi yang lebih besar daripada proses CBM tanpa proses injeksi CO_2 .

Simulasi Variasi Variabel Model Persamaan Matematika

Pada penelitian ini dilakukan beberapa variasi variabel untuk mengetahui pengaruh variable tersebut terhadap perubahan fraksi CO_2 dan fraksi CH_4 . Variasi variabel yang dilakukan antara lain variasi makroporositas, variasi tekanan, variasi suhu, dan variasi fraksi CO_2 awal.

Pengaruh Makroporositas

Gambar 6 dan Gambar 7 menunjukkan pengaruh makroporositas terhadap fraksi CO₂ fraksi CH4. Hasil simulasi model dan persamaan matematika dengan variasi makroporositas terhadap pengaruh fraksi gas teradsorpsi ditampilkan pada Gambar 6. Fraksi CO₂ yang dapat teradsorpsi di permukaan mikropori mencapai 0,9123 dan fraksi CH₄ yang tersisa di permukaan mikropori mencapai 0,0877 dari keseluruhan gas di permukaan mikropori pada makroporositas 0,001. Sedangkan pada makroporositas 0,01, fraksi CO₂ yang dapat permukaan teradsorpsi di mikropori mencapai 0.8158 dan fraksi CH₄ yang tersisa di permukaan mikropori mencapai 0.1842 dari keseluruhan gas di dalam matriks.

Pada model persamaan matematika yang digunakan pada penelitian ini terlihat bahwa makroporositas berbanding terbalik terhadap akumulasi gas yang teradsorpsi pada permukaan mikropori (Persamaan 9). Pada makroporositas yang besar menyebabkan makropori menjadi makin besar dan luas permukaan mikropori makin kecil, sehingga gas yang teradsorpsi pada permukaan mikropori menurun.

$$\frac{\partial Cadsi}{\partial t} \sim \frac{1}{(1-\alpha)} \tag{9}$$

Makin besar makroporositas pada lapisan batubara mengakibatkan fraksi CO₂ yang teradsorpsi pada permukaan mikropori menjadi makin kecil (Gambar 6). Oleh sebab itu, fraksi CH₄ yang terdesorpsi dari permukaan mikropori menjadi makin sedikit dan fraksi CH₄ yang tersisa pada permukaan mikropori menjadi makin banyak (Gambar 6).

Makroporositas juga berpengaruh terhadap fraksi gas yang berdifusi sepanjang makropori. Pada makroporositas 0,001, fraksi CO₂ yang berdifusi masuk di sepanjang makropori bernilai 0,8935 dan fraksi CH₄ yang berdifusi keluar di sepanjang makropori bernilai 0,1065. Pada makroporositas 0,01, fraksi CO₂ yang berdifusi masuk di sepanjang makropori bernilai 0,7806 dan fraksi CH₄ yang berdifusi keluar di sepanjang makropori bernilai 0,2190.



Gambar 6. Profil dinamik fraksi adsorpsi CO₂ dan sisa fraksi adsorpsi CH₄ di permukaan matriks terhadap variasi makroporositas



Gambar 7. Profil dinamik fraksi CO_2 dan sisa fraksi CH_4 di matriks terhadap variasi makroporositas

Hasil tersebut dipengaruhi oleh hubungan makroporositas yang berbanding terbalik dengan akumulasi konsentrasi gas di makropori (Persamaan 10) dan juga gas yang teradsorpsi dan terdesorpsi pada permukaan mikropori.

$$\frac{\partial Ci}{\partial t} \sim \frac{1}{\alpha} \tag{10}$$

Pada makroporositas besar, fraksi CO₂ di sepanjang makropori dan fraksi CH₄ yang permukaan terdesorpsi dari mikropori kecil. menjadi lebih Hal tersebut mengakibatkan fraksi CH₄ vang berdifusi menuju rekahan menjadi lebih sedikit atau dengan kata lain fraksi CH₄ yang tersisa di makropori menjadi makin banyak (Gambar 7). Sedangkan pada makroporositas kecil, fraksi CO₂ di sepanjang makropori dan teradsorpsi di permukaan mikropori menjadi makin besar. Hal tersebut mengakibatkan fraksi CH₄ yang terdesorpsi dari permukaan mikropori dan berdifusi menuju rekahan menjadi makin besar atau dengan kata lain fraksi CH₄ yang tersisa di makropori menjadi makin sedikit (Gambar 7).

Pengaruh Tekanan

Gambar 8 dan Gambar 9 menunjukkan pengaruh tekanan terhadap fraksi CO_2 dan fraksi CH_4 . Pada Gambar 8 terlihat bahwa pada tekanan 1 MPa, fraksi CO_2 pada makropori bernilai 0,9283 dan fraksi CH_4 yang tersisa pada makropori dapat mencapai nilai 0,0717. Sedangkan pada tekanan yang lebih tinggi, fraksi CO₂ pada makropori bernilai lebih kecil dan fraksi CH₄ yang tersisa pada makropori bernilai lebih besar daripada tekanan yang lebih rendah. Hal tersebut karena tekanan berbanding terbalik terhadap nilai koefisien difusivitas, seperti yang digambarkan pada Persamaan 11 dan Persamaan 12.

$$Dchco2 = \frac{0.00143*(T^{1.75})}{P*M_{ch4co2}^{0.5}} * \left(\Sigma_{vch4}^{\frac{1}{3}} + \Sigma_{vco2}^{\frac{1}{3}}\right)^{2} * 0.0001 * 86400$$
(11)

$$Dij \sim \frac{1}{p}$$
 (12)

Berdasarkan hasil simulasi proses injeksi CO₂ pada lapisan batubara yang digambarkan pada Gambar 9, pada variasi tekanan 1 MPa, fraksi CO₂ yang teradsorpsi pada permukaan mikropori dapat mencapai nilai 0,9412 dan fraksi adsorpsi CH₄ yang tersisa dapat mencapai 0,0588. Sedangkan pada tekanan 6 MPa, fraksi CO₂ yang teradsorpsi pada permukaan mikropori memiliki nilai yang terkecil diantara tekanan simulasi yang lain, yaitu bernilai 0,9040 dan fraksi adsorpsi CH₄ yang tersisa bernilai 0,0960. Dengan demikian, tekanan yang lebih tinggi berpengaruh terhadap penurunan nilai fraksi adsorpsi CO₂ di permukaan mikropori. Hal tersebut terjadi karena pada tekanan lebih tinggi mengakibatkan difusi CO₂ yang terjadi pada makropori mengalami penurunan, sehingga nilai fraksi CO₂ yang dapat



Gambar 8. Profil dinamik pengaruh tekanan terhadap fraksi CO_2 dan sisa fraksi CH_4 di makropori



Gambar 9. Profil dinamik pengaruh tekanan terhadap fraksi adsorpsi CO₂ dan sisa fraksi CH₄ di permukaan mikropori

teradsorpsi pada permukaan mikropori menurun dan nilai fraksi adsorpsi CH₄ yang tersisa pada permukaan mikropori meningkat.

Pengaruh Suhu

Gambar 10 dan Gambar 11 menunjukkan pengaruh suhu terhadap fraksi CO_2 dan fraksi CH_4 . Pada penelitian ini diamati bahwa peningkatan suhu tidak berpengaruh secara signifikan terhadap peningkatan fraksi CO_2 yang dapat disimpan dan juga fraksi CH_4 yang diperoleh.

Berdasarkan Persamaan 11, peningkatan suhu menyebabkan peningkatan CO₂ yang berdifusi di makropori. Namun pada model isoterm adsorpsi Langmuir yang dimodifikasi (atau *Extended Langmuir Isotherm*, Persamaan 13) peningkatan suhu dapat menurunkan konsentrasi CO₂ yang dapat teradsorpsi pada permukaan mikropori (Persamaan 14).

$$Cadsi = \frac{CLi.bi.Rg.T.Ci}{1+Rg.T\sum bi.Ci}$$
(13)

$$Cadsi = \frac{T}{1+T}$$
(14)



Gambar 10 Profil Dinamik Pengaruh Suhu Terhadap Fraksi CO2 dan CH4 di Makropori



Gambar 11. Profil dinamik pengaruh suhu terhadap fraksi adsorpsi CO₂ dan sisa fraksi CH₄ di permukaan mikropori

Pengaruh Fraksi Konsentrasi CO₂ Awal di Matriks

12 Gambar Gambar dan 13 menunjukkan pengaruh fraksi konsentrasi CO2 awal terhadap fraksi CO2 dan fraksi CH4. CO2 awal merupakan CO2 yang secara alamiah sudah terkandung di mikropori dan makropori. Pada Gambar 12 dan 13 terlihat bahwa dalam waktu proses yang sama, makin besar konsentrasi CO2 awal di matriks maka fraksi CO2 yang teradsorpsi meningkat dan fraksi CH₄ yang terambil juga meningkat. Lapisan batubara memiliki sifat lebih mudah mengadsorpsi CO2 daripada CH4 dan nilai konstanta volume Langmuir CO2 lebih besar daripada konstanta Langmuir CH4. Hal

tersebut mempengaruhi konsentrasi CO₂ yang dapat teradsorpsi di permukaan mikropori lebih banyak, sehingga dengan berat molekul yang lebih besar daripada CH₄, CO₂ dapat menyebabkan CH₄ terdesorpsi dari permukaan mikropori menuju makropori.

Pada pengaruh difusi, CO_2 memiliki nilai difusivitas yang lebih tinggi daripada CH_4 dan injeksi CO_2 ke dalam lapangan CBM menyebabkan terjadinya kontak antara CO_2 dan CH_4 dan CO_2 mendorong CH_4 keluar menuju rekahan hingga mengalir menuju sumur pipa produksi. Oleh sebab itu, CO_2 menggantikan ruang kosong yang ditinggalkan oleh CH_4 .



Gambar 12. Profil dinamik pengaruh fraksi CO_2 awal terhadap fraksi CO_2 dan CH_4 di makropori



Gambar 13. Profil dinamik pengaruh fraksi CO₂ awal di matriks terhadap perubahan fraksi adsorpsi CO₂ dan fraksi CH₄ di permukaan mikropori

KESIMPULAN

Mekanisme fenomena yang terjadi di matriks pada proses injeksi CO₂ untuk ECBM telah dikaji dengan pendekatan simulasi. Dari hasil penelitian diketahui bahwa fenomena yang terjadi di matriks dipengaruhi oleh beberapa variabel, antara lain makroporositas, tekanan, suhu, dan fraksi CO₂ dinyatakan awal, yang dalam model matematika sebagai berikut:

$$\alpha \frac{\partial Ci}{\partial t} = \frac{(Di)}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial Ci}{\partial R} \right) - \frac{(Dij)}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial Cj}{\partial R} \right) + (1 - \alpha) \frac{\partial Cadsi}{\partial t}$$

Dari hasil penelitian, simulasi selama 100 hari menunjukkan bahwa fraksi CO₂ yang teradsorpsi pada permukaan mikropori mampu mencapai nilai 0,9936 dan sisa fraksi CH₄ yang teradsorpsi pada permukaan mikropori bernilai 0,0064 pada proses injeksi CO₂ pada lapangan CBM dengan makroporositas 0,001, tekanan 1 MPa, suhu 305 K, dan fraksi CO_2 awal 0,5.

Secara umum, pengaruh variasi beberapa variabel tersebut terhadap fraksi CO₂ yang dapat disimpan di matriks dan fraksi CH₄ yang dapat diambil, antara lain:

- a. Peningkatan makroporositas menyebabkan penurunan fraksi konsentrasi CO₂ yang dapat disimpan dan fraksi CH₄ yang diambil;
- b. Peningkatan tekanan menyebabkan penurunan fraksi CO₂ yang dapat disimpan dan fraksi CH₄ yang dapat diambil;
- c. Peningkatan suhu tidak berpengaruh secara signifikan terhadap peningkatan fraksi CO₂ yang dapat disimpan dan juga fraksi CH₄ yang diambil;
- d. Peningkatan fraksi CO₂ awal menyebabkan peningkatan fraksi CO₂ yang dapat disimpan dan juga fraksi CH₄ yang diambil.

Berdasarkan variasi beberapa variabel tersebut, variabel yang paling berpengaruh pada proses injeksi CO_2 pada lapangan CBM untuk ECBM adalah makroporositas, tekanan, dan fraksi CO_2 awal.

Dengan demikian, lapangan CBM berpotensi mampu digunakan sebagai tempat penyimpanan CO_2 (*CO₂ storage*) dan injeksi CO_2 pada lapangan CBM berpotensi mampu meningkatkan produksi CBM sekitar 2-3 kali daripada proses produksi CBM tanpa injeksi CO_2 .

DAFTAR NOTASI

V	= volume gas (scf/ton)
VL	= volume Langmuir (scf/ton)
Р	= tekanan (MPa)
$b=1/P_L$	= tekanan Langmuir (MPa ⁻¹)
Y	= fraksi komponen
i,j	= CH ₄ ; CO ₂
D	= koefisien difusivitas (m²/hari)
Σv	= volume difusi (cm ³ /mol)
J	= fluks difusi (mol/(m ² .s))
∇	= perubahan (<i>gradient</i>)
Μ	= berat molekul (g/mol)
Т	= suhu (K)
С	= konsentrasi (mol/m³)
Rg	= konstanta gas (8,3145 kPa.m ³)
r	= jari-jari (m)
α	= makroporositas
Cads	= konsentrasi karena fenomena
	adsorpsi atau desorpsi (mol/m ³)
CL	= koefisien konsentrasi adsorpsi
	Langmuir (mol/m ³)

DAFTAR PUSTAKA

Bird, R. B.; Stewart, W. E.; Lightfoot, E. N., *Transport Phenomena*; Wiley & Sons: New York, 2007.

Boer, R., Principles and Concept Model COMMAP (Comprehemsive Mitiation Assessment Process), Prosiding Seminar and Workshop Forest and Carbon Sequestration: Business Opportunity for Private Sector, Kuala Lumpur, 10-11 Oktober 2000.

Busch, A.; Gensterblum, Y.; Krooss, B. M.; Littke, R., Methane and carbon dioxide adsoprtion-diffusion experiments on coal: upscalling and modeling, *International Journal of Coal Geology*, **2004**, 60(2-4), 151-168.

Clarkson, C. R.; Bustin, R. M., The effect of pore structure and gas pressure upon the transport properties of coal: a laboratory and modeling study. 2. Adsorption rate modeling, *Fuel*, **1999**, 78(11), 1345-1362.

Clarkson, C. R.; Bustin, R. M., Binary gas adsorption/desorption isotherms: effect of moisture and coal composition upon carbon dioxide selectivity over methane, *International Journal of Coal Geology*, **2000**, 42(4), 241-271.

Gou, X.; Du, Z.; Li, S., *Computer Modelling and Simulation of Coalbed Methane Reservoir*, SPE Eastern Regional Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, 6-10 September 2003.

Javadpour, F., CO_2 Sequestration in Geological Formations: Pore-Level to Reservoir-Scale Up-Scaling, Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, 17-19 Juni 2008.

Kheshgi, H.; Cappelen, F.; Lee, A.; Crookshank, S.; Heilbrunn, A.; Mikus, T.; Robson, W.; Senior, B.; Stleman, T.; Warren, L., *Cabon Dioxide Capture and Geological Storage: Contributing to Climate Change Solutions*, SPE International Health, Safety, & Environment Conference, Abu Dhabi, UAE, 2-4 April 2006.

Olivier, J. G. J.; Peters, J. A. H. W., *No Growth in Total Global* CO_2 *Emissions in* 2009, Netherlands Environmental Assessment Agency: Netherlands, 2009.

Reznik, A. A.; Singh, P. K.; Foley, W. L., An analysis of the effect of CO_2 injection on the

recovery of in-situ methane from bituminous coal: an experimental simulation, *SPE Journal*, **1984**, 24(5), 521-528.

Shi, J. Q.; Durucan, S., A bidisperse pore diffusion model for methane displacement desorption in coal by CO_2 injection, *Fuel*, **2003**, 82(10), 1219-1229.