

REVIEW KEMAMPUAN ADSORPSI BATUBARA TERHADAP GAS-GAS RUMAH KACA

Barlin

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya
Jl. Raya Palembang – Prabumulih KM 32, Indralaya, Ogan Ilir Sumsel, 30662
e-mail : barlin_oemar@yahoo.com

ABSTRAK

Studi literatur dilakukan untuk mengetahui kemampuan adsorpsi batubara terhadap gas-gas rumah kaca. Beberapa penelitian telah dilakukan antara lain Busch dkk (2003), Busch dkk (2004), Siemons dan Busch (2007), Saghafi dkk (2007) dan Siemons dkk (2007). Dari hasil penelitian disimpulkan bahwa kemampuan adsorpsi batubara terhadap gas-gas rumah kaca akan menurun dengan bertambahnya ukuran partikel dan meningkat dengan meningkatnya peringkat batubara. Penurunan kemampuan adsorpsi terjadi akibat peningkatan laju adsorpsi dengan bertambahnya ukuran partikel batubara. Sedangkan peningkatan kemampuan adsorpsi terjadi akibat bertambahnya kandungan karbon dan berkurangnya moisture content batubara.

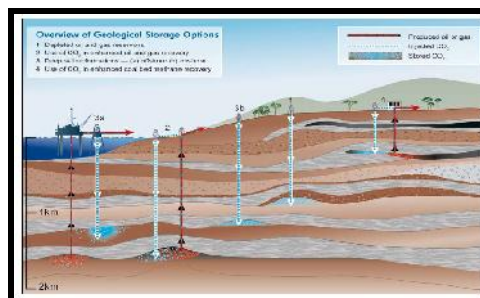
Kata kunci : batubara, adsorpsi, gas rumah kaca

I. PENDAHULUAN

Pemanasan global (*global warming*) ditandai dengan meningkatnya temperatur rata-rata atmosfer, laut dan daratan bumi yang diakibatkan oleh pelepasan gas rumah kaca (*Green House Gas*) ke atmosfer seperti karbondioksida (CO_2), metan (CH_4), oksida asam nitrat (N_2O), hidrofluorokarbon (HFC) dan sulfurheksafluorida (SF_6). Pada *Earth Summit* tahun 1992 di Rio de Janeiro, Brazil, 150 negara berikrar untuk menghadapi masalah gas rumah kaca dan setuju untuk menterjemahkan maksud ini dalam suatu perjanjian yang mengikat, sehingga pada tahun 1997 di Jepang, sebanyak 160 negara merumuskan persetujuan yang lebih kuat yang dikenal dengan *Protocol Kyoto*. Perjanjian ini menyerukan kepada negara-negara industri yang memegang persentase paling besar dalam melepaskan gas-gas rumah kaca untuk mengurangi emisi ke tingkat 5% di bawah emisi tahun 1990. Pengurangan ini harus dapat dicapai paling lambat pada tahun 2012 (www.globalwarming.com).

Pengurangan emisi gas karbondioksida (CO_2) di atmosfer merupakan langkah utama yang harus dilakukan untuk mengurangi efek pemanasan global. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mengurangi emisi gas karbondioksida (CO_2) di atmosfer dalam jangka menengah maupun panjang adalah dengan menyimpan karbondioksida (CO_2) ke dalam formasi geologi.

Pada saat ini ada tiga alternatif formasi geologi (lihat gambar 1) yang dapat digunakan sebagai media penyimpanan gas karbondioksida (CO_2), yaitu reservoir air garam jenuh (*saline aquifer*), reservoir minyak dan gas bumi yang sudah menurun produksinya (*depleted oil and gas reservoirs*) dan lapisan batubara yang secara ekonomis tidak bisa ditambang karena terlalu dalam (*unmineable coalbeds*). Skema alternatif formasi geologi ini dapat dilihat pada gambar 1 (IPCC, 2005).



Gambar 1. Skema alternatif formasi geologi (IPCC, 2005)

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Adsorption Isotherm

Adsorption isotherm didefinisikan sebagai kemampuan batubara untuk menyerap gas dalam kondisi tekanan tertentu pada suhu konstan. (Sasaki dkk, 2002).

Persamaan untuk menghitung kemampuan menyerap (*adsorption capacity*)

$$V = V_{\infty} \frac{K_a P_e}{1 + K_a P_e} \quad (1)$$

dimana :

V_{∞} : adsorption capacity CO₂ (scc/g)

V : equilibrium adsorption CO₂ (scc/g)

P_e : equilibrium pressure (MPa)

K_a : adsorption equilibrium constant (MPa⁻¹)

Helium adalah gas *non adsorbed*, sehingga helium digunakan untuk menghitung *volume void*. Jumlah gas yang diinjeksikan ke dalam *sample cell* dihitung berdasarkan persamaan gas ideal.

$$PV = n_{injeksi} RT \quad (2)$$

P : tekanan (kPa)

V : volume (m³)

$n_{injeksi}$: jumlah mol injeksi (kmol)

R : konstanta gas universal (kPa m³/kmol K)

T : temperatur (K)

2.1 Volume void

Volume void dihitung berdasarkan tekanan, temperatur dan jumlah gas helium yang diinjeksikan ke dalam *reference cell* dan *sample cell* (Sudibandriyo dkk, 2005).

$$V_{void} = n_{He} (Z_{He} RT / P) \quad (3)$$

$$n_{He} = (PV / Z_{He} RT) \quad (4)$$

n_{He} : jumlah mol helium (kmol)

V : volume gas injeksi di *reference cell* (m³)

Z_{He} : faktor kompresibilitas helium

R : konstanta gas universal (kPa m³/kmol K)

T : temperatur (K)

P : tekanan (kPa)

Untuk menghitung faktor kompresibilitas helium digunakan persamaan berikut :

$$Z_{He} = 1 + (1,7 \times 10^{-3} - 4,779 \times 10^{-6} T + 4,92 \times 10^{-9} T^2) / P \quad (5)$$

T : temperatur (k)

P : tekanan (atm)

Jumlah gas CO₂ *non absorbed* (unadsorbed CO₂) dihitung berdasarkan persamaan

$$n_{unads} = (PV_{void} / Z_{CO_2} RT) \quad (6)$$

Jumlah gas CO₂ *adsorbed* (adsorbed CO₂), n_{ads} , dihitung sebagai selisih jumlah gas yang diinjeksikan dan jumlah gas yang tidak terserap (non adsorbed), dihitung berdasarkan persamaan $n_{ads} = n_{inj} - n_{unads}$ (7)

n_{unads} : gas yang tidak terserap (unadsorbed)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Beberapa peneliti telah melakukan penelitian untuk mengetahui kemampuan adsorpsi batubara terhadap gas-gas rumah kaca atau *green house gas*. Penelitian dilakukan terhadap berbagai jenis batubara maupun berbagai jenis gas rumah kaca seperti karbondioksida (CO₂) dan metana (CH₄).

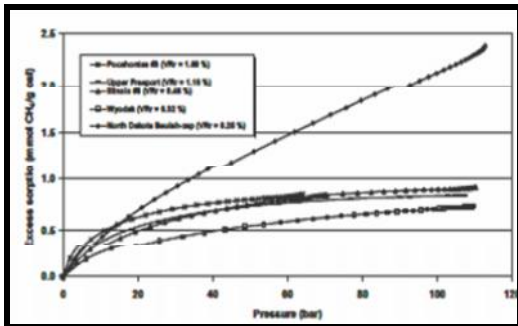
Busch dkk (2003) meneliti mengenai kemampuan adsorpsi batubara terhadap gas karbondioksida (CO₂), metana (CH₄) dan campuran antara keduanya. Batubara yang digunakan berasal dari USA yang termasuk dalam jenis *Argonne premium coals* yaitu Beulah-zap, Wyodak, Illinois, Upper freeport dan Pocahontas (lihat tabel 2.1). Semua batubara diuji dalam bentuk serbuk (*powder*) dengan ukuran partikel 0,15 mm sebanyak 5 gram pada kondisi kering (*dry sample*). Temperatur pengujian masing-masing gas adalah 22°C, tekanan maksimal 51 bar (5,1 MPa) untuk karbondioksida dan 110 bar (11 MPa) untuk metana, sedangkan temperatur pengujian untuk campuran adalah 45°C dan tekanan maksimal 180 bar (18 MPa).

Tabel 1. Karakteristik batubara Argonne Premium (Busch dkk, 2003)

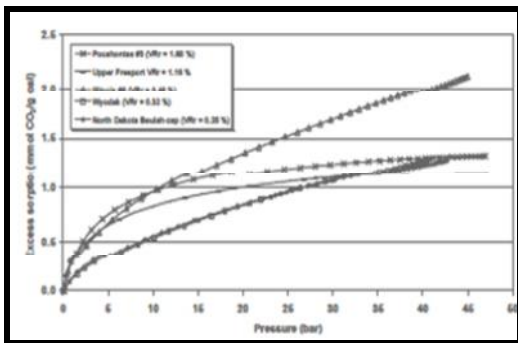
	Beulah-Zap	Wyodak	Illinois	Upper Freeport	Pocahontas
VM (%)	0.25	0.22	0.46	1.16	1.83
Rank	ignite	subbt	hvb	mvb	hb
Lipidinite (%)	-	<1	5	1	1
Vitrinite (%)	-	89	85	91	89
Inertinite (%)	-	11	10	8	10
Ash (%)	9.72	8.77	15.48	13.16	4.77
H ₂ O (%)	32.24	29.09	7.97	1.13	0.85
VM (%)	44.94	44.73	40.05	27.45	18.8

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kemampuan adsorpsi atau disebutnya sebagai *excess sorption* terhadap gas metana (CH₄) akan naik seiring dengan kenaikan kualitas batubara sampai pada tekanan 50 bar (5 MPa), setelah itu akan konstan untuk semua batubara kecuali jenis Beulah-zap. Pada Beulah-zap justru adsorpsi metana (CH₄) akan naik secara linier dengan kenaikan tekanan bahkan melebihi dua batubara kualitas tinggi yang lain (Upper freeport dan Pocahontas) seperti terlihat pada gambar 2. Sedangkan kemampuan adsorpsi CO₂ oleh batubara kualitas rendah (Beulah-zap, Wyodak dan Illinois) menunjukkan kenaikan yang hampir linier sampai pada tekanan 51 bar (5 MPa). Pada batubara Wyodak dan Illinois kenaikan relatif lambat pada saat tekanan rendah. Adsorpsi CO₂ oleh batubara Beulah-zap dan Wyodak hampir sama yaitu 1,3 mmol CO₂/gram dan

2,1 mmol CO₂/gram oleh batubara Illinois. Pada batubara kualitas sedang (Upper freeport dan Pocahontas) terjadi kenaikan yang cukup tajam pada tekanan dibawah 20 bar sampai 1,17 mmol CO₂/gram, setelah itu kenaikan relatif konstan sebesar 1,35 mmol CO₂/gram pada tekanan antara 40 - 50 bar seperti terlihat pada gambar 3.



Gambar 2. Adsorpsi CH₄ oleh batubara Argonne Premium (Busch dkk, 2003)



Gambar 3. Adsorpsi CO₂ oleh batubara Argonne Premium (Busch dkk, 2003)

Secara umum kemampuan adsorpsi akan naik secara konstan sampai pada tekanan 50 bar seiring dengan kenaikan kualitas batubara walaupun tidak untuk batubara jenis Beulah-zap. Walaupun batubara ini termasuk batubara kualitas rendah tetapi justru mempunyai kemampuan adsorpsi yang paling besar khususnya terhadap gas metana.

Busch dkk (2004) juga mengamati kemampuan adsorpsi batubara terhadap karbondioksida (CO₂) dan metana (CH₄). Batubara yang digunakan berasal dari cekungan Silesian Polandia dengan peringkat *high volatile bituminous* (VRr = 0,68 %) pada kondisi kering (*dry sample*) dan kondisi lembab (*moist sample*). Batubara dibuat dengan beberapa ukuran partikel (*grain size*) yaitu <0,063 mm, 0,063 - 0,177 mm, 0,177 - 0,354 mm, 0,354 - 0,707 mm, 0,707 - 2

mm dan ~3 mm. Untuk melihat pengaruh temperatur, maka pengujian juga dilakukan pada 2 temperatur yaitu 32°C dan 45°C. Karakteristik batubara terlihat pada tabel 2.

Tabel 2. Data batubara cekungan Silesian Polandia (Busch dkk, 2004)

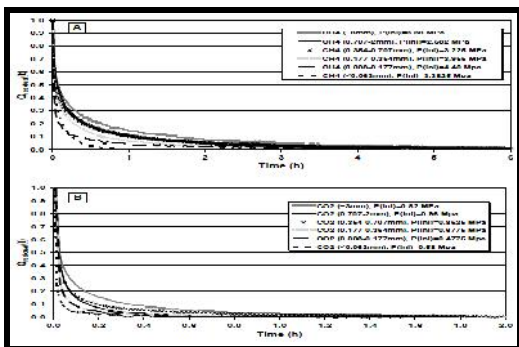
Grain size (mm)	VR _r (%)	Lignite (%)	Virinite (%)	Freefines (%)	Ash (%)	Moisture (%)
<0,063	0,68	1	60,3	33,7	10,42	2,76
0,063-0,177	0,68	2,9	64,5	32,6	8,62	2,57
0,177-0,354	0,68	4,7	66,4	28,8	5,41	3,66
0,354-0,707	0,68	4,9	68,2	26,9	4,66	3,63
0,707-2	0,68	5,4	72	22,6	4,33	3,16
~3	0,68	6	72	22	4,49	3,66

Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju adsorpsi (*adsorption rate*) CO₂ lebih cepat dibanding CH₄. Perbedaan ini dikarenakan waktu kesetimbangan (*equilibration time*) CO₂ lebih singkat dibandingkan metana. Karbondioksida hanya membutuhkan *equilibration time* 0,5 jam untuk ukuran partikel terkecil dan 2 jam untuk ukuran partikel terbesar, sedangkan metana 1 jam untuk ukuran partikel terkecil dan 6 jam ukuran partikel terbesar. Perbedaan *equilibration time* CO₂ dan CH₄ terlihat pada gambar 4.

Kemampuan adsorpsi (*adsorption capacity*) akan turun dan laju adsorpsi (*adsorption rate*) akan naik dengan bertambahnya ukuran partikel. Kemampuan adsorpsi akan turun jika laju adsorpsi naik. Laju adsorpsi akan naik pada ukuran partikel yang lebih besar karena adanya struktur pori (*pore structure*). Batubara dengan ukuran partikel yang lebih besar akan memiliki lebih banyak *pore structure*.

Kemampuan adsorpsi oleh batubara pada *moist sample* lebih kecil dibandingkan pada batubara *dry sample*. Indikasi perbedaan ini terlihat dari *equilibration time* yang dibutuhkan masing-masing batubara. *Equilibration time* yang dibutuhkan batubara dalam proses adsorpsi CH₄ dan CO₂ masing-masing selama 8 jam (*dry sample*) dan 45 jam (*moist sample*) serta 2 jam (*dry sample*) dan 8 jam (*moist sample*). Perbedaan ini terjadi karena batubara pada kondisi *moist sample* memiliki kandungan air yang lebih banyak dibandingkan *dry sample*. Kandungan air yang banyak mengakibatkan menurunnya sifat diffusivitas dan permeabilitas (*permeability*) gas pada saat memasuki batubara. Kondisi tertutupnya struktur batubara oleh air disebut *coal matrix swelling*.

Kemampuan adsorpsi batubara terhadap gas karbondioksida dan metana akan menurun dengan kenaikan temperatur. Semakin tinggi temperatur, maka *equilibration time* menjadi lebih singkat. *Equilibration time* CO₂ dan metana pada temperatur 32°C adalah 2 jam dan 18 jam, sedangkan pada temperatur 45 °C menjadi 1 jam dan 10 jam sehingga laju difusi (*diffusion rate*) juga menurun. *Diffusion rate* menurun maka kemampuan adsorpsi juga akan menurun.



Gambar 4. *Equilibration time* CO₂ dan CH₄ pada berbagai ukuran partikel batubara (Busch dkk, 2004)

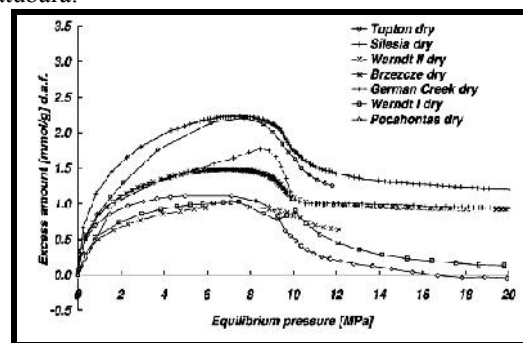
Siemons dan Busch (2007) telah memprediksi kemampuan adsorpsi batubara terhadap CO₂ pada kondisi *supercritical* CO₂ (*ScCO₂*) yaitu tekanan CO₂ diatas 5 MPa. Pengujian dilakukan pada temperatur 45°C dan tekanan maksimal CO₂ adalah 20 MPa. Batubara yang digunakan berasal dari Great Britain, Germany, Polandia, Australia dan USA (lihat tabel 2.4) pada kondisi kering dan kondisi lembab. Untuk pengujian kondisi kering, serbuk batubara terlebih dahulu dikeringkan melalui proses pemanasan selama 1,5 jam pada temperatur 105°C. Batubara diuji pada ukuran partikel < 0,2 mm. Karakteristik batubara seperti dalam table 3.

Tabel 3. Karakteristik batubara Great Britain, Germany, Polandia, Australia dan USA (Siemons dan Busch, 2007)

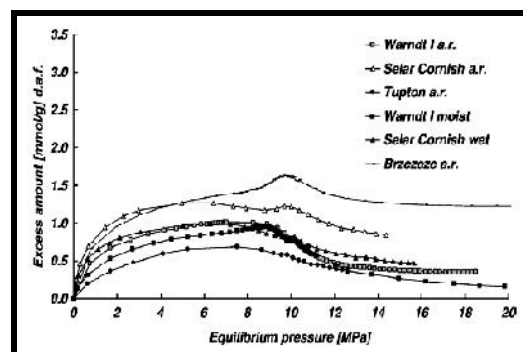
Sample name	Lab.	Origin	Grain size (mm)	M _{fr} [%]	R _{rank}	Vitrinite [%]	Inertinite [%]	Liptinite [%]	Ash [%]	Moisture (a.s) [wt.%]	Moisture (b.c.s) [wt.%]
Tuption	PLD	GB	0,06-0,11	0,5	I+b+C	67,2	23,0	6,2	3,0	11,5	n.a.
Silesia	RWTF1	POL	<0,2	0,68	I+b+S	70,0	24,0	7,0	21,1	n.a.	n.a.
Warndt I	RWTF1	GER	<0,2	0,78	I+b+S	79,4	10,3	10,3	3,1	0,78	0,72
Warndt II	PLD	GB	0,06-0,11	0,7	I+b+S	74,4	15,6	9	0,1	n.a.	n.a.
Brzezece	RWTF1	POL	<0,2	0,81	I+b+S	15,0	71,0	14,0	18,4	n.a.	n.a.
German Creek	RWTF1	AUS	<0,2	1,4	r+b	78,6	21,4	<0,1	22,1	n.a.	n.a.
Pocahontas	RWTF1	USA	<0,15	1,61	I+b	89	10	1	0,4	n.a.	n.a.
Selder Cornish	PLD	GB	0,06-0,11	2,4	Sen amik	73,6	24,6	0	3,1	0,7	29,3

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kemampuan adsorpsi CO₂ oleh batubara pada kondisi kering lebih tinggi dibandingkan pada kondisi lembab dengan kemampuan maksimum sebesar 2,2 mmol/gr batubara. Terjadi penurunan adsorpsi secara tajam (*sharp decrease*) oleh batubara pada kondisi dan secara perlahan (*smooth decrease*) oleh batubara kondisi lembab pada tekanan 8 - 10 MPa. Kondisi ini disebut *non-linearity effects in the near critical region*.

Penurunan adsorpsi yang cukup tajam pada tekanan 8 - 10 MPa diakibatkan oleh pengaruh densitas CO₂. Setelah melewati tekanan kritis CO₂ (7,38 MPa), maka densitas CO₂ akan mengalami kenaikan sampai 0,1%. Bertambahnya densitas CO₂ menyebabkan terjadinya penurunan jumlah gas CO₂ yang memasuki struktur batubara.



Gambar 5. Adsorpsi CO₂ oleh batubara kondisi kering (Siemons dan Busch, 2007)



Gambar 6. Adsorpsi CO₂ oleh batubara kondisi lembab (Siemons dan Busch, 2007)

Saghafi dkk (2007) melakukan penelitian untuk memprediksi kapasitas adsorpsi CO₂, difusivitas (*diffusivity*) CO₂ dalam hal ini koefisien difusi (*diffusion coefficient*) dan porosity batubara pada kondisi CO₂ *sub-critical* (tekanan 6 MPa dan temperatur 39°C). Batubara yang digunakan berasal dari cekungan Sydney Australia dengan peringkat *sub bituminous - bituminous* dengan nilai vitrinit reflektan

0,66 - 1,45%. Batubara berasal dari 17 lapisan pada kedalaman yang bervariasi dari 27 - 732 m seperti pada tabel 4.

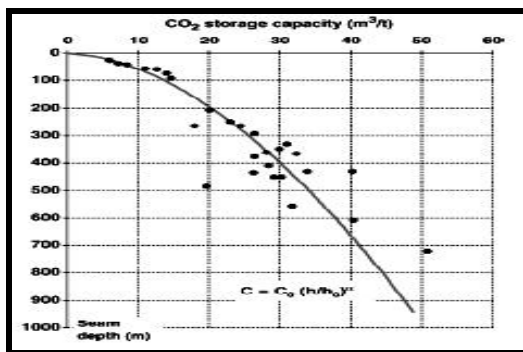
Tab 4. Karakteristik batubara cekungan Sydney Australia (Saghafi dkk2007)

Details of Sydney Basin coal samples studied in adsorption processes				Coal properties and density analysis					
Coal sample	Seam code	Location code	Seam depth (m)	Vitrinite ^a reflectance (%)	Moisture (%)	Volatile matter (%)	Fixed carbon (%)	Ash yield (wt%)	Coal density (t/m ³)
Coal1 ^b	Seam1	Lec1	268.0	11.94	4.6	11.4	46.8	29.0	1.28
Coal2 ^b	Seam1	Lec2	264.0	11.21	4.0	11.9	42.7	21.4	1.27
Coal3	Seam1	Lec3	430.0	1.39	0.4	21.0	66.4	12.2	1.49
Coal4	Seam2	Lec4	220.0		4.1	24.4	31.3	9.6	1.37
Coal5	Seam6	Lec5	207.0		7.6	27.1	56.4	14.7	1.38
Coal6	Seam2	Lec6	365.6		0.6	24.2	46.9	8.3	1.35
Coal7	Seam7	Lec7	137.0		0.6	31.1	32.1	11.6	1.33
Coal8	Seam7	Lec8	293.9	0.73	5.1	33.9	52.7	7.3	1.34
Coal9	Seam8	Lec9	348.9	0.68	3.5	32.1	55.8	5.0	1.33
Coal10	Seam13	Lec10	377.9	0.96	3.4	30.2	46.8	19.8	1.43
Coal11	Seam14	Lec11	419.4	0.77	7.9	31.8	31.8	11.8	1.33
Coal12	Seam1	Lec12	409.0	1.22	0.7	25.9	45.3	8.2	1.34
Coal13	Seam2	Lec13	722.5	1.45	0.3	22.1	62.3	14.8	1.45
Coal14	Seam1	Lec14	302.0		1.2	28.9	46.3	5.3	1.34
Coal15	Seam1	Lec15	434.0	1.34	1.2	33.0	56.2	6.6	1.34
Coal16	Seam1	Lec16	450.0	0.99	1.2	25.7	44.0	9.1	1.44
Coal17	Seam6	Lec17	45.5	0.76	7.5	34.7	11.4	8.7	1.34
Coal18	Seam6	Lec18	57.3	0.81	3.0	26.0	26.1	24.2	1.35
Coal19	Seam10	Lec19	60.5	0.85	2.5	30.0	55.4	11.3	1.35
Coal20	Seam11	Lec20	73.3	0.73	2.8	32.6	32.6	11.0	1.32
Coal21	Seam17	Lec21	431.0	0.91	1.6	27.6	47.8	8.4	1.41
Coal22	Seam13	Lec22	57.2	0.88	1.4	26.8	44.6	27.2	1.36
Coal23	Seam16	Lec23	25.8	0.66	4.6	34.2	54.9	5.1	1.36
Coal24	Seam14	Lec24	57.5	0.82	7.5	30.4	31.5	15.9	1.41
Coal25	Seam1	Lec25	450.0	1.30	1.0	14.8	71.4	8.8	1.41
Coal26	Seam1	Lec26	485.0	1.30	0.5	12.4	25.7	57.0	1.37
Coal27 ^c	Seam17	Lec27	41.0	0.81	3.2	24.2	33.0	21.6	1.33

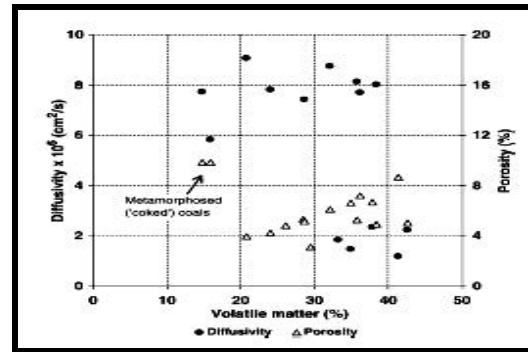
Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi CO₂ berkisar antara 6-51 m³/ton batubara. Kapasitas adsorpsi akan dipengaruhi oleh kedalaman lapisan batubara (*seam depth*). Semakin dalam lapisan batubara maka kapasitas adsorpsi akan semakin besar seperti terlihat pada gambar 7.

Porositas (*porosity*) batubara akan turun dengan berkurangnya *volatile matter contents*. Selain itu, semakin banyak *volatile matter* maka difusivitas CO₂ akan menurun seperti terlihat pada gambar 8.

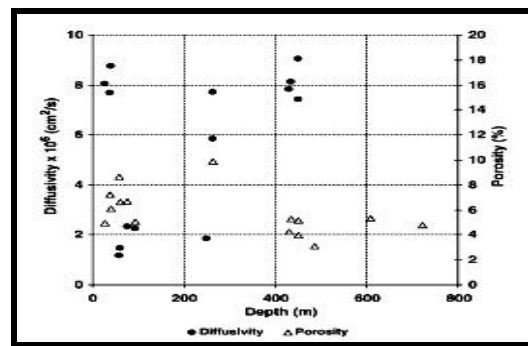
Tidak ada hubungan yang pasti antara koefisien difusi CO₂ dan kedalaman atau peringkat batubara. Nilai koefisien difusi CO₂ berkisar antara 1,2×10⁻⁶ cm²/s s.d. 10,2×10⁻⁶ cm²/s seperti pada gambar 8.



Gambar 7. CO₂ storage capacity batubara cekungan Sydney pada berbagai kedalaman (Saghafi dkk, 2007)



Gambar 8. Diffusivitas CO₂ dan porositas batubara cekungan Sydney berdasarkan kandungan *volatile matter* (Saghafi dkk, 2007)



Gambar 9. Diffusivitas CO₂ dan porositas batubara cekungan Sydney berdasarkan kedalaman batubara (Saghafi dkk, 2007)

Siemons dkk (2007) telah melakukan penelitian untuk mengetahui laju adsorpsi (*rate of adsorption*) CO₂ oleh batubara Selar Cornish dan Tupton pada temperatur pengujian 45°C (lihat tabel 2.5). Batubara diuji pada beberapa ukuran partikel yaitu 0,04 - 0,06 mm, 0,06 - 0,18 mm, 0,35 - 0,71 mm dan 0,71 - 2,0 mm. Pengujian batubara dilakukan pada kondisi *dry sample* dan *moist sample*.

Tabel 5. Karakteristik batubara Selar Cornish dan Tupton (Siemons dkk, 2007)

Coal properties	Rank	
	Tupton hvbC	Selar Cornish Semi-anthracite
Vmax [%]	0.53	2.41
Vitrinite [%]	67.2	73.6
Liptinite [%]	9.2	0
Inertinite [%]	23.6	24.6
Minerals [%]	3.0	1.8
Volatile Matter (w.f.) [%]	34.9	10.4
Fixed carbon (d.a.f.) [%]	64.7	89.3
Calorific value [MJ/m ³]	26.7	33.7
Carbon [%]	70.6	85.7
Hydrogen [%]	5.2	3.4
Nitrogen [%]	2.0	1.6
Sulfur [%]	0.5	0.7
Oxygen [%]	5.6	5.6
Micropore volume [cm ³ /g]	0.083	0.071

Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses adsorpsi (*adsorption process*) dapat dikelompokkan dalam dua proses yaitu proses cepat (*fast process*) dan proses lambat (*slow process*). Pengelompokan ini berdasarkan waktu adsorpsi (*adsorption time*) yang dibutuhkan oleh batubara. Proses adsorpsi dikatakan *fast process* jika waktu adsorpsi berkisar 0,01 s.d. 0,2 jam sedangkan *slow process* berkisar 0,8 s.d. 2 jam. *Slow process* membutuhkan waktu 10 kali lebih lama dari *fast process*. Jumlah gas yang teradsorpsi pada *fast process* lebih sedikit dibanding pada *slow process* seperti pada gambar 10. Batubara pada kondisi *dry sample* dan kondisi *moist sample* memiliki kecenderungan sifat yang hampir sama. Perbedaan hanya terjadi pada kapasitas adsorpsi dimana batubara kondisi *dry sample* akan menyerap lebih banyak sekitar 20% dibandingkan kondisi *moist sample*. Adsorpsi akan mencapai nol pada tekanan 7 MPa untuk kondisi lembab dan pada tekanan 8 MPa untuk kondisi kering.

IV. KESIMPULAN

1. Kemampuan adsorpsi batubara terhadap gas rumah kaca akan turun dengan bertambahnya ukuran partikel batubara. Semakin kecil ukuran partikel batubara, maka kemampuan adsorpsi akan semakin meningkat.
2. Peringkat batubara akan berpengaruh terhadap kemampuan adsorpsi gas rumah kaca. Semakin tinggi peringkat batubara, maka kemampuan adsorpsi akan semakin meningkat.
3. Tingkat kelembaban (*moisture*) akan mempengaruhi peringkat batubara dan kemampuan adsorpsi CO₂. Semakin kecil tingkat kelembaban (*moisture*), maka kemampuan adsorpsi gas rumah kaca akan semakin meningkat.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Busch, A., Gensterblum, Y., Krooss, B.M., 2003b, "Metanae and CO₂ Sorption and Desorption Measurements on Dry Argonne Premium Coals: Pure Components and Mixtures", International Journal of Coal Geology 55, hal:205-224.
- [2] Busch, A., Gensterblum, Y., Krooss, B.M., Littke, R., 2004, "Metanae and Carbon Dioxide Adsorption/Diffusion Experiments on Coal: An Upscaling and Modeling Approach", International Journal of Coal Geology 60, hal: 151-168.
- [3] Busch, A., 2005, "Thermodynamic and Kinetic Processes Associated with CO₂-Sequestration and CO₂-Enhanced Coalbed Metanae Production

- from Unminable Coal Seams", PhD-thesis, RWTH Aachen University.
- [4] Busch, A., Gensterblum, Y., Krooss, B.M., Siemons, N., 2006, "Investigation of High-Pressure Selective Adsorption/Desorption Behaviour of CO₂ and CH₄ on Coals: An Experimental Study", International Journal of Coal Geology 66, hal: 53-68..
 - [5] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2005, "Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage", Cambridge University Press, 431.
 - [6] Saghafi A., Faiz, M., D. Roberts, D., 2007, "CO₂ storage and gas diffusivity properties of coals from Sydney Basin, Australia", International Journal of Coal Geology 70, hal : 240-254.
 - [7] Siemons, N., Wolf, K.H., Bruining, J., 2007, "Interpretation of carbon dioxide diffusion behavior in coals", International Journal of Coal Geology 72, hal: 315-324
 - [8] www.esdm.go.id
 - [9] ww.globalwarming.org