

Bioadsorben sebagai Media Penyimpanan Gas dalam Tabung ANG (*Adsorbed Natural Gas*)

Oleh: Rudy Indharto¹⁾, Lus yana²⁾ dan Yusep K Caryana³⁾

¹⁾ Pengkaji Teknologi, ²⁾ Peneliti Pertama, ³⁾ Peneliti Muda pada Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi "LEMIGAS"

Jl. Ciledug Raya Kav. 109, Cipulir, Kebayoran Lama, P.O. Box 1089/JKT, Jakarta Selatan 12230 INDONESIA

Teregistrasi I Tanggal 9 Februari 2009; Diterima setelah perbaikan tanggal 17 Juli 2009

Disetujui terbit tanggal: 16 September 2009

S A R I

Dengan adanya program pemerintah tentang pengalihan penggunaan Bahan Bakar Minyak (BBM) ke Bahan Bakar Gas (BBG) telah mendorong banyak sektor untuk menggunakan Bahan Bakar Gas baik dari sektor industri, transportasi maupun rumah tangga.

Akan tetapi Bahan Bakar Gas yang saat ini menggunakan tabung CNG (*Compressed Natural Gas*) mempunyai beberapa kelemahan, salah satunya adalah tingginya tekanan dalam tabung (200 bar). Saat ini tabung ANG (*Adsorbed Natural Gas*) dapat digunakan untuk mengatasi kelemahan tersebut, pada tekanan yang relatif lebih rendah sekitar 500 psi, tabung ANG mempunyai volume penyimpanan hampir setara dengan tabung CNG. Tabung ANG terdiri dari adsorben karbon aktif dan lapisan pelindung, biasanya aluminium.

Karakteristik penyimpanan/pelepasan gas bumi dari tabung ANG tergantung dari sifat-sifat adsorben karbon aktif penyusunnya. Kinerja adsorpsi/desorpsi karbon dapat diketahui melalui parameter massa jenis, kekuatan tekan, tahanan listrik dan luas permukaan karbon. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tabung ANG akan memiliki kinerja yang baik jika adsorpsi/desorpsi gas bumi pada karbon aktif memiliki kapasitas atau laju yang tinggi. Kapasitas adsorpsi gas bumi yang tinggi dalam karbon aktif terjadi jika karbon aktif memiliki massa jenis, luas permukaan dan kekuatan tekan yang tinggi serta memiliki hambatan listrik paling rendah. Parameter kinerja karbon aktif sangat bergantung pada proses pembuatannya. Luas permukaan akan tinggi jika butiran karbon aktif dibuat pada ukuran nano. Massa jenis dan kekuatan kompresi yang tinggi serta hambatan listrik yang rendah terbentuk jika karbon aktif dibuat melalui tahapan kompresi dan waktu pemanasan yang relatif lama.

Kata kunci : bioadsorben, karbon aktif, bahan bakar gas.

ABSTRACT

With the launching of governmental program for oil fuel (BBM) to gas fuel (BBG) conversion has pushed many sector to use the gas fuel either industrial sector, transportation and also household.

However, gas fuel which in this time uses CNG (Compressed Natural Gas) tank having some weaknesses i.e. the tank pressure is high. In this time the ANG (Adsorbed Natural Gas) tank is applicable to overcome the weakness where at pressure relatively lower than 500 psia, the ANG tank has volume equivalent to CNG tank. ANG tank consists of adsorbent from active carbon and wrapped by aluminium.

The characteristics of gas adsorption/desorption in ANG tank depend on properties of the active carbon adsorbent. Adsorption/desorption performance can be known from parameter such as density, compressive strength, electric resistivity and surface area of car-

bon. ANG tank will have a good performance if gas adsorption/desorption in active carbon has high capacity. In addition, gas adsorption capacity will be high if active carbon's density, surface area and compressive strength is high and electric resistivity is low. Performance parameter of active carbon depend on the making process. Surface area will be high if active carbon's particle is at nano level size. To get high density and compressive strength and low electric resistivity of active carbon, compression stages and log time of heating should be applied.

Key words : bioadsorbent, active carbon, compressed natural gas

I. PENDAHULUAN

Cadangan minyak bumi yang terus menurun telah mendorong pencarian energi alternatif yang dapat mensubstitusi bahan bakar minyak. Salah satu energi alternatif yang dapat digunakan adalah Bahan Bakar Gas (BBG). Harga Bahan Bakar Gas itu sendiri meskipun tanpa subsidi tetap lebih murah bila dibandingkan dengan bahan bakar minyak.

Saat ini sebagian transportasi di Indonesia sudah menggunakan BBG namun penggunaannya masih belum populer disebabkan tabung BBG seperti tabung CNG (*Compressed Natural Gas*) mempunyai beberapa kelemahan di antaranya ukuran tabung besar dan berat, tekanan dalam tabung sangat tinggi (sekitar 150-200 bar) dan kapasitas pengisian tabung yang terbatas.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut dapat digunakan tabung *Adsorbed Natural Gas* (ANG). Tabung ANG adalah tabung gas yang berisi adsorben sebagai penyerap dan penampung gas di dalam tabung dengan tekanan tertentu. Dengan adanya adsorben dalam tabung maka kapasitas pengisian tabung akan bertambah besar, sehingga untuk mendapatkan kapasitas pengisian yang sama tekanan yang diperlukan lebih kecil daripada tabung CNG pada umumnya.

Bahan yang digunakan sebagai adsorben dalam tabung adalah karbon aktif yang dapat dibuat dari bahan fiber alami (bioadsorben) seperti limbah tongkol jagung dan tempurung atau sabut kelapa yang diproses menjadi briket karbon.

Briket karbon ini mempunyai pori berukuran nano dan dengan adanya gaya Van der Waals pada dinding pori maka molekul gas metana dapat diadsorb lalu dimampatkan dalam pori hingga mencapai *high density fluid*.

Briket karbon dapat menampung sekitar 118 gram gas metana per satu liter karbon pada tekanan 500 psi¹⁾.

II. METODOLOGI

Dalam penelitian pembuatan bioadsorben ini, agar mendapatkan hasil yang optimal maka perlu dilakukan tahapan metodologi seperti yang digambarkan dalam diagram alir berikut ini.

Metode penelitian dimulai dengan pembuatan karbon aktif yang berkinerja tinggi karena karbon tersebut akan digunakan sebagai bioadsorben yang menyimpan gas metana. Kegiatan yang dilakukan untuk mendapatkan karbon aktif dengan kinerja tinggi adalah proses aktivasi dan modifikasi permukaan karbon. Karbon aktif yang telah dibuat dilanjutkan dengan karakterisasi untuk mengetahui sifat karbon seperti sifat hidrofobik dan volume pori karbon. Bila karbon sudah mempunyai spesifikasi karbon aktif yang berkinerja tinggi maka pada karbon dilakukan pengujian seperti uji sifat fisik/mekanik dan uji kapasitas adsorpsi. Dengan tercapainya sifat fisik/mekanik dan kapasitas adsorpsi seperti yang



Gambar 1
Metode penelitian adsorben karbon aktif
penyimpanan gas bumi

diinginkan maka dibuatlah tabung baja sebagai *casing* untuk membentuk tabung ANG.

III. PROSES PEMBUATAN KARBON AKTIF

Hampir semua material mengandung karbon yang berpotensi untuk dibuat karbon aktif. Umumnya bahan baku yang cocok adalah batubara (antrasit, aspal dan batubara muda), tongkol jagung, tempurung kelapa, kayu (lembut dan keras), gemuk dan minyak residu. Bahan baku lainnya yang juga dapat digunakan adalah kulit kenari, persik, kulit kacang babassu dan palm karnel namun secara komersial bahan baku ini kurang banyak tersedia. Sebagai gambaran 1000 ton bahan baku jenis tempurung kelapa hanya akan menghasilkan sekitar 100 ton karbon aktif yang berkualitas. Atau dapat dikatakan hanya 1/10 dari bahan baku jumlah karbon aktif yang dapat diperoleh.

Material karbon mempunyai porositas tertentu dan luas permukaan internal (*internal surface area*) sekitar 10-15 m²/g. Selama pengaktifan, volume pori menjadi lebih luas dengan pengendalian oksidasi atom karbon yang umumnya dilakukan dengan pemanasan pada temperatur tinggi. Setelah pengaktifan, luas permukaan internal karbon meningkat antara 700 sampai 1200 m²/g, tergantung pada proses pengaktifan^{2,4}).

Agar material karbon dapat berfungsi sebagai adsorben maka luas permukaan internal harus dapat dilalui uap air atau cairan. Jadi, dalam pengaktifan karbon yang diperlukan tidak hanya peningkatan luas *internal surface* tetapi juga jaringan pori-pori sebagai tempat masuknya fluida. Berdasarkan IUPAC, ukuran diameter pori dapat dibagi dalam tiga golongan yaitu^{3,5}):

- Mikropori 2 - 20 Ångstrom
- Mesopori 20- 50 Ångstrom
- Makropori > 50 Ångstrom

Semua karbon aktif mempunyai pori mikropori, mesopori dan makropori di dalam struktur dengan proporsi berbeda-beda tergantung bahan baku pembuat karbon.

Karbon dari tempurung kelapa didominasi oleh mikropori mencapai 95% dari luas permukaan internal yang tersedia. Struktur seperti ini ideal untuk adsorpsi fluida dengan berat molekular rendah dan konsentrasi zat pelarut rendah. Karbon dari gemuk kayu didominasi oleh struktur mesopori atau

makropori, sehingga cocok untuk adsorpsi fluida yang mempunyai berat molekular besar.

Bahan dasar karbon aktif yang saat ini dikembangkan di beberapa negara untuk adsorben berasal dari bahan fiber alami (*natural fiber*) seperti tongkol jagung (*corn cob*), kayu dan tempurung kelapa (*coconut shell*). Mengingat Indonesia adalah negara agraris maka banyak sumber bahan baku yang dapat dibuat menjadi bioadsorben untuk tabung ANG.

Untuk memperoleh kinerja adsorben tabung ANG yang optimal perlu dipilih bahan dasar karbon aktif beserta perekat yang sesuai untuk pembentukan adsorben sebagai media penyimpanan BBG dengan tekanan rendah. Berikut ini akan dibahas proses pembuatan bioadsorben mulai dari karbon aktif hingga menjadi briket karbon.

A. Proses pembuatan Karbon Aktif^{6,7}

Karbon aktif yang akan digunakan sebagai adsorben dapat diproduksi dengan *steam* maupun bahan kimia pengaktif, di mana proses pengaktifan untuk kedua cara tersebut dilakukan pada temperatur tinggi.

Pengaktifan dengan bahan kimia dilakukan melalui pengeringan atau penurunan kadar selulosa sehingga dapat merubah struktur bahan baku sedangkan pengaktifan dengan *steam*, diawali dengan penguapan dan diikuti oleh oksidasi struktur atom karbon.

1. Pengaktifan dengan Bahan kimia

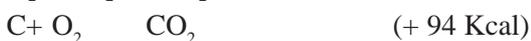
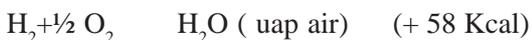
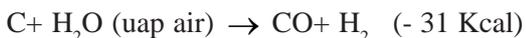
Bahan baku yang digunakan dalam metode ini adalah serbuk gergaji dan asam fosfat sebagai agen aktivasinya, meskipun dapat pula menggunakan asam belerang atau klorida seng.

Bahan baku dan bahan aktivasi dicampur sehingga menjadi suatu pasta, lalu dikeringkan dan dikarbonisasi pada suhu 600°C. Dengan asam fosfat (H₃PO₄) sebagai agen aktivasi, produk yang telah dikarbonisasi dipanaskan lebih lanjut pada suhu 800-1000°C hingga karbon menjadi bersifat asam. Asam dihilangkan setelah pengaktifan dan dikembalikan ke kondisi semula seperti sebelum digunakan. Karbon aktif yang terbentuk dicuci dengan air dan dikeringkan untuk menghilangkan sifat asam tersebut.

Keaktifan karbon dapat dikontrol dengan mengatur proporsi bahan baku dan agen aktivasi antara 1:0,5 sampai 1:4. Aktivitas akan meningkat dengan memperbesar konsentrasi agen aktivasi walaupun temperatur dan waktu tetap.

2. Pengaktifan dengan Steam

Penggunaan uap air untuk pengaktifan dapat diberlakukan pada hampir semua bahan baku karbon. Berbagai metode telah dikembangkan dengan prinsip dasar sama yaitu karbonisasi pada suhu 500-600°C dan dilanjutkan dengan pemanasan kembali menggunakan steam pada suhu 800-1100°C. Karena keseluruhan reaksi yang terjadi (mengubah karbon ke karbondioksida) bersifat eksotermis maka panas yang dihasilkan dapat digunakan sebagai energi untuk proses selanjutnya.



B. Penghalusan Karbon Aktif^{8,9)}

Karbon aktif yang telah diperoleh melalui proses di atas perlu dilanjutkan dengan penghalusan (*grinding*) untuk mendapatkan karbon aktif dengan bentuk *powder*. Tujuannya adalah untuk memperbesar luas permukaan karbon aktif.

Proses penghalusan dilakukan dengan menggunakan

Sampel	Berat sampel (gram)	RPM	Waktu uji (jam)	Hasil uji (nm)
A1	50	150	100	632
A2	50	150	50	635
A3	50	150	150	523

machine yang dapat penghalusan yang meter seperti seperti (M) dan waktu putar

alat Ball Mill tersebut. Dalam Tabel 1 berikut ini ditunjukkan hasil penghalusan karbon aktif yang terbuat dari tempurung kelapa dengan variasi waktu putar alat.

Berdasarkan Tabel 1 diketahui bahwa semakin lama waktu putar alat maka ukuran partikel karbon aktif yang diperoleh semakin kecil.

C. Pembuatan Briket Karbon

Untuk mendapatkan briket karbon dari karbon aktif yang telah dihaluskan yang berasal dari tempurung kelapa atau tongkol jagung dilakukan dengan tahapan sebagai berikut^{1,10,11)} :

1. Karbon aktif halus dicampur dengan asam fosfat (H₃PO₄) dan ditambahkan air sebanyak 50%
2. Campuran dimasukkan ke dalam oven dan dipanaskan dengan temperatur rendah selama beberapa jam sebagai langkah awal proses karbonisasi

3. Karbon didinginkan beberapa saat dan dipanaskan kembali untuk yang kedua kalinya dengan panas yang lebih tinggi. Selama proses tahap kedua ini gas nitrogen dipompa kedalam campuran untuk menjaga agar karbon tidak terbakar
4. Karbon didinginkan kembali lalu dicuci dengan air untuk menghilangkan asam fosfat yang menempel dan dilanjutkan dengan pengeringan dalam oven.
5. Karbon yang telah kering dihaluskan untuk mendapatkan serbuk karbon aktif yang sangat halus.
6. Serbuk karbon aktif dicampur dengan bahan pengikat (*binder*) dan selanjutnya *dipress* dengan tekanan dan temperatur tinggi menjadi briket yaitu pada tekanan 500 MPa dan temperatur 200-



Gambar 2
Planetary Ball Mill Machine

Tabel 1
Hasil penghalusan karbon aktif dengan variasi waktu uji

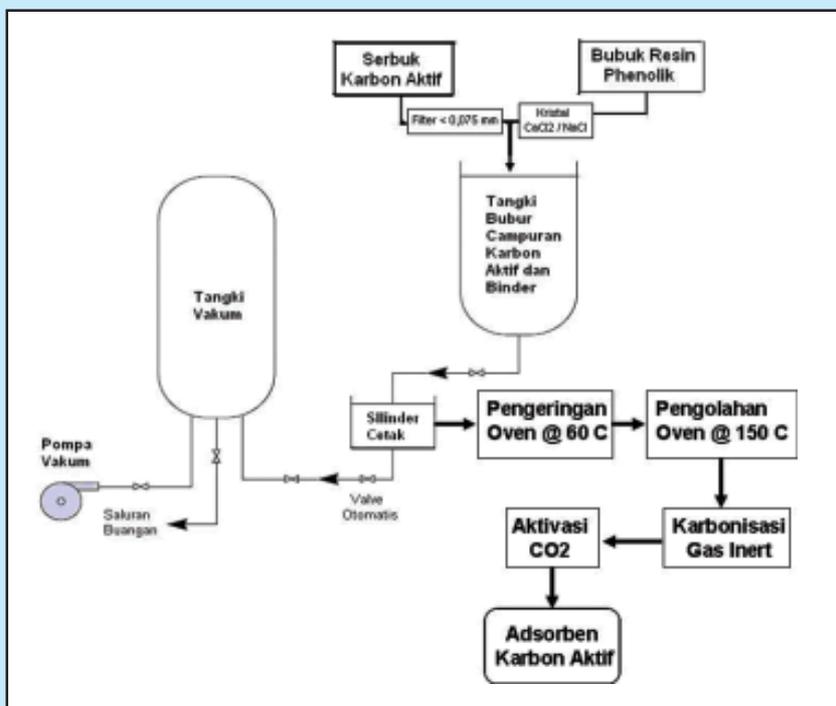
- 300°C secara bertahap untuk mendapatkan kerapatan massa adsorben yang stabil
7. Jika stabilitas kerapatan massa telah dicapai, maka selanjutnya sampel adsorben dikeringkan dalam oven pada temperatur 60°C lalu diproses kembali di dalam oven pada temperatur 150 °C untuk menghilangkan sisa-sisa uap air
 8. Adsorben dikarbonisasi pada lingkungan gas inert pada temperatur 650°C untuk kemudian diaktivasi di lingkungan karbondioksida (CO₂) pada temperatur 800-900°C
 9. Adsorben atau briket karbon didinginkan.

Untuk lebih jelasnya pada Gambar 3 ditunjukkan proses dan rangkaian peralatan yang digunakan dalam pembuatan briket dari serbuk karbon aktif.

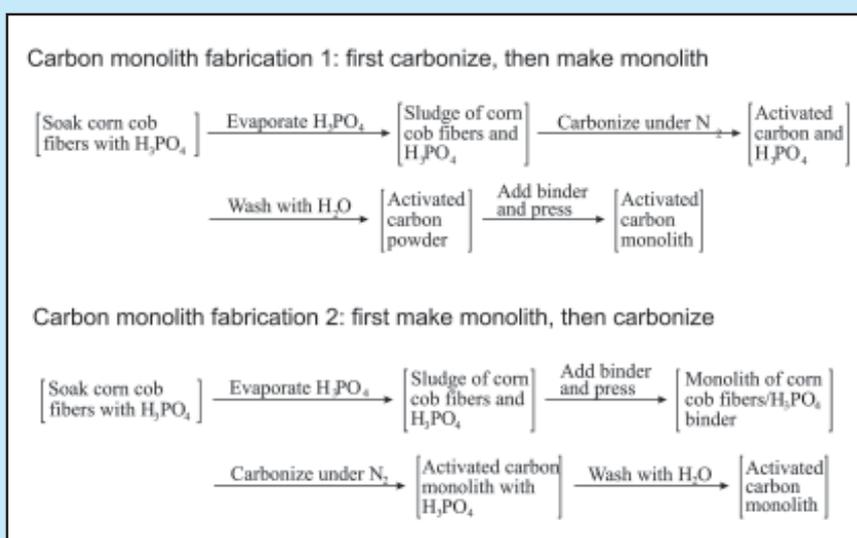
Dalam pembuatan briket, jumlah *binder* yang dicampurkan sangat menentukan kualitas briket karena akan berpengaruh pada densitas briket di mana densitas briket akan menentukan jumlah ruang kosong (porositas) pada briket karbon.

Sebenarnya terdapat dua metode pembuatan briket karbon. Metode pertama dengan proses karbonisasi kemudian dilanjutkan dengan pembuatan *monolith*/briket seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Metode yang kedua yaitu dengan pembuatan *monolith* dulu baru kemudian dilakukan proses karbonisasi

dari *monolith*/briket tersebut. Secara skematis kedua metode pembuatan briket karbon diperlihatkan pada gambar 4 berikut ini.



Gambar 3
Peralatan pembuatan Briket Karbon dari Serbuk



Gambar 4
Skema Tahapan Pembuatan Briket karbon / *monolith*¹⁾

Dalam proses pencetakan briket ini memerlukan alat *press* dengan kekuatan yang sangat besar, yaitu mencapai 150 ton yang dilengkapi dengan alat pencetaknya (*mold*) sesuai dengan ukuran briket yang akan dibuat yang terdiri dari *die* dan *piston*, sehingga didapat hasil cetakan yang presisi dan kuat. Gambar alat *press* sebagai pencetak briket karbon dapat dilihat pada Gambar 5 di bawah ini.

Hasil pembuatan briket karbon untuk setiap tahap mulai dari bahan baku terlihat pada Gambar 6 di mana bahan baku yang digunakan adalah tongkol jagung. Pada Gambar 7 juga terlihat hasil akhir bentuk briket karbon yang diperoleh yang akan digunakan sebagai adsorben dalam tabung ANG.

IV. KARAKTERISTIK BIOADSORBEN

Kualitas bioadsorben atau briket untuk mengadsorpsi atau desorpsi gas metana sangat tergantung dari karakteristik briket karbon yang diperoleh dari hasil proses karbonisasi dan kompresi. Karakteristik bioadsorben yang perlu diketahui antara lain massa jenis, kekuatan tekan (*compressive strength*), tahanan listrik dan luas permukaan karbon.

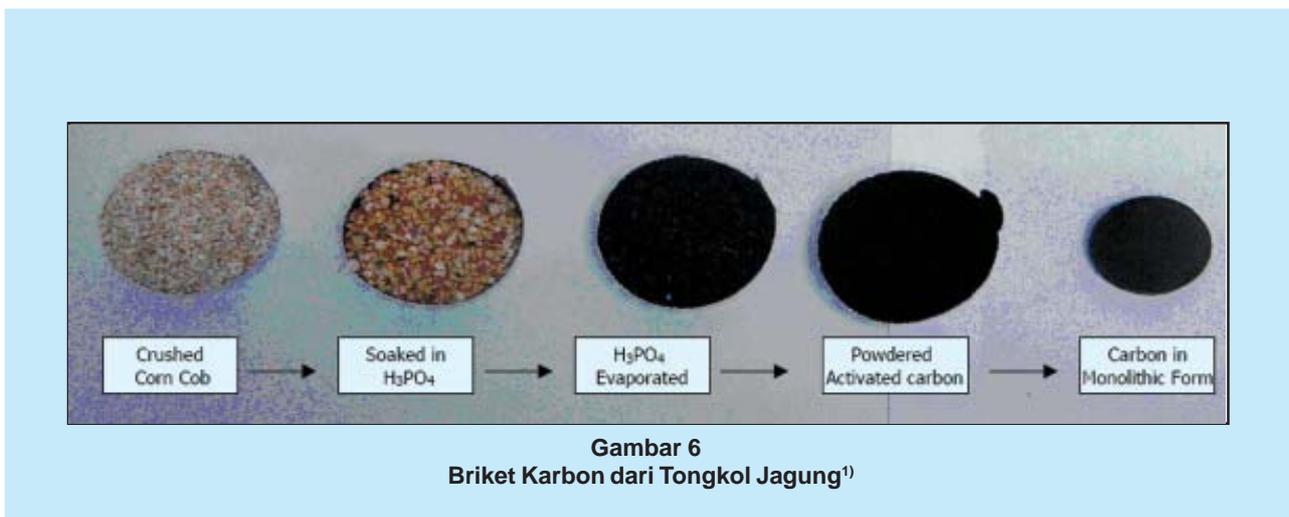
A. Massa Jenis

Massa jenis adsorben menunjukkan jumlah massa per satuan volume material

karbon aktif adsorben. Massa jenis adsorben yang tinggi akan meningkatkan kapasitas penyimpanan gas metana. Hal ini terlihat pada grafik yang ditunjukkan dalam Gambar 8.

Gambar 8 menunjukkan bahwa pada temperatur dan tekanan yang sama (3,4 Mpa dan 24 °C), adsorben dengan massa jenis yang rendah (0,49 g/cc) hanya mampu menyerap atau menyimpan gas metana sekitar 120 v/v. Sementara itu, adsorben dengan massa jenis yang lebih tinggi (0,63 g/cc) mampu menyerap atau menyimpan gas metana sekitar 146 v/v. Jadi, kapasitas penyimpanan gas dalam adsorben berbanding lurus dengan massa jenis adsorben.

Massa jenis adsorben sebenarnya terjadi secara bertahap sesuai dengan tahapan kompresi pencetakan pada saat proses pembuatan. Pada saat kompresi pertama massa jenis adsorben belum stabil, nilainya



kompresi pencetakan. Massa jenis yang stabil dengan nilai yang tetap terjadi pada tahap akhir kompresi seperti yang terlihat pada Gambar 9.

B. Kekuatan Tekan (Compressive Strength)

Stabilitas adsorben yang tinggi dengan masa pakai yang panjang merupakan sifat adsorben karbon aktif yang diinginkan. Parameter yang menunjukkan sifat stabilitas tinggi dan durabilitas yang panjang adalah *compressive strength* (kekuatan tekan).

Oleh karena itu, untuk menjamin stabilitas yang tinggi dan masa pakai yang panjang, adsorben karbon aktif harus memiliki sifat *compressive strength* yang tinggi.

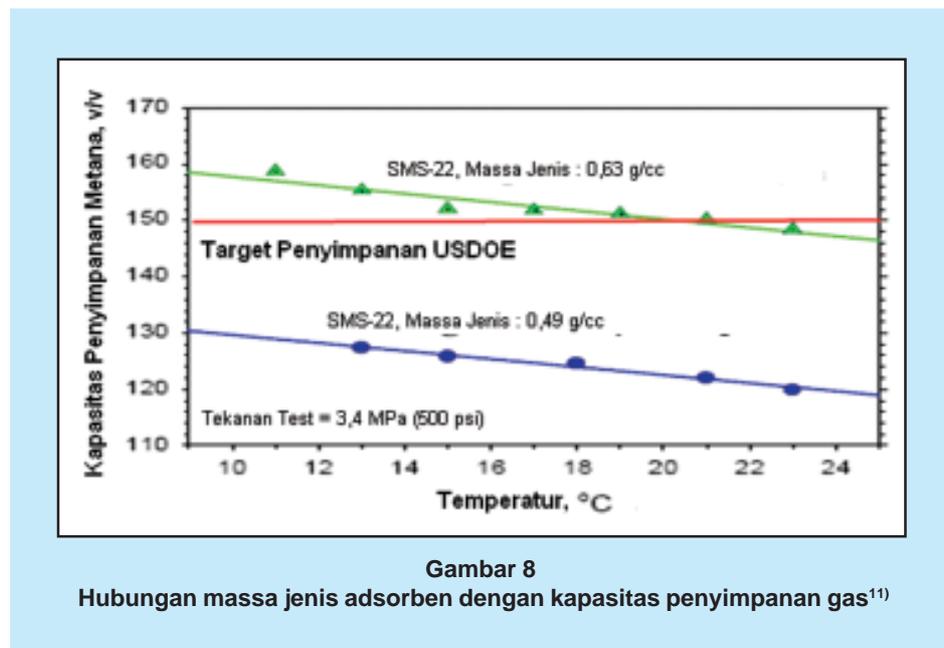
C. Tahanan Listrik (Electric Resistivity)

Dengan mengetahui resistivitas listrik dari adsorben maka akan lebih mudah dalam merancang sistem desorpsi (pelepasan) gas dari adsorben karbon aktif. Resistivitas listrik adsorben dapat diukur dengan menggunakan alat yang ditunjukkan dalam Gambar 10.

Untuk kepentingan aliran listrik yang baik maka resistivitas listrik adsorben harus sekecil mungkin. Nilai akhir dari resistivitas listrik sangat dipengaruhi oleh proses pembuatan adsorben yang akan melibatkan durasi pemanasan, tahapan kompresi pencetakan dan massa jenis. Pengaruh tahapan kompresi pembuatan adsorben terhadap resistivitas listrik adsorben digambarkan oleh grafik pada Gambar 11.

Sebagaimana terlihat pada Gambar 11, kenaikan tekanan pada berbagai tahapan kompresi pencetakan menurunkan nilai resistivitas listrik adsorben. Semakin tinggi tekanan kompresi pencetakan maka semakin kecil nilai resistivitas listrik adsorben karbon aktif. Hal ini berarti, semakin tinggi tekanan kompresi saat proses pembuatan maka akan menghasilkan adsorben karbon aktif dengan kinerja tinggi.

Sedangkan pada Gambar 12 terlihat bahwa durasi



pemanasan yang panjang selama proses pembuatan adsorben akan menurunkan resistivitas listrik yang dengan sendirinya meningkatkan kinerja adsorben karbon aktif.

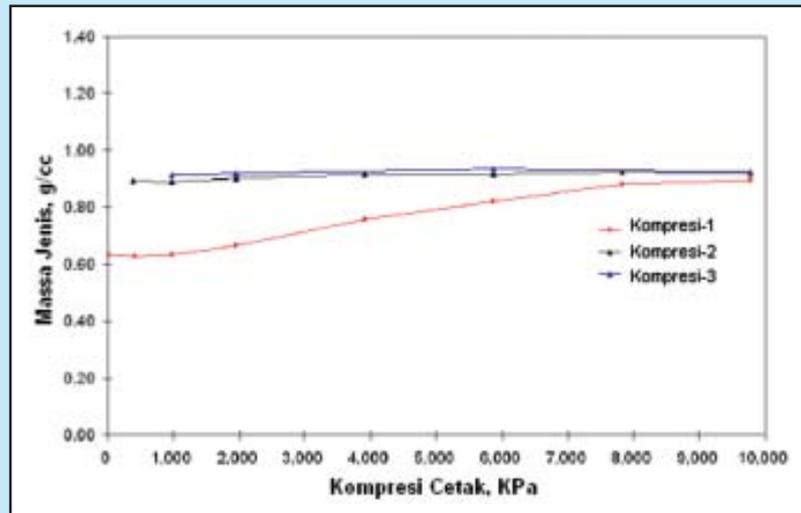
D. Luas Permukaan

Salah satu karakteristik lain yang akan menunjukkan kinerja adsorben adalah luas permukaan pori adsorben di mana semakin tinggi luas permukaan pori adsorben maka semakin baik kinerja adsorben. Semakin tinggi luas permukaan pori adsorben menunjukkan semakin kecil ukuran partikel karbon aktif. Dengan memperkecil ukuran partikel karbon

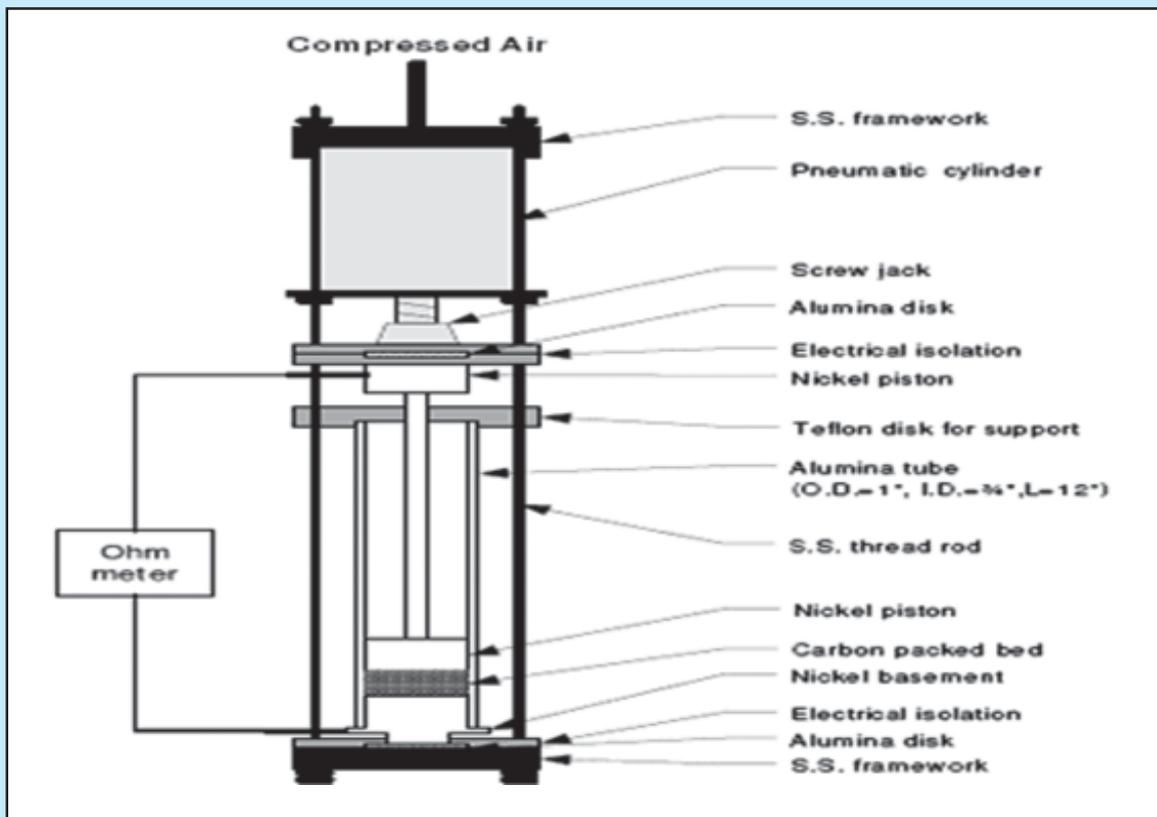
maka ukuran pori yang terbentuk di antara partikel karbon dan di dalam partikel karbon tersebut juga kecil sehingga luas permukaan pori pada adsorben akan besar. Ukuran pori karbon aktif terkecil yang diinginkan supaya adsorben memiliki kinerja yang tinggi adalah ukuran pori skala mikropori (1-2 nm). Pada Tabel 2 terlihat luas permukaan untuk beberapa bahan karbon aktif.

V. MEKANISME ADSORPSI DAN DESORPSI GAS

Proses penyimpanan gas dalam karbon aktif yang digunakan dalam tabung adalah



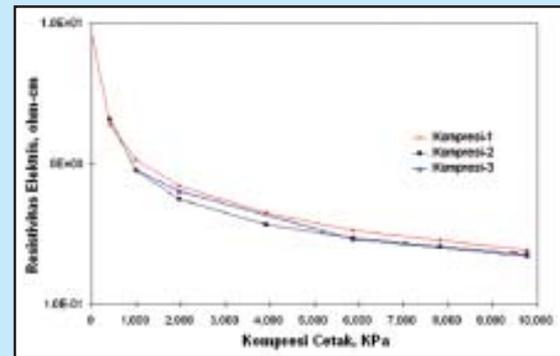
Gambar 9
Pengaruh tahapan kompresi terhadap massa jenis adsorben¹¹⁾



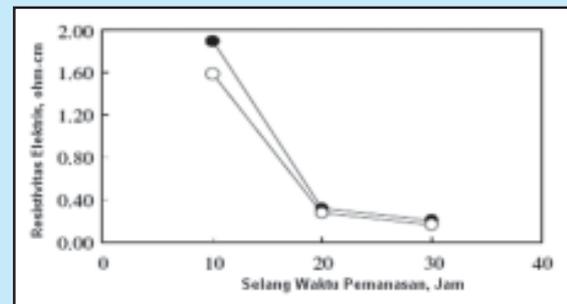
Gambar 10
Alat Pengukur Resistivitas Elektris Adsorben Karbon Aktif^{12,13)}

proses adsorpsi. Adsorpsi didefinisikan sebagai proses di mana permukaan padatan menyerap molekul gas / fluida karena proses kimia dan / atau gaya fisik. Di dalam proses adsorpsi, molekul menempel pada permukaan karbon dengan kekuatan lemah yang dikenal dengan gaya Van der Waals akibat adanya interaksi intermolekuler. Karbon aktif dapat diibaratkan suatu material yang mempunyai permukaan dengan jutaan pori seperti spons. Karbon aktif dan gas yang terserap tidak mengalami perubahan secara kimiawi.

Faktor yang sangat menentukan kemampuan briket karbon untuk mengadsorpsi gas adalah struktur pola pori atau distribusi volume pori di dalam briket. Untuk itu dalam membuat briket karbon perlu dilakukan pengujian distribusi volume pori tersebut. Penentuan jenis pola struktur pori dalam briket dilakukan dengan tiga teknik yang berbeda, di antaranya adalah *Small-Angle X-ray Scattering* (SAXS), *nitrogen desorption isotherms*, and *Scanning Electron Microscopy* (SEM). SEM digunakan untuk mengetahui secara visual struktur permukaan dan struktur pori pada bagian luar briket. Perbedaan dengan SAXS adalah bahwa struktur pori dapat terlihat pada bagian dalam pori briket. Kejelasan dan keterbatasan resolusi gambar SEM tidak dapat secara jelas membedakan nanopori. Sehingga perlu metode analisis lain yang berbeda (SAXS, *nitrogen*



Gambar 11
Pengaruh Tahapan Kompresi Terhadap Resistivitas Elektrik Adsorben¹¹⁾



Gambar 12
Pengaruh Durasi Pemanasan Terhadap Resistivitas Elektrik Adsorben¹¹⁾

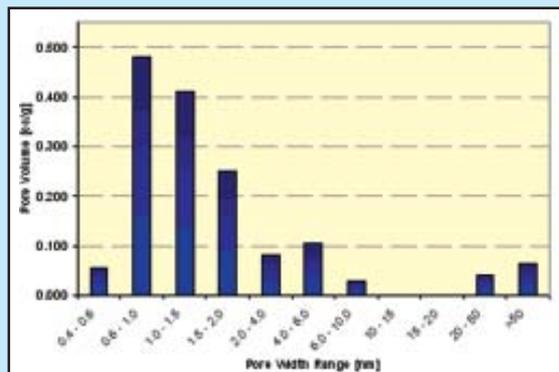
Tabel 2
Luas Permukaan Berbagai Bahan Karbon Aktif^{14,15)}

No.	Adsorben	$a_v, 10^3 \text{ m}^3$ (STP)/kg	$a_H,$ Kg/kg	$S_H, \text{ m}^2/\text{g}$	$S_{BET},$ m^2/g	$S_{DR}, \text{ m}^2/\text{g}$	$V_{DR}, 10^3$ m^3/kg	$R_{DR}, 10^8 \text{ m}$
1.	Busofit 191-5	199.9	0.0176	462	1691	2496	0.887	49.9
2.	Busofit-M2	203.9	0.0179	465	1702	2507	0.89	41.5
3.	Busofit-M4	225.1	0.0198	536	1715	2547	0.9	42
4.	Busofit-M8	252.9	0.0223	571	1939	2985	1.04	51
5.	WAC 97-03	115	0.0101	271	715	1050	0.37	33.4
6.	WAC 19-99	172.1	0.0151	393	1005	1486	0.53	41.7
7.	WAC 3-00	221.1	0.0195	575	1383	2142	0.74	50
8.	207C	209.2	0.0184	502	1300	1944	0.69	41
9.	Norit sorbonorit-3	193.8	0.0171	458	1361	2044	0.73	50
10.	Sutcliffe	236.6	0.0208	527	1925	2864	1.02	53.6

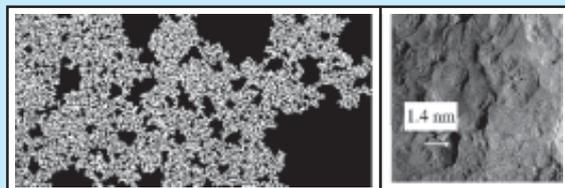
Catatan: WAC – Karbon aktif dari kayu; a_v – kapasitas simpan menggunakan *physisorption*, m^3/kg ; a_H – kapasitas simpan menggunakan *physisorption*, Kg/Kg ; S_H – luas permukaan hidrogen, m^2/g ; S_{BET} – luas permukaan BET nitrogen, m^2/g ; S_{DR} – luas permukaan metode Dubinin-Radushkevich, m^2/g ; V_{DR} – volume *micropore* metode Dubinin-Radushkevich, m^3/kg ; R_{DR} – ukuran pori metode Dubinin-Radushkevich

adsorption, dan sebagainya) yang dapat membantu untuk menganalisis sampel. Gambar 13 berikut ini menunjukkan distribusi briket dengan ukuran nano atau mikropori (<20 Å), mesopori (20 – 50 Å), dan makropori (>50 Å)⁴.

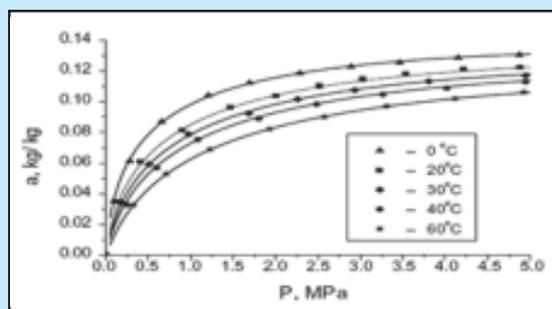
Di dalam briket karbon, struktur pori membentuk suatu pola tertentu yang berulang yang disebut dengan



Gambar 13
Distribusi volume pori dalam briket



Gambar 14
Distribusi Volume pori dan rongga pori pada briket



Gambar 15
Karakteristik adsorpsi gas metana terhadap perubahan temperatur¹⁾

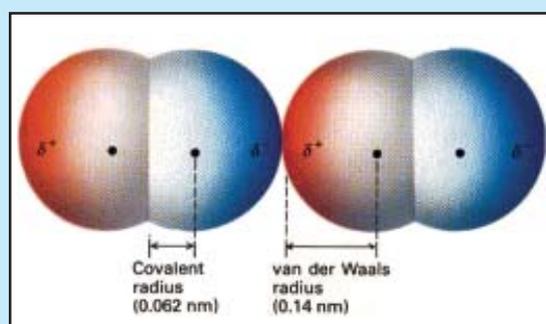
fractal, hal ini terjadi karena adanya pengelompokan butiran dan terbentuk rongga (void) di antara fractal tersebut dengan ukuran yang besar yang terdistribusi di seluruh bagian adsorben. Rongga ini adakalanya berfungsi sebagai pintu masuk (entry point) gas untuk meresap atau teradsorpsi ke pori karbon.

Gambar struktur pori briket karbon dapat dilihat pada Gambar 14 ini, di mana selain terdapat pori juga terlihat rongga-rongga pada briket¹⁾.

Saat gas metana sebagai komponen terbesar dalam BBG diadsorpsi, gas akan terjebak atau terikat oleh gaya Van Der Waals pada permukaan karbon dan pada jaringan pori karbon. Untuk jaringan/pola pori pada karbon dengan ukuran 10 – 20 Angstrom akan didapat efek yang bagus untuk adsorpsi. Dengan range ukuran pori seperti itu, gaya Van Der Waals akan membuat gas metana yang tersimpan dalam pori menjadi seperti liquid dengan densitas sangat tinggi sekitar 0.17 g/cm³ pada tekanan 34 atm dan temperatur 25°C (Gambar 15). Pembuatan karbon dengan distribusi pori seperti itu akan diperoleh tabung penyimpanan BBG yang efisien.

Gaya Van Der Waals pada kenyataannya bekerja pada pori karbon dengan ukuran sekitar 1,1 nano meter. Ikatan Van Der Waals adalah ikatan yang terjadi akibat adanya gaya tarik antar-molekul akibat kedudukan kumpulan kimia yang berdekatan. Gambar 16 menggambarkan terjadinya ikatan Van der Waals, yang membandingkannya dengan ikatan kovalen⁵⁾.

Dengan ukuran pori yang sangat kecil (mikropori) yaitu sekitar 1,1 nm, gaya Van der Waals memberikan energi yang sangat besar untuk menyerap molekul gas ke dinding pori adsorben dan menekan/memampatkan molekul gas menjadi sangat padat



Gambar 16
Ikatan Van der Waals

sehingga mempunyai densitas mendekati *liquid*.

Adsorben yang adalah berupa material padat dapat menyimpan gas dengan jumlah yang lebih banyak daripada tabung gas yang kosong disebabkan molekul gas mempunyai energi yang sangat besar. Mereka bergerak secara bebas berputar dan memutar di seluruh ruangan yang ditempati. Dengan dilakukan penekanan dan pendinginan akan membuat molekul gas tersebut termampatkan dengan menempati ruangan yang lebih sempit.

Di dalam ruangan yang sangat sempit, pori karbon akan menjebak dengan menangkap dua molekul gas karena gaya Van der Waals tersebut menjadi gas yang sangat padat sehingga molekul gas akan mempunyai gaya yang sangat kecil untuk bergerak⁵⁾. Hal tersebut dapat diilustrasikan oleh gambar 17 berikut ini.

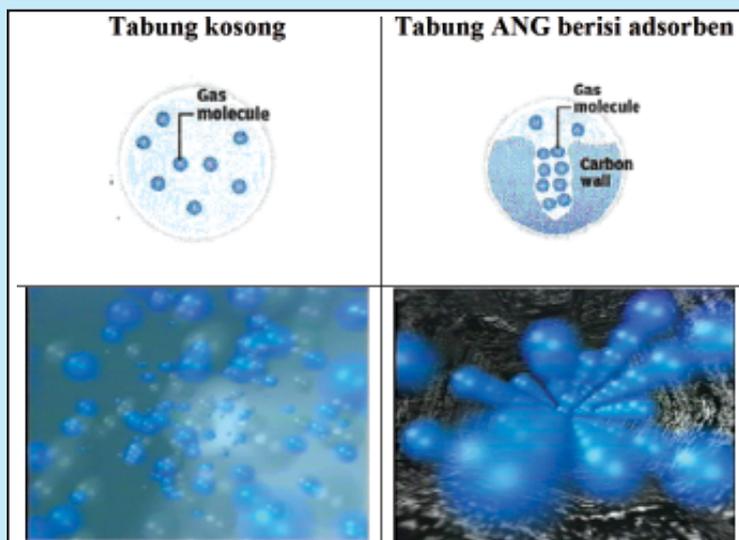
Sebenarnya untuk mendapatkan adsorben yang dapat mengadsorpsi atau menampung gas yang optimal harus mempunyai volume pori yang proporsional, artinya volume pori yang terbentuk pada briket tidak boleh terlalu besar atau terlalu kecil. Briket dengan volume pori yang besar akan menampung molekul gas lebih banyak tetapi hanya mempunyai sedikit pori untuk menampung gas tersebut. Hal ini dapat dijelaskan karena dengan pori yang besar, secara keseluruhan briket hanya mempunyai volume pori yang kecil.

Dengan ukuran pori yang terlalu kecil tidak akan bisa menampung molekul gas karena gas menjadi sangat padat terjebak dalam pori sehingga tidak dapat bergerak dalam pori. Hal tersebut di atas dapat dijelaskan

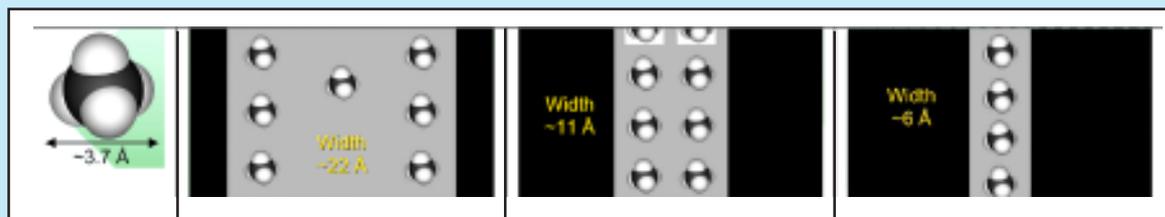
dengan gambar 18 di bawah ini.

Dengan ukuran molekul gas sebesar $3,7 \text{ \AA}$ maka diameter pori pada briket sebesar sekitar 22 \AA , pori akan mampu menampung molekul gas cukup banyak dengan 3 – 4 baris molekul yang bebas bergerak karena antar molekul gas dan karbon belum ada interaksi gaya yang menyebabkan gas teradsorpsi. Ukuran pori yang optimum adalah 11 \AA , di mana dapat menampung dua baris molekul gas yang termampatkan karena adanya gaya Van der Waals sehingga akan tertampung molekul gas yang lebih banyak dalam briket. Dengan ukuran pori yang terlalu kecil sekitar 6 \AA akan menyebabkan molekul gas terlalu padat terjebak dalam pori dan tidak dapat bergerak dari pori.

Perbedaan besarnya volume gas yang dapat



Gambar 17
Perbandingan molekul gas dalam tabung kosong dan tabung ANG



Gambar 18
Mekanisme adsorpsi gas dalam adsorben⁵⁾

tertampung dalam tabung CNG dan yang dapat teradsorpsi oleh tabung ANG dapat dilihat pada Gambar 19 yang dapat dinyatakan dalam gram per liter dan V/V (Gambar 20).

Dari Gambar terlihat bahwa ANG dapat menampung gas sebanyak 3 kali kapasitas yang dapat ditampung oleh tabung CNG pada tekanan 5 MPa. Pada tekanan 10 MPa adsorben mencapai kapasitas maksimumnya. Pada tekanan 20 Mpa CNG hanya mampu menampung gas 30% lebih banyak dari ANG pada tekanan 10 MPa.

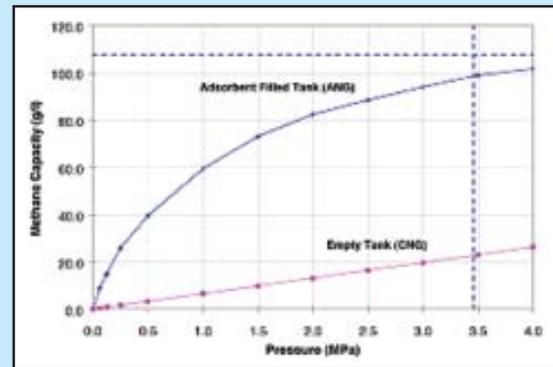
Selain kemampuan adsorpsi yang tinggi, adsorben gas harus mempunyai sifat desorpsi yang tinggi pula. Salah satu sifat adsorben karbon aktif berkinerja tinggi adalah kemampuan untuk melepaskan atau desorpsi gas yang tersimpan sebesar-besarnya. Kinerja desorpsi ini identik dengan sifat adsorpsi, artinya kurva kinerja adsorpsi mencerminkan pula perilaku desorpsi adsorben. Sebagai contoh, sifat desorpsi adsorben karbon aktif dapat pula diprediksi melalui Gambar 20 yang menunjukkan bahwa temperatur yang rendah akan menyebabkan desorpsi gas yang relatif lebih tinggi dibanding proses desorpsi pada temperatur yang lebih tinggi. Hal ini dapat tercapai dengan menjaga gradien temperatur yang rendah selama proses adsorpsi/desorpsi gas. Gradien temperatur yang rendah selama proses adsorpsi/desorpsi gas dapat dipelihara jika konduktivitas termal tinggi. Sifat konduktivitas termal ini pun terkait dengan sifat-sifat lain dari adsorben karbon aktif yaitu luas permukaan (spesifik), massa jenis, resistivitas elektris, ukuran mikropori serta kekuatan tekan yang tinggi untuk stabilitas dan masa pakai yang panjang.

Kapasitas Adsorpsi^{1,16,17)}

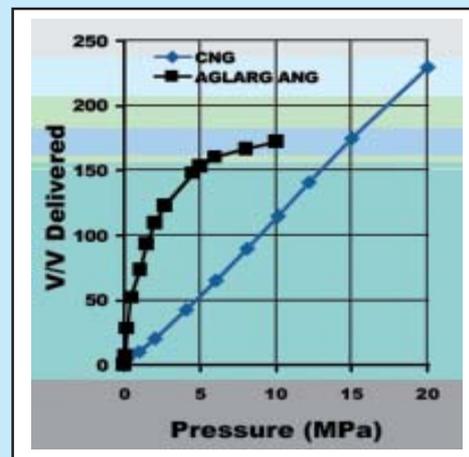
Kapasitas adsorpsi atau kapasitas penyimpanan BBG pada adsorben mencerminkan akumulasi BBG (*adsorbate*) yang dapat diserap dan tersimpan di dalam adsorben pada tekanan dan temperatur tertentu.

Kapasitas adsorpsi dapat dilakukan pengukuran dengan dua macam cara yaitu dengan cara *gravimetric measurement* yang biasa dilakukan pada sampel dengan ukuran kecil. Seperti namanya prinsip pengukuran adsorpsi didasarkan pada berat gas yang teradsorpsi ke dalam adsorben. Peralatan *gravimetric measurement* dapat dilihat pada Gambar 21.

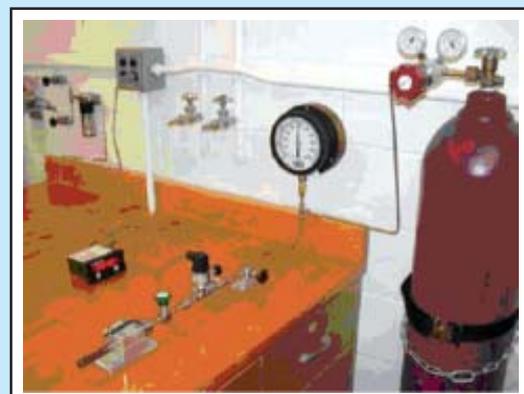
Kemudian cara yang lain adalah dengan *pressure difference measurement*, di mana dengan alat



Gambar 19
Kapasitas gas tertampung pada tabung CNG dan ANG dalam gram/liter¹⁾



Gambar 20
Kapasitas gas tertampung pada tabung CNG dan ANG dalam V/V¹⁾



Gambar 21
Gravimetric Measurement⁴⁾

ini dapat mengukur adsorpsi gas dengan sampel briket yang cukup besar (3,5") dan dengan prinsip pengukuran dengan perbedaan tekanan pada sampel briket dan gas penguji dari dalam tabung.

Kapasitas penyimpanan BBG pada adsorben dapat dinyatakan dengan tiga satuan, yaitu

- M/V (massa per volume) yaitu massa gas dalam gram per volume karbon dalam liter.
- V/V (volume/volume) yaitu volume gas pada temperatur 25°C dan tekanan 1 atm per volume karbon.
- M/M (massa per massa) yaitu massa gas dalam gram per kilo gram karbon.

Pada keadaan kesetimbangan, kapasitas adsorpsi dinyatakan oleh persamaan (1) berikut^{8,9)}:

$$a_{eq} = (W_o / v_a) \exp [-(R_m T \ln P_{sat}/P)/E]^2 \quad (1)$$

Notasi, a : kapasitas adsorpsi,

v_a : volume spesifik medium adsorben

W : volume spesifik maksimum *microporous* (koefisien Dubinin-Radushkevich)

R_u : Konstanta gas

T : temperatur absolut

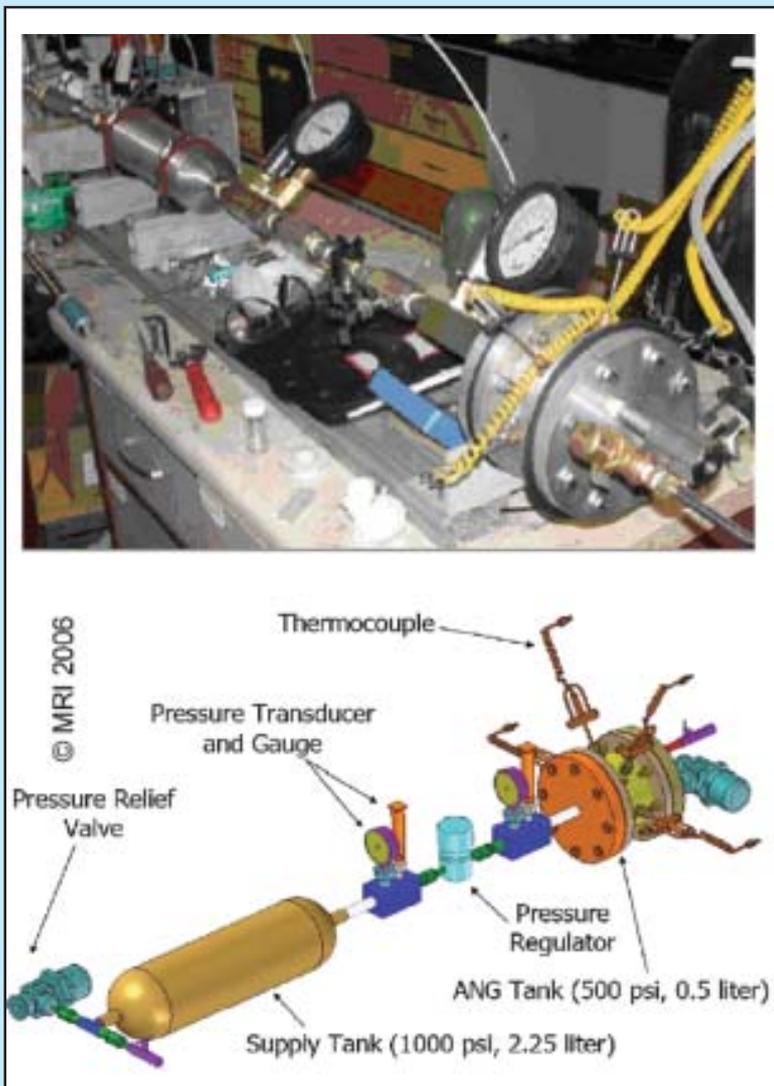
E : Energi aktivasi

P_{sat} : Tekanan saturasi

P : Tekanan gas

Sedangkan tekanan saturasi (P_{sat}) diperoleh melalui persamaan (2) berikut:

$$P_{sat} = P_{cr}(T/T_{cr})^2 \quad (2)$$

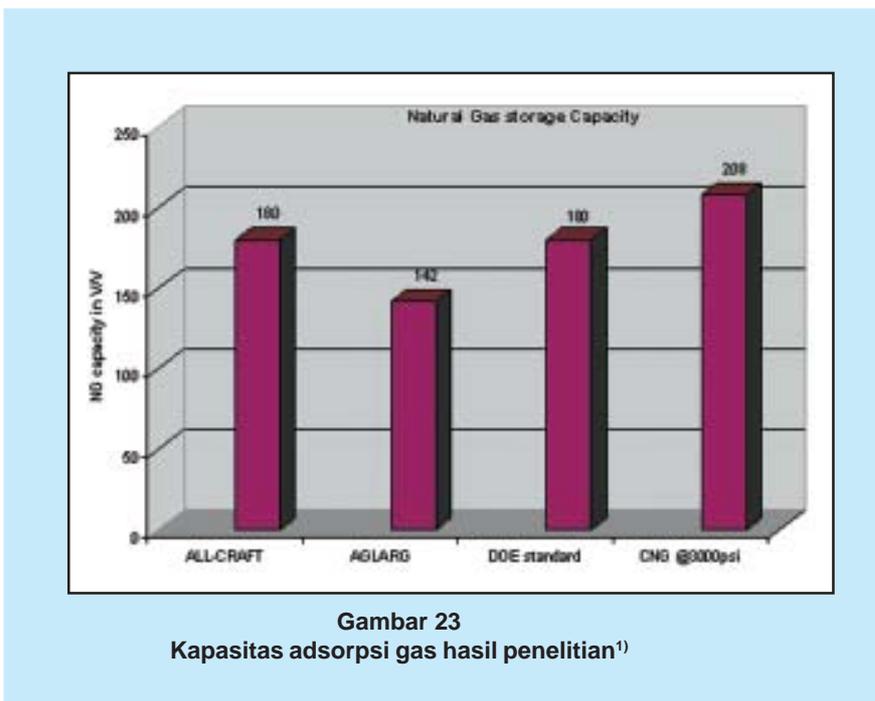


Gambar 22
Pressure Difference Measurement¹⁾

P_{cr} dan T_{cr} menyatakan tekanan dan temperatur kritis.

Luas permukaan spesifik, volume spesifik medium adsorben (v_a), volume spesifik maksimum *microporous* (koefisien Dubinin-Radushkevich, W_o) dan energi aktivasi ditentukan secara empiris serta diukur menggunakan alat-alat *High Speed Gas Sorption Analyser NOVA 1200*, pada temperatur 77 K dan tekanan 0 – 0,1 MPa. Berdasarkan data *physisorption* nitrogen, kemudian luas permukaan, volume total pori dan volume *microporous* dapat ditentukan. Contoh parameter-parameter empiris berbagai bahan karbon aktif tercantum pada Tabel 3.

Penerapan persamaan (1) dan persamaan (2) untuk berbagai bahan karbon aktif dengan menggunakan rangkaian peralatan pengujian sebagaimana tercantum pada Gambar 21 dan 22 akan menghasilkan karakteristik adsorpsi BBG untuk berbagai jenis karbon aktif pada berbagai tekanan dan temperatur seperti contoh di Gambar 23. Hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Universitas Missouri (MU) di Illinois AS, besarnya kapasitas adsorpsi yang telah berhasil diperoleh juga dapat dilihat pada Tabel 3 di mana secara grafik dapat dilihat pada Gambar 23.



Gambar 23
Kapasitas adsorpsi gas hasil penelitian¹⁾

Besarnya kapasitas adsorpsi gas ke dalam adsorben sangat dipengaruhi oleh tekanan gas yang bekerja pada sistem. Hubungan antara tekanan gas yang bekerja pada sistem dengan besarnya adsorpsi pada adsorben dapat dilihat pada Gambar 23.

VI. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan kajian diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Bahan baku adsorben gas yang paling baik adalah dari bahan karbon aktif karena mempunyai struktur pori berukuran nano yang dapat mengadsorpsi gas metana atau BBG ke dalam pori

2. Untuk jaringan/pola pori pada karbon dengan ukuran 10 – 20 Angstrom akan diperoleh efek yang bagus untuk adsorpsi
3. Adsorbed natural gas (ANG) dapat mengadsorpsi gas metana (CH₄) atau BBG dengan tekanan relatif rendah (500 psi) dan kapasitas cukup besar (150V/V) dibandingkan dengan CNG yang memerlukan tekanan sampai 3600 psi.
4. Kualitas adsorben ditentukan oleh karakteristiknya antara lain massa jenis, kekuatan tekan (*compressive strength*), tahanan listrik dan luas permukaan karbon.

Tabel 3
Hasil pengukuran kapasitas adsorben¹⁾

	ALL-CRAFT Typical briket (sampel B-21/K)	ALL-CRAFT Best performance (sampel B-21/K)	AGLARG Best Performance	ANG Industri target
M/V	73 – 95 g/lt	104-107 g/lt	98 g/liter	118 g/liter
V/V	112-145 lt/lt	159-163 lt/lt	150 lt/lt	180 lt/lt
M/M	170-220 g/kg	210-220 g/kg	170 g/kg	N/A

KEPUSTAKAAN

1. Pfeifer, Peter, 2006, "ALL-CRAFT Technology for Low-Pressure Storage of Methane from Biomass", 34th Annual Missouri Waste Management Conference, Lake Ozark, Columbia
2. Chang, K. et al., 1996, 'Behavior And Performance Of Adsorptive Natural Gas Storage Cylinders During Discharge', *Appl. Therm. Eng.*, 16, 359-374
3. Hasller, J.W., 1951, "Active Carbon", Chemical Publishing Co., Inc., New York
4. Dash, R. K., 2006, "Nanoporous Carbons Derived from Binary Carbides and their Optimization for Hydrogen Storage", Ph. D Thesis Submitted to the Faculty of Drexel University
5. Bansal R C, et al., 1988, "Active Carbon", Marcel Dekker, New York
6. Cameron Carbon Inc., "Activated Carbon Manufacture, Structure & Properties", www.cameroncarbon.com.
7. Hickman, 2002, "Process For Manufacturing Activated Carbon Honeycomb Structures", US Patent No. 6,372,289 B1, April 16.
8. Vasiliev, et al., 2005, 'Activated Carbon For Gas Adsorption' In *Int. Conference Solid State Hydrogen Storage – Materials And Applications*, Hyderabad, India.
9. Allen, T., 1997, "Particle Size Measurement", 5th ed., Chapman & Hall, London
10. Suryanarayana, C., "Mechanical Alloying and Milling", *Departement of Metallurgical and Material Engineering, Colorado School of Mines, Golden, USA*, 1987
11. Banks, M et al., 2007, "Conversion Of Waste Corn cob To Activated Carbon For Use Of Methane Storage", ALLCRAFT, Lincoln University, Columbia
12. Burchell, Tim, 2000, "Carbon Fiber Composite Adsorbent Media for Low Pressure Natural Gas Storage", Carbon Materials Technology Group, Oak Ridge National Laboratory
13. Vasiliev, L. L., et al, 'Activated Carbon For Gas Adsorption' In 3rd Int. Symposium On Fullerene And Semifullerene Structures In The Condensed Media, Minsk, Belarus, 22-25 June, 2004, 110-115
14. Vasilievi, L. L , et al., "Activated Carbon Fiber Composites For Ammonia, Methane And Hydrogen Adsorption", *International Journal of Low Carbon Technologies* 1/2.
15. Quinn, D. , 2005, "Adsorption Storage A Viable Alternative To Compression
16. Badosz T J, et al. 2003, "Chemistry And Physics Of Carbon", Ed. L R Radovic (New York: Marcel Dekker)
17. Agarwal, R. K., 1988, "High Pressure Adsorption Of Pure Gases On Activated Carbon: Analysis Of Adsorption Isotherms By Application Of Potential Theory And Determination Of Heats And Entropies Of Adsorption. Ph. D. Dissertation, Syracuse. ✓