

Garis Besar Rencana Penelitian dan Pengembangan Adsorben untuk Distribusi dan Penyimpanan Bahan Bakar Gas Skala Rendah

Oleh:

Yusep K Caryana

S A R I

Pengurangan subsidi melalui substitusi minyak tanah sektor rumah tangga oleh Bahan Bakar Gas (BBG) terkendala oleh keterbatasan jaringan pipa distribusi gas. Badan usaha distribusi gas bumi yang berorientasi *profit center* kurang berminat mengembangkan jaringan pipa gas ke konsumen rumah tangga yang tersebar dan memiliki tingkat konsumsi BBG yang sangat rendah karena alasan keekonomian. Oleh karena itu, PPPTMGB "LEMIGAS" selalu melakukan penelitian dan pengembangan teknologi alternatif distribusi dan penyimpanan BBG tekanan dan skala rendah guna menanggulangi keterbatasan jaringan pipa distribusi gas untuk mensubstitusi minyak tanah sektor rumah tangga oleh BBG.

Salah satu teknologi alternatif distribusi dan penyimpanan BBG tekanan dan skala rendah yang dipertimbangkan PPPTMGB "LEMIGAS" untuk dikembangkan adalah teknologi adsorben BBG, yang menggunakan bahan baku karbon aktif dari *naturally fiber* (fiber alami) beserta zat perekat yang dikompres pada tekanan dan temperatur tertentu. Teknologi adsorben BBG ini dipertimbangkan untuk dikembangkan karena bahan baku adsorben dan zat perekat organik tersedia dengan melimpah di Indonesia. Selain itu, proses sintesa adsorben BBG menggunakan teknologi yang relatif sederhana sehingga akan dapat menggunakan kemampuan nasional secara maksimal.

Penelitian dan pengembangan teknologi adsorben BBG yang dilaksanakan di PPPTMGB "LEMIGAS" berfokus pada pembentukan adsorben BBG kinerja tinggi melalui parameter kinerja adsorben yaitu kapasitas adsorpsi dan desorpsi BBG yang tinggi, kinetika adsorpsi yang baik, sifat mekanik yang unggul, stabilitas dan durabilitas tinggi, ketersediaan bahan baku serta sintesa yang efektif dan efisien.

Kata kunci: Rencana pengembangan adsorben gas.

ABSTRACT

One of the barrier in subsidy reduction through residential kerosine substitution by natural gas is the lack of gas pipeline distribution network. Most of profit oriented gas distribution entities unable to develop service lines to low consumption and scattered residential consumers because of economical reasons. That is why, Research and Development Center for Oil and Gas Technology "LEMIGAS" continuously seeking for alternative technology for small scale natural gas storage and distribution to overcome the limitation of gas pipeline distribution network, in order that the substitution to reduce the subsidy can continuously take place.

One of the technology considered to be developed is Adsorbed Natural Gas (ANG) technology. The technology uses naturally fiber carbon active and a binder mixture. The mixture is compressed at particular pressure and temperature. The compressed mixture is then used for adsorbing and storage of natural gas.

This technology has been considered to be developed because of the availability of raw material and binder in Indonesia. Moreover, the adsorbent synthesis applies a simple technology so that maximum domestic capability can be utilized for the development.

The focus of ANG development in LEMIGAS is formulating high performance adsorbent in term of high natural gas adsorption and desorption capacity, good adsorption kinetics, excellent mechanics properties, high stability and durability and efficient and effective adsorbent synthesis.

Key words: Gas adsorbent development plan.

I. LATAR BELAKANG

Gas bumi merupakan salah satu sumber daya energi dengan jumlah cadangan yang sangat besar serta lokasi lapangan gas yang tersebar hampir di seluruh kepulauan dan lepas pantai Indonesia. Sementara itu lokasi pemakai gas, baik sebagai bahan bakar mau pun bahan baku, terletak jauh dari lokasi sumber gas bumi sehingga menimbulkan berbagai kesulitan dalam pengembangan lapangan gas bumi. Sekali pun kesulitan pengembangan lapangan gas bumi dapat ditanggulangi melalui penerapan teknologi tinggi dengan investasi yang sangat besar, namun jumlah konsumsi gas bumi yang sangat rendah dan tersebar, terutama sektor transportasi dan rumah tangga, tidak dapat mencapai batas keekonomian produksi gas. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian teknik penyaluran gas bumi skala rendah yang dapat memenuhi tingkat keekonomian pengembangan lapangan gas dan kebutuhan gas bumi yang rendah dan tersebar.

Penyaluran gas bumi ke konsumen dilakukan dengan dua cara yaitu melalui pipa salur gas dan tabung gas. Pipa salur gas bumi dibangun dan dioperasikan oleh badan usaha penyalur gas guna memenuhi kebutuhan konsumen secara berkesinambungan pada tingkat konsumsi yang memenuhi keekonomian penyaluran gas melalui pipa. Jika tingkat konsumsi tidak memenuhi keekonomian penyaluran gas melalui pipa maka alternatif penyaluran gas bumi untuk memenuhi tingkat konsumsi yang rendah, tersebar dan diskontinyu adalah melalui tabung gas, yang juga berfungsi sebagai media penyimpanan gas bumi sebelum sampai dan digunakan oleh konsumen.

Secara garis besar, ada empat teknologi penyimpanan dan penyaluran gas bumi melalui tangki gas yaitu:^{3,9,23,32,33}

1. Teknologi *Liquefied Natural Gas* (LNG), adalah teknik penyimpanan dan distribusi gas pada

tekanan atmosferik dan temperatur sangat rendah (sekitar -120 °C).

2. Teknologi *Natural Gas Hydrates* (NGH), adalah cara penyimpanan dan distribusi gas dalam bentuk padatan hidrat pada tekanan atmosferik dan temperatur sekitar -15 °C.
3. Teknologi *Compressed Natural Gas* (CNG), merupakan teknik penyimpanan dan distribusi gas bertekanan tinggi, sampai dengan 200 Bar, pada temperatur ambien.
4. Teknologi *Adsorbed Natural Gas* (ANG), adalah teknik penyimpanan dan distribusi gas dengan menggunakan adsorben karbon aktif (karbon *monolith*) pada temperatur ambien dan tekanan operasi (sekitar 30 Bar) yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan tekanan operasi CNG. Teknologi ANG berkembang sebagai salah satu upaya menanggulangi kesulitan-kesulitan teknis dalam penerapan teknologi CNG, diantaranya sensitivitas kompresor di Stasiun Pengisian Bahan Bakar Gas (SPBG) terhadap tekanan inlet dari pipa distribusi gas, tingginya biaya kompresi gas serta penggunaan material yang harus tahan terhadap tekanan 200 sampai 250 Bar. Penelitian terhadap bahan baku dan kinerja adsorben gas bumi yang optimal di beberapa negara masih terus berlanjut. Berikut ini adalah rencana serta fokus penelitian yang perlu dilakukan di Indonesia (PPPTMGB "LEMIGAS").

A. Tujuan Penelitian dan Pengembangan Adsorben Bahan Bakar Gas

Penelitian dan pengembangan Adsorben sebagai media penyimpanan dan distribusi Bahan Bakar Gas (BBG) tekanan rendah di PPTMGB "LEMIGAS" bertujuan untuk :

- Pemilihan bahan dasar adsorben karbon aktif beserta *binder* (perekat) yang diperlukan.

- Menentukan perbandingan bahan baku karbon aktif dan *binder* yang tepat sehingga dapat terbentuk adsorben BBG yang memiliki kinerja optimal.
- Merancang proses sintesis adsorben karbon aktif yang paling ekonomis dengan memanfaatkan potensi sumber daya yang ada di Indonesia secara maksimal.
- Perencanaan penggunaan Adsorben BBG untuk sektor rumah tangga dan transportasi.

B. Sasaran Penelitian dan Pengembangan Adsorben BBG

Pada akhirnya, penelitian dan pengembangan adsorben harus mampu memberikan alternatif pemecahan masalah berikut:

- Bahan dasar karbon aktif dan perekat yang dipilih.
- Perbandingan bahan baku adsorben karbon aktif dan perekat.
- Cara sintesa adsorben BBG .
- Sifat-sifat adsorben dari adsorben BBG.
- Teknik penyimpanan BBG dalam adsorben.
- Kapasitas penyimpanan BBG dalam adsorben.
- Teknik perolehan BBG yang tersimpan dalam adsorben.
- Proses produksi adsorben BBG.
- Tingkat kelayakan penerapan adsorben untuk penyimpanan dan distribusi BBG di subsektor rumah tangga dan transportasi.

II. PEMILIHAN BAHAN DASAR KARBON AKTIF DAN PEREKAT ADSORBEN BBG

Untuk memperoleh kinerja adsorben BBG yang optimal maka perlu dipilih bahan dasar karbon aktif beserta perekat untuk pembentukan adsorben BBG sebagai media penyimpanan dan distribusi BBG tekanan rendah.

³Bahan *Adsorbed Natural Gas* (ANG) yang saat ini dikembangkan di beberapa negara berasal dari bahan fiber alami (*naturally fiber*) seperti tongkol jagung (*corn cob*), kayu, serat sabut kelapa (*cocconut shell*). Sumber bahan dasar ANG sangat melimpah di Indonesia. Sebagai contoh, data Departemen Pertanian menunjukkan bahwa Indonesia adalah negara penghasil karbon aktif sabut kelapa sekitar 3,3 juta ton per tahun. Jika Indonesia mampu

mengembangkan adsorben karbon aktif sabut kelapa sebagai media penyimpanan dan distribusi BBG tekanan rendah, bahan baku adsorben ini tersedia di Indonesia.

Untuk mensintesa adsorben dari bahan karbon aktif maka diperlukan suatu zat yang berfungsi sebagai perekat. Bahan karbon aktif dan perekat dalam perbandingan tertentu kemudian dikompres sampai mencapai kerapatan tertentu. Salah satu penelitian menunjukkan bahwa bahan perekat organik yang terbuat dari ekstrak karbohidrat akan memberikan efek adsorpsi gas yang lebih baik dibanding bahan perekat anorganik¹⁹. Bahan perekat organik yang memiliki komponen kadar amilosa dari ekstrak karbohidrat yang tinggi terbukti memiliki daya rekat yang tinggi pula²⁶.

III. KRITERIA ADSORBEN KINERJA TINGGI (HIGH PERFORMANCE ADSORBENT)

^{5,6}Karbon aktif merupakan salah satu adsorben BBG terbaik karena karbon ini dapat diolah menjadi serbuk sangat halus (*very fine powdered*) dengan struktur *porous* yang sangat tinggi serta sifat spesifik alami atom karbon dengan molekul gas yang dapat berinteraksi dengan baik. Kriteria kualitatif adsorben penyimpanan BBG berkinerja tinggi (*high performance adsorbent*) meliputi:^{3,8,9,10,13,14,15,16,17}

- Kapasitas adsorpsi dan desorpsi BBG tinggi. Sifat yang fundamental terkait kriteria ini adalah luas permukaan spesifik yang tinggi dan jumlah ukuran mikro pori yang tinggi serta terdistribusi secara merata dalam adsorben supaya proses penyerapan dan pelepasan BBG berlangsung cepat dan mudah. Parameter ini dapat menentukan jumlah *adsorbate* (BBG) yang dapat terakumulasi per satuan volume adsorben pada tekanan dan temperatur standar serta jumlah BBG yang dapat dilepaskan dari adsorben semaksimal mungkin pada tekanan atmosferik dan temperatur ambien. Supaya secara komersial layak dikembangkan, kapasitas penyimpanan BBG dalam adsorben minimal 150 v/v. Faktor lain yang perlu dimiliki oleh adsorben BBG berkinerja tinggi adalah konduktivitas termal tinggi supaya proses transfer masa dan panas cepat dan efektif. Perbedaan temperatur yang tinggi selama proses adsorpsi dan desorpsi BBG berlangsung akan mengakibatkan penurunan akumulasi gas dan/atau pengurangan pelepasan

BBG. Dengan konduktivitas termal yang tinggi, maka gradien temperatur yang rendah selama proses tersebut berlangsung dapat dijaga sehingga dapat meningkatkan kembali kinerja adsorben BBG.

- Kinetika adsorpsi yang baik. Artinya, laju adsorpsi BBG yang cepat serta dapat dikontrol sesuai tujuan penggunaannya. Kinetika adsorpsi ditentukan oleh ukuran partikel kristalin yaitu makro, meso dan mikro porositas serta dipengaruhi oleh jumlah dan jenis *binder* yang digunakan.
- Sifat mekanis yang unggul. Adsorben BBG berkinerja tinggi perlu mempunyai sifat ketahanan mekanis yang kuat, tahan terhadap erosi dan benturan-benturan di dalam tangki atau tabung nantinya. Adsorben dengan massa jenis dan *compressive strength* yang tinggi, bersifat kuat terhadap benturan, tahan erosi serta memiliki resistansi yang tinggi adalah adsorben BBG yang mempunyai sifat mekanis yang unggul.
- Stabilitas dan durabilitas tinggi. Adsorben BBG akan mengalami proses-proses kimiawi serta berada pada kondisi tekanan dan termal yang dinamis. Stabilitas dalam kondisi lingkungan seperti itu perlu dimiliki oleh adsorben BBG untuk menjamin masa pakai yang panjang.
- Ketersediaan bahan adsorben, yaitu bahan baku karbon aktif sabut kelapa beserta zat perekat (*binder*) yang diperlukan tersedia.
- Sintesa adsorben efektif dan efisien. Adsorben BBG harus dapat disintesa dengan teknologi yang relatif sederhana sehingga tidak memerlukan biaya yang tinggi untuk produksi dan konstruksi adsorben sesuai tujuan penggunaannya yaitu menjadi tangki penyimpanan dan distribusi BBG tekanan rendah.

Secara kuantitatif, adsorben BBG kinerja tinggi ditunjukkan oleh parameter-parameter adsorben terukur yaitu kapasitas penyimpanan, massa jenis, *compressive strength*, resistivitas elektris, konduktivitas termal, luas permukaan dan pelepasan BBG tersimpan.

A. Kapasitas Adsorpsi BBG Pada Adsorben Karbon Aktif Sabut Kelapa

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 penyimpanan BBG pada adsorben dinyatakan oleh satuan volume BBG per satuan volume adsorben pada tekanan dan temperatur standar ($v/v @ STP$) atau volume BBG (m^3) per satuan massa adsorben (Kg) pada tekanan dan temperatur tertentu.

Pada keadaan kesetimbangan, kapasitas adsorpsi dinyatakan oleh persamaan (1) berikut:^{3,5,42}

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

Notasi, a : kapasitas adsorpsi,

v_a : volume spesifik medium adsorben

W_o : 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:^{3,5,42}

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

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 selang tekanan 0 – 0,1 Mpa. Berdasarkan data *physisorption* Nitrogen, kemudian luas permukaan, volume total pori dan volume *microporous* dapat

Tabel 1
Koefisien Dubinin-Radushkevich dan energi aktivasi empiris berbagai bahan karbon aktif.^{35,42}

Material	$W_o, 10^3, m^3/Kg$	E, kJ/Kg
Busofit-M2	369	1783
Busofit-M4	376	1922
Busofit-M8	482	1710
Sutcliffe	453	1699
WAC 3-00	270	3782
207C	343	1969

ditentukan. Contoh parameter-parameter empiris berbagai bahan karbon aktif tercantum pada Tabel 1 dan Tabel 2.

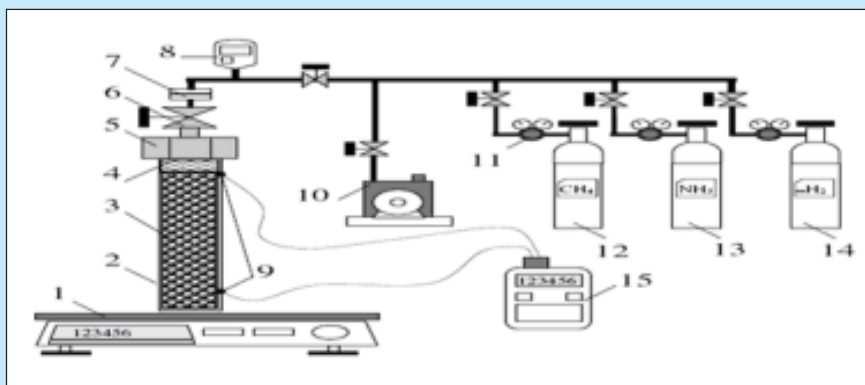
Penerapan persamaan (1) dan persamaan (2) untuk berbagai bahan karbon aktif dengan menggunakan rangkaian peralatan pengujian sebagaimana tercantum pada Gambar 1 akan menghasilkan karakteristik adsorpsi BBG untuk berbagai jenis karbon aktif pada berbagai tekanan dan temperatur seperti contoh di Gambar 2.

B. Massa jenis

Massa jenis adsorben menunjukkan jumlah massa per satuan volume material karbon aktif adsorben BBG. Massa jenis yang tinggi akan mengakibatkan sifat adsorpsi gas yang lebih

baik. Sebagai contoh, pengaruh massa jenis terhadap sifat adsorpsi ditunjukkan oleh Gambar 3.

Gambar 3 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



Peralatan Percobaan: 1. Timbangan elektronis presisi tinggi, 2. Reaktor, 3. Perconto adsorben, 4. Filter (pencegahan migrasi partikel ke sistem), 5. Tutup reaktor, 6. Valve, 7. Quick release coupling, 8. Sensor tekanan, 9. Thermocouple, 10. Pompa vakum, 11. Reducer, 12. 13.14. Silinder metana. Amoniak dan hidrogen, 15. Indikator Temperatur.

Gambar 1
Contoh Peralatan Pengujian Karakteristik Adsorpsi BBG⁴²

Tabel 2
Contoh Luas Permukaan Spesifik Empiris Berbagai Bahan Karbon Aktif⁴⁷

No.	Adsorben	$a_v,$ $10^3 \text{ m}^3 \text{ (STP)/Kg}$	$a_H,$ Kg/Kg	$S_H,$ m^2/g	$S_{BET},$ m^2/g	$S_{DR},$ m^2/g	$V_{DR},$ $10^3 \text{ m}^3/\text{Kg}$	$R_{DR},$ 10^8 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 – 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, m .

mampu menyerap atau menyimpan BBG metana sekitar 120 v/v. Sementara itu, adsorben BBG dengan massa jenis yang lebih tinggi (0,63 g/cc) mampu menyerap atau menyimpan BBG metana sekitar 146 v/v. Jadi, sifat adsorptif atau jumlah penyimpanan BBG dalam adsorben berbanding lurus dengan massa jenis adsorben karbon aktif.

Selain itu, massa jenis adsorben yang tinggi ternyata menimbulkan sifat konduktivitas termal yang baik. Hal ini ditunjukkan oleh contoh hubungan massa jenis dengan konduktivitas termal seperti tercantum pada Gambar 4. Semakin tinggi massa jenis maka semakin tinggi pula konduktivitas termal, maka semakin baik kinerja adsorben BBG.

Gambar 5 menunjukkan bahwa massa jenis adsorben karbon aktif terjadi secara bertahap sesuai dengan tahapan kompresi pencetakan pada saat proses sintesa. Pada saat kompresi pertama massa jenis adsorben belum stabil, nilainya terus meningkat sesuai dengan kenaikan tekanan kompresi pencetakan. Massa jenis yang stabil dengan nilai yang tetap terjadi pada akhir tahapan tekanan kompresi.

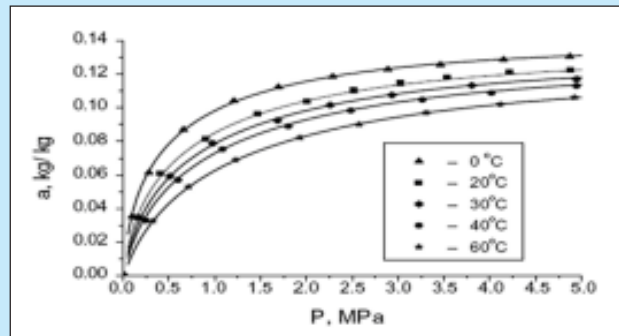
C. Compressive Strength (Kekuatan Tekan)

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).

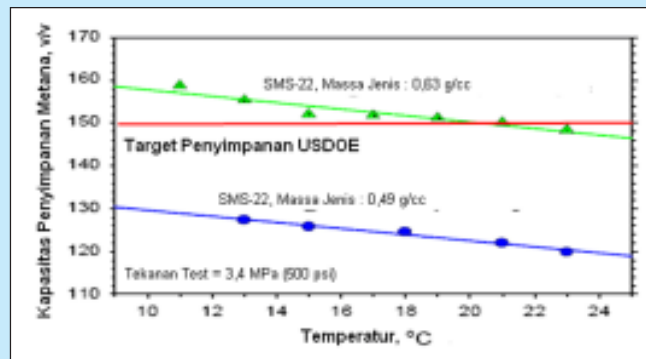
Oleh karena itu, untuk menjamin stabilitas yang tinggi dan masa pakai yang panjang, adsorben karbon aktif harus memiliki sifat *Compressive Strength* yang tinggi.

D. Resistivitas Elektris

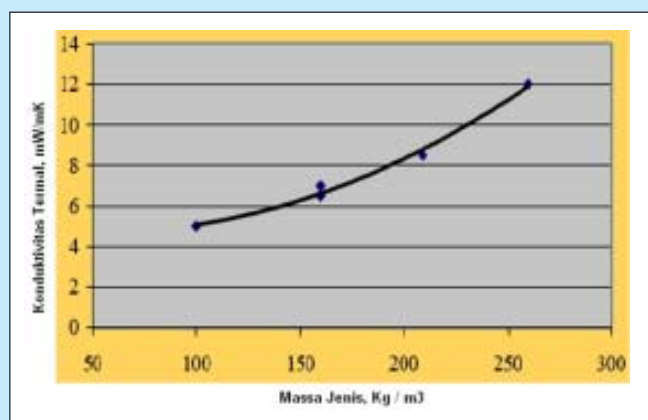
Resistivitas Elektris dari adsorben perlu diketahui untuk simulasi listrik ke dalam adsorben karbon aktif pada saat proses pelepasan gas dari adsorben berlangsung. Dengan mengetahui Resistivitas Elektris maka akan memudahkan perancangan sistem desorpsi BBG dari adsorben karbon aktif. Untuk kepentingan aliran listrik yang baik maka Resistivitas Elektris adsorben harus sekecil



Gambar 2
Karakteristik Adsorpsi BBG Berbagai
Bahan Karbon Aktif.^{36,47}



Gambar 3
Contoh Hubungan Massa jenis Adsorben dengan
Sifat Adsorpsi BBG.^{9,10,47}



Gambar 4
Contoh Hubungan Massa Jenis Dan Konduktivitas
Termal Adsorben Karbon Aktif³⁷

mungkin. Nilai akhir dari Resistivitas Elektris sangat dipengaruhi oleh proses sintesa adsorben yang akan melibatkan waktu pemanasan, tahapan kompresi pencetakan dan massa jenis. Contoh pengaruh tahapan kompresi, massa jenis dan lamanya pemanasan pada saat proses sintesa adsorben terhadap Resistivitas Elektris tercantum pada Gambar 6 dan Gambar 7.

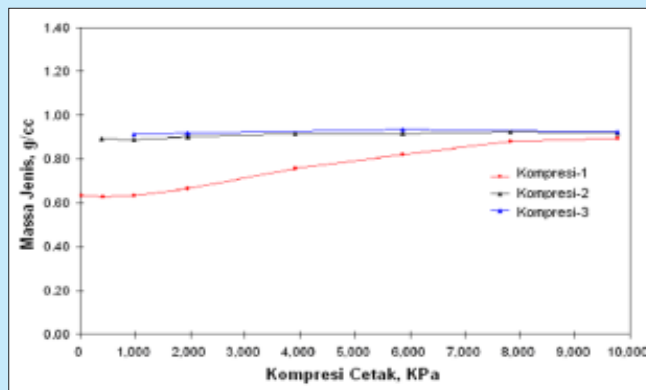
Sebagaimana terlihat di Gambar-6, kenaikan tekanan pada berbagai tahapan kompresi pencetakan menurunkan nilai resistivitas elektris adsorben. Semakin tinggi tekanan kompresi pencetakan maka semakin kecil nilai resistivitas elektris adsorben karbon aktif. Hal ini berarti, semakin tinggi tekanan kompresi saat proses sintesa adsorben maka akan menghasilkan adsorben karbon aktif berkinerja tinggi.

Sedangkan Gambar 7 menunjukkan bahwa durasi pemanasan yang panjang selama proses sintesa adsorben akan menurunkan resistivitas elektris yang dengan sendirinya meningkatkan kinerja adsorben karbon aktif. Contoh alat untuk mengukur resistivitas elektris adsorben karbon aktif termuat di Gambar 8.

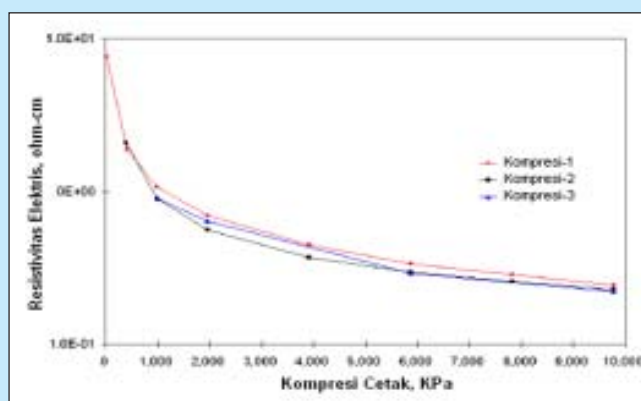
E. Luas Permukaan

Luas permukaan adsorben yang tinggi adalah sifat yang diinginkan untuk memperoleh adsorben kinerja tinggi. Semakin tinggi luas permukaan adsorben menunjukkan semakin kecil ukuran butir karbon aktif.²⁹ Ukuran karbon aktif terkecil yang diinginkan supaya adsorben memiliki kinerja yang tinggi adalah ukuran butir skala mikropori (1-2 nm). Hubungan antara ukuran mikro pori, luas permukaan dan sifat adsorptif dari adsorben karbon aktif ditentukan berdasarkan persamaan (1) dan persamaan (2) serta diukur dengan menggunakan alat *Micrometics AccuSorb 2100* dan *BET Sorptometer NOVA* atau yang sejenis. Contoh sifat-sifat adsorptif, luas permukaan berbagai bahan karbon aktif terlihat pada Tabel 2.

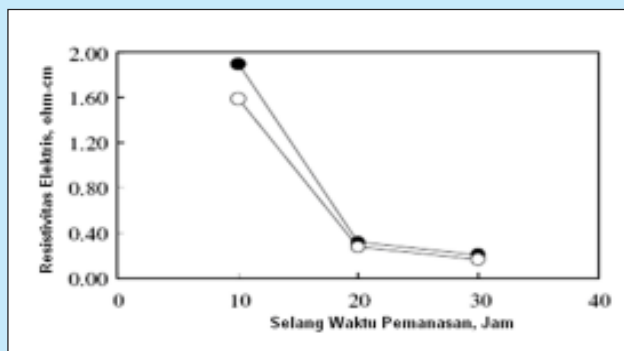
Tabel 2 menunjukkan bahwa semakin tinggi luas permukaan (spesifik) suatu adsorben maka semakin tinggi pula massa BBG yang dapat diserap. Hal ini berarti, tingginya luas permukaan adsorben akan meningkatkan kinerja adsorben karbon aktif.



Gambar 5
Pengaruh Tahapan Kompresi Pencetakan Terhadap Massa jenis Adsorben Karbon Aktif.^{9,10}



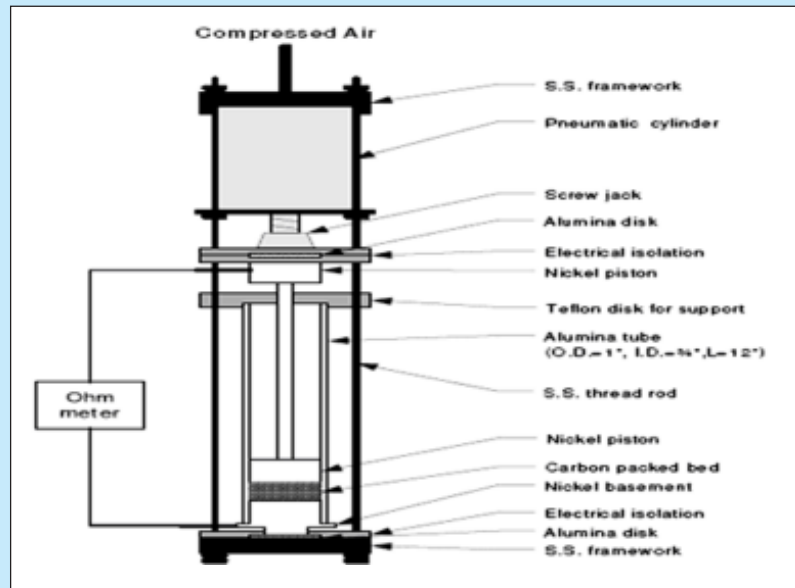
Gambar 6
Pengaruh Tahapan Kompresi Pencetakan Terhadap Resistivitas Elektris Adsorben Karbon Aktif.⁹



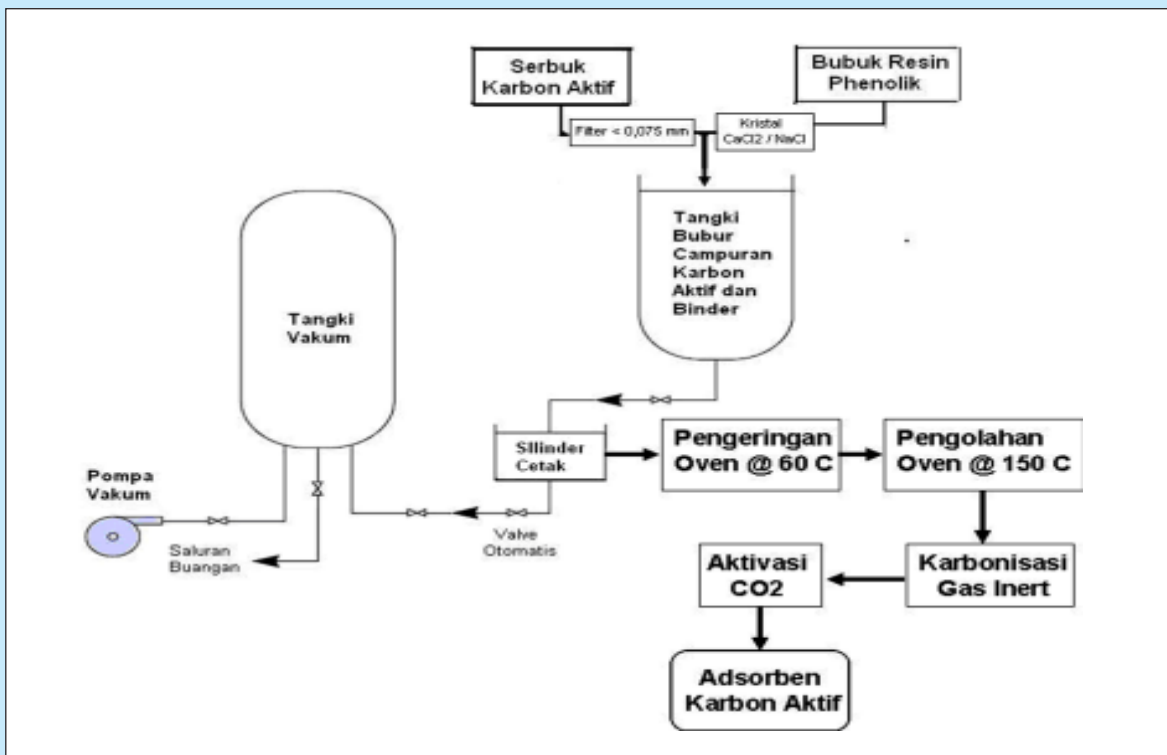
Gambar 7
Pengaruh Durasi Pemanasan Terhadap Resistivitas Elektris Adsorben^{9,10}

F. Pelepasan BBG Tersimpan

Salah satu sifat adsorben karbon aktif berkinerja tinggi adalah kemampuan untuk melepaskan atau desorpsi BBG tersimpan sebesar-besarnya. Kinerja desorpsi ini identik dengan sifat absorpsi, artinya kurva kinerja adsorpsi mencerminkan pula perilaku desorpsi adsorben. Sebagai contoh, sifat desorpsi adsorben karbon aktif dapat pula diprediksi melalui Gambar-2 yang menunjukkan bahwa temperatur yang rendah akan menyebabkan desorpsi BBG 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 BBG. Gradien temperatur



Gambar 8
Contoh Alat Pengukur Resistivitas Listrik Adsorben Karbon Aktif.^{42,43,44}



Gambar 9
Rangkaian Peralatan Sintesa Perconto Adsorben Karbon Aktif.^{3,9,10,29,46}

yang rendah selama proses adsorpsi/desorpsi BBG 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 listrik, ukuran mikropori serta kekuatan tekan yang tinggi untuk stabilitas dan masa pakai yang panjang.

Jadi, adsorben karbon aktif berkinerja tinggi dapat ditunjukkan oleh sifat-sifat berikut:

- Adsorpsi/desorpsi BBG maksimum.
- Luas Permukaan tinggi.
- Massa jenis tinggi.
- Konduktivitas termal tinggi.
- Resistivitas Listrik rendah
- *Compressive Strength* (Kuat Tekan) tinggi.

IV. METODOLOGI PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN ADSORBEN BBG

A. Alat dan Bahan Penelitian

Bahan baku yang tersedia di pasaran adalah bubuk karbon aktif sabut kelapa, *binder* organik

ekstrak karbohidrat dan kristalin logam chlorid seperti CaCl_2 , NaCl yang berfungsi untuk mengurangi ruang kosong (*void space*) serta meningkatkan kapasitas adsorpsi gas bumi.

Bahan baku yang terpilih untuk digunakan adalah bubuk karbon aktif sabut kelapa, perekat organik ekstrak karbohidrat dan kristal CaCl_2 serta kristal NaCl . Sifat dan spesifikasi bahan baku yang dapat digunakan tercantum pada Tabel 3 dan Tabel 4.^{19,26,29} Bahan baku yang akan digunakan terdiri dari kombinasi material dengan komposisi antara 75% - 85 % berat bahan karbon aktif serta 15% - 25% berat perekat organik ekstrak karbohidrat.

B. Bahan dan Rancangan Peralatan Sintesa Adsorben Karbon Aktif

Contoh spesifikasi karbon aktif dan perekat adsorben masing-masing tercantum pada Tabel 3 dan Tabel-4. Rancangan rangkaian peralatan pembentukan adsorben karbon aktif tercantum pada Gambar 9 dengan kombinasi perconton adsorben yang akan dibentuk termuat di Tabel 5.

Tabel 3
Contoh Spesifikasi Karbon Aktif Sabut Kelapa

Parameter	Ukuran Mesh				
	4 - 8	8 - 20	20 - 30	30 - 60	60 - 100
Mesh range, min %	95,00	95,00	95,00	95,00	95,00
Hardeness, min %	95,00	90,00	90,00	90,00	-
Bulk Density (gr/ml)	0,45	0,46	0,42	0,46	0,50
Total Moisture, max (%)	2,50	3,00	2,00	2,00	4,50
Ash content, max (%)	3,00	3,00	3,00	2,00	2,50
Volatile Matter, max (%)	3,00	4,00	3,00	3,00	3,00
Fixed Carbon, min (%)	94,00	93,00	94,00	94,00	94,50
I2 Absorption, min (mg/gr)	1050	1050	1050	1050	1050
Water Soluble content (%)	1,50	1,50	0,85	1,00	1,00
Benzene Absorption Capacity, min (%)	35,00	35,00	36,00	35,00	36,00
CTC Absorption Capacity, min (%)	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
Methylene Blue, min (ml/gr)	150	150	150	150	150
PH (%)	9- 9,5	9- 9,5	9- 9,5	9- 9,5	9- 9,5
Fe +++ (%)	0,02	0,02	0,065	0,05	0,02
SO4 -- (%)	0	0	0	0	0
Cl - (%)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Sumber : Ratson Inc.

Percontoh adsorben dicampur pada tangki pencampur dengan menggunakan pengaduk mekanis (*stirrer*) untuk mendapatkan pencampuran yang merata. Ketika pompa vakum bekerja, udara akan berkurang di dalam tangki vakum disertai aliran udara dari silinder pencetak dan secara bertahap percontoh bahan baku mengalir menuju silinder pencetak adsorben karbon aktif. Percontoh dalam silinder pencetak selanjutnya mengalami kompresi cetak pada tekanan dan temperatur tinggi (*high pressure and high temperatur briqueting*) yaitu tekanan 500 Mpa dan temperatur 200-300 °C secara bertahap untuk mendapatkan kerapatan massa adsorben yang stabil.

Jika stabilitas kerapatan massa telah dicapai, maka selanjutnya percontoh adsorben dikeringkan dalam oven pada temperatur 60°C lalu diproses kembali di dalam oven pada temperatur 150 °C untuk menghilangkan sisa-sisa uap air. Setelah itu percontoh adsorben mengalami karbonisasi pada lingkungan gas inert pada temperatur 650°C untuk kemudian diaktivasi di lingkungan karbondioksida (CO₂) pada temperatur 800-900°C. Setelah mengalami proses tersebut, selanjutnya dilakukan proses pendinginan supaya didapat percontoh adsorben karbon aktif untuk tujuan penelitian kinerja adsorben gas bumi.

C. Rancangan Peralatan Penelitian Adsorpsi/ Desorpsi Gas Bumi

Penelitian sifat-sifat adsorpsi dan desorpsi gas bumi dari percontoh adsorben karbon aktif dilakukan dengan menggunakan rangkaian peralatan sebagaimana tercantum pada Gambar-9. Sebelum itu, koefisien volume spesifik maksimum *microporous* (koefisien Dubinin-Radushkevich) diukur dengan

menggunakan alat-alat *High Speed Gas Sorption Analyser NOVA 1200, Micrometics AccuSorb 2100* dan *BET Sorptometer NOVA* atau yang sejenis.

D. Langkah-Langkah Penelitian

Penelitian kinerja adsorben karbon aktif akan dilaksanakan dengan tahapan-tahapan sebagai berikut:

- Sintesa percontoh adsorben dengan kombinasi bahan baku seperti tercantum pada Tabel 5.
- Lakukan pengukuran kandungan energi dalam minyak tanah, LPG dan BBG.
- Tentukan target kapasitas penyimpanan berdasarkan kandungan energi minyak tanah, LPG dan BBG.
- Lakukan pengamatan kinerja percontoh adsorben dengan menggunakan peralatan seperti termuat di Gambar 10, akan didapat kapasitas adsorpsi dan desorpsi BBG hasil pengukuran.
- Lakukan pengukuran koefisien Dubinin-Radushkevich dan Energi aktivasi dengan

Tabel 4
Contoh Spesifikasi Perikat Adsorben

Model	RD-381
Viskositas, Mpa	3500-4000
Kandungan Padatan, %	≥ 75.0
Kandungan Uap Air,	≤ 5.5
Phenol Bebas, %	≤ 14.0
pH	6.5-7.0

Sumber : Ratson, Inc.

Tabel 5
Kombinasi Percontoh Penelitian Kinerja Adsorben Karbon Aktif Sabut Kelapa

No.	Percontoh	Campuran
1.	YKC-1	serbuk karbon aktif tanpa disaring dan bubuk resin phenolik
2.	YKC-2	serbuk karbon aktif tanpa disaring dan bubuk resin phenolik ditambah kristal CaCl ₂
3.	YKC-3	serbuk karbon aktif tanpa disaring dan bubuk resin phenolik ditambah kristal NaCl
4.	YKC-4	serbuk karbon aktif disaring <0,075 mm dan bubuk resin phenolik
5.	YKC-5	serbuk karbon aktif disaring <0,075 mm dan bubuk resin phenolik ditambah kristal CaCl ₂
6.	YKC-6	serbuk karbon aktif disaring <0,075 mm dan bubuk resin phenolik ditambah kristal NaCl

menggunakan peralatan *High Speed Gas Sorption Analyser NOVA 1200, Micrometics AccuSorb 2100* dan *BET Sorptometer NOVA* atau yang sejenis.

- f. Lakukan perhitungan kapasitas adsorpsi BBG dengan menggunakan persamaan (1) dan persamaan (2). Diperoleh kapasitas adsorpsi dan desorpsi BBG hasil perhitungan.
- g. Bandingkan kapasitas adsorpsi dan desorpsi BBG hasil pengukuran dan hasil perhitungan.
- h. Lakukan analisis karakterisasi percontonya adsorben BBG karbon aktif melalui parameter-parameter kinerja adsorben dan pengukuran di laboratorium.
- i. Bandingkan kinerja percontonya adsorben karbon aktif dan tentukan adsorben dengan kinerja tertinggi.
- j. Formulasikan adsorben karbon aktif dengan kinerja tertinggi untuk diterapkan pada proses penyimpanan dan distribusi BBG tekanan rendah.
- k. Tentukan rencana pengembangan adsorben BBG karbon aktif di masa yang akan datang.

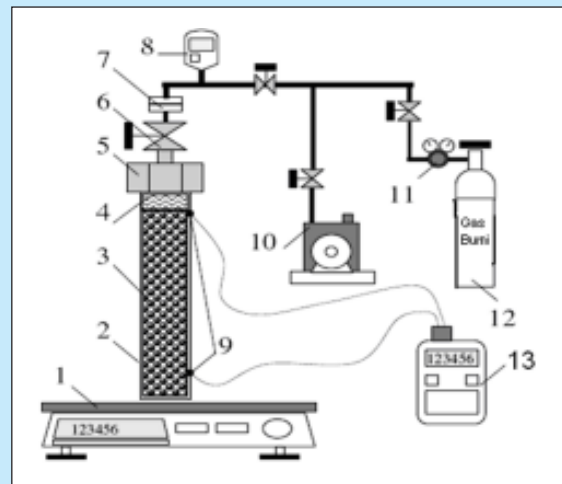
E. Pengukuran Kandungan Energi Minyak Tanah, LPG Dan BBG

Salah satu potensi penerapan adsorben BBG karbon aktif adalah di subsektor rumah tangga. Pada subsektor rumah tangga BBG dapat mensubstitusi minyak tanah dan sebagai komplemen terhadap LPG rumah tangga. Oleh karena itu perlu dilakukan pengukuran kandungan energi per satuan volume dari minyak tanah, BBG dan LPG untuk menentukan massa adsorben yang diperlukan supaya kandungan energi BBG yang teradsorpsi setara dengan volume minyak tanah atau berat LPG.

Jika kandungan energi minyak tanah per liter adalah E_{mt} , kandungan energi LPG per Kg adalah E_{LPG} dan kandungan energi BBG per liter setara minyak tanah adalah E_{BBG} , sedangkan kapasitas adsorpsi BBG adalah A_{BBG} liter per Kg Adsorben, maka massa adsorben yang diperlukan untuk menyimpan energi setara 1 liter minyak tanah dan energi setara 1 Kg LPG masing-masing adalah $(E_{mt}/E_{BBG}) \times A_{BBG}$ Kg dan $(E_{LPG}/E_{BBG}) \times A_{BBG}$ Kg.

F. Pengukuran Karakteristik Adsorben BBG Karbon Aktif

Kinerja percontonya adsorben yang diteliti dapat ditunjukkan melalui parameter-parameter dominan



Peralatan Percobaan:

1. Timbangan elektronis presisi tinggi,
2. Reaktor,
3. Percontonya adsorben,
4. Filter (pencegahan migrasi partikel ke sistem),
5. Tutup reaktor,
6. Valve,
7. *Quick release coupling*,
8. Sensor tekanan,
9. *Thermocouple*,
10. Pompa vakum,
11. *Reducer*,
12. Silinder metana,
13. Indikator Temperatur

Gambar 10
Rangkaian Peralatan Penelitian Kinerja Percontonya Adsorben Karbon Aktif.^{35,42}

yang mewakilinya yaitu kerapatan massa, luas permukaan (spesifik), konduktivitas termal, kuat tekan, resistivitas elektrik dan kapasitas penyimpanan BBG.

V. RENCANA PENGEMBANGAN ADSORBEN BBG KARBON AKTIF

Setelah memperoleh formulasi adsorben BBG karbon aktif berkinerja tinggi berdasarkan penelitian ini maka perlu dipertimbangkan rencana pengembangan dan penggunaannya di masa mendatang. Perencanaan pengembangan adsorben BBG karbon aktif meliputi:

- Rencana produksi adsorben BBG karbon aktif skala laboratorium.
- Pra studi kelayakan komersialisasi adsorben BBG karbon aktif.

- Rencana proyek percontohan penggunaan adsorben BBG karbon aktif pada subsektor rumah tangga.

A. Rencana Produksi Adsorben BBG Karbon Aktif Skala Laboratorium

Dengan formulasi adsorben BBG karbon aktif berkinerja tinggi yang diperoleh, selanjutnya dilakukan perencanaan produksi adsorben BBG karbon aktif pada tingkat skala laboratorium dengan mengikuti proses sintesa yang telah dilakukan selama penelitian disertai ini.

Pada skala laboratorium, direncanakan akan dibuat adsorben BBG karbon aktif dengan massa sesuai tujuan penggunaannya, yaitu:

- Penggunaan adsorben BBG karbon aktif pada subsektor rumah tangga untuk penyimpanan dan distribusi BBG dalam rangka substitusi minyak tanah oleh gas bumi
- Penggunaan adsorben BBG karbon aktif sebagai komplemen terhadap penggunaan LPG rumah tangga.

Di subsektor rumah tangga akan dibentuk adsorben BBG karbon aktif dengan massa $E_{mt} / E_{BBG} \times A_{BBG}$ Kg dan $E_{LPG} / E_{BBG} \times A_{BBG}$ Kg. Selanjutnya semua adsorben dikemas sedemikian rupa supaya aman digunakan sebagai tangki penyimpanan dan distribusi BBG di subsektor rumah tangga serta dilakukan pengamatan-pengamatan karakteristik adsorben BBG karbon aktif seperti yang dilakukan pada saat penelitian disertai. Modifikasi-modifikasi yang diperlukan untuk perbaikan kinerja adsorben BBG karbon aktif akan direkomendasikan sesuai dengan temuan yang terjadi di lapangan pada tingkat skala laboratorium.

B. Rencana Pra Studi Kelayakan

Komersialisasi Adsorben BBG Karbon Aktif

Sebelum tahap komersialisasi adsorben BBG karbon aktif direalisasikan, diperlukan studi kelayakan untuk mengkaji aspek-aspek teknis, keekonomian, dampak lingkungan serta akseptabilitas masyarakat. Tetapi, untuk mempertajam fokus dan ruang lingkup studi kelayakan diperlukan tahap pra studi kelayakan komersialisasi adsorben BBG karbon aktif.

Hal-hal yang memerlukan perhatian dalam tahap pra studi kelayakan ini meliputi antara lain:

- Identifikasi bahan baku yang tersedia di pasaran terutama dalam negeri beserta spesifikasinya.

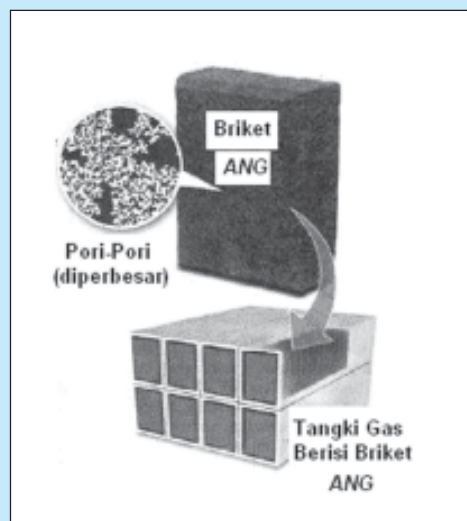
- Identifikasi peralatan produksi dan pengujian mutu adsorben BBG karbon aktif.
- Prediksi kinerja adsorben BBG karbon aktif berdasarkan variasi bahan baku yang tersedia.
- Batas-batas keekonomian produksi adsorben BBG karbon aktif.
- Kajian batas-batas keamanan penggunaan adsorben BBG karbon aktif.
- Rencana pengembangan Rancangan Standar Nasional Indonesia tentang adsorben BBG karbon aktif.

C. Rencana Proyek Percontohan Penggunaan Adsorben BBG Karbon Aktif Pada Subsektor Rumah Tangga

Menurut sifatnya, adsorben BBG karbon aktif berpotensi untuk diterapkan sebagai salah satu media penyimpanan dan distribusi BBG tekanan rendah di subsektor rumah tangga. Sebelum hal ini dapat diimplementasikan, maka perlu dilaksanakan "Proyek Percontohan Penggunaan Adsorben BBG Karbon Aktif Pada Subsektor Rumah Tangga" untuk mengantisipasi berbagai kesulitan yang dapat muncul.

Garis besar rencana "Proyek Percontohan Penggunaan Adsorben BBG Karbon Aktif Pada Subsektor Rumah Tangga" ini perlu mencakup:

- Rencana produksi adsorben BBG karbon aktif



Gambar 11
Contoh Tangki Asorben BBG
Karbon Aktif.¹⁰

dengan massa sebesar $E_{MT}/E_{BBG} \times A_{BBG}$ Kg untuk program substitusi minyak tanah dan $E_{LPG}/E_{BBG} \times A_{BBG}$ Kg untuk komplemen penggunaan LPG rumah tangga.

- Rancang bangun tangki adsorben BBG karbon aktif seperti contoh yang tercantum pada Gambar 11.
- Rancang bangun fasilitas pengisian gas bumi untuk tangki adsorben BBG karbon aktif.
- Pendistribusian adsorben karbon aktif yang sudah terisi BBG.
- Pengamatan kinerja tangki adsorben BBG karbon aktif.

VI. KESIMPULAN

Hal-hal penting yang perlu diperhatikan dalam penelitian dan pengembangan adsorben karbon aktif untuk penyimpanan dan distribusi gas bumi tekanan rendah, terdiri dari:

- Bahan baku adsorben gas bumi adalah fiber alam seperti serbuk sabut kelapa (*coconut shell*) tongkol jagung (*corn cob*) serta perekat organik ekstrak karbohidrat cukup tersedia di Indonesia.
- Adsorben dengan perekat organik memiliki kapasitas penyimpanan gas bumi lebih besar dibanding adsorben dengan perekat anorganik.
- Kriteria kualitatif adsorben penyimpanan BBG berkinerja tinggi (*high performance adsorbent*) meliputi:
 - Kapasitas adsorpsi dan desorpsi BBG tinggi. Sifat yang fundamental terkait kriteria ini adalah luas permukaan spesifik yang tinggi dan jumlah ukuran mikro pori yang tinggi serta terdistribusi secara merata dalam adsorben supaya proses penyerapan dan pelepasan BBG berlangsung cepat dan mudah. Parameter ini dapat menentukan jumlah *adsorbate* (BBG) yang dapat terakumulasi per satuan volume adsorben pada tekanan dan temperatur standar serta jumlah BBG yang dapat dilepaskan dari adsorben semaksimal mungkin pada tekanan atmosferik dan temperatur ambien. Supaya secara komersial layak dikembangkan, kapasitas penyimpanan BBG dalam adsorben minimal 150 v/v. Faktor lain yang perlu dimiliki oleh adsorben BBG berkinerja tinggi adalah konduktivitas termal tinggi supaya proses transfer masa dan panas cepat dan efektif. Per-

bedaan temperatur yang tinggi selama proses adsorpsi dan desorpsi BBG berlangsung akan mengakibatkan penurunan akumulasi gas dan/atau pengurangan pelepasan BBG. Dengan konduktivitas termal yang tinggi, maka gradien temperatur yang rendah selama proses tersebut berlangsung dapat dijaga sehingga dapat meningkatkan kembali kinerja adsorben BBG.

- Kinetika adsorpsi yang baik. Artinya, laju adsorpsi BBG yang cepat serta dapat dikontrol sesuai tujuan penggunaannya. Kinetika adsorpsi ditentukan oleh ukuran partikel kristalin yaitu makro, meso dan mikro porositas serta dipengaruhi oleh jumlah dan jenis *binder* yang digunakan.
- Sifat mekanis yang unggul. Adsorben BBG berkinerja tinggi perlu mempunyai sifat ketahanan mekanis yang kuat, tahan terhadap erosi dan benturan-benturan di dalam tangki atau tabung nantinya. Adsorben dengan massa jenis dan *compressive strength* yang tinggi, bersifat kuat terhadap benturan, tahan erosi serta memiliki resistansi yang tinggi adalah adsorben BBG yang mempunyai sifat mekanis yang unggul.
- Stabilitas dan durabilitas tinggi. Adsorben BBG akan mengalami proses-proses kimiawi serta berada pada kondisi tekanan dan termal yang dinamis. Stabilitas dalam kondisi lingkungan seperti itu perlu dimiliki oleh adsorben BBG untuk menjamin masa pakai yang panjang.
- Ketersediaan bahan adsorben, yaitu bahan baku karbon aktif sabut kelapa beserta zat perekat (*binder*) yang diperlukan tersedia.
- Sintesa adsorben efektif dan efisien. Adsorben BBG harus dapat disintesa dengan teknologi yang relatif sederhana sehingga tidak memerlukan biaya yang tinggi untuk produksi dan konstruksi adsorben sesuai tujuan penggunaannya yaitu menjadi tangki penyimpanan dan distribusi BBG tekanan rendah.
- Secara kuantitatif, adsorben BBG kinerja tinggi ditunjukkan oleh parameter-parameter adsorben terukur yaitu kapasitas penyimpanan, massa jenis, *compressive strength*, resistivitas listrik, konduktivitas termal, luas permukaan dan pelepasan BBG tersimpan.

KEPUSTAKAAN

1. Agarwal, R. K., "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, 1988.
2. Allen, T., 1997, "Particle Size Measurement", 5th ed., Chapman & Hall, London.
3. Banks, M et.al., 2007, "Conversion Of Waste Corncob To Activated Carbon For Use Of Methane Storage", ALLCRAFT, Lincoln University, Columbia
4. Baker, F.S., U.S. Patent No. 5,710,092, Jan. 20, 1998.
5. Bandosz T J, et. al. 2003, "Chemistry And Physics Of Carbon", Ed. L R Radovic (New York: Marcel Dekker)
6. Bansal R C, et. al. , 1988, " Active Carbon", Marcel Dekker, New York:.
7. Bourke, J., 2006, "Preparation and Properties of Natural, Demineralized, Pure, and Doped Carbons from Biomass; Model of the Chemical Structure of Carbonized Charcoal", A Master of Science in Chemistry Thesis submitted to The University of Waikato.
8. Burchell, T.D., et. al., "Carbon "1997, 35, 1279.
9. Burchell, Tim, 2000, "Carbon Fiber Composite Adsorbent Media for Low Pressure Natural Gas Storage", Carbon Materials Technology Group, Oak Ridge National Laboratory
10. Burchell, Tim & Rogers, Mike, 2000, "Low Pressure Storage of Natural Gas for Vehicular Applications", Sae Technical Paper Series 2000-01-2205
11. Carpetis, C. and W. Peschka, 'A study On Hydrogen Storage By Use Of Cryoadsorbents', Int. J. Hydrogen Energy, 5 (1980), 539-554.
12. Chaffee, A.L. et. al. , "Lignite Derived Monolithic Carbons For Methane Storage", Monash University, Victoria.
13. Chang, K. et. al., 'Behavior And Performance Of Adsorptive Natural Gas Storage Cylinders During Discharge', Appl. Therm. Eng., 16 (1996), 359-374.
14. ChenJinfu Qu, 2004, "Adsorbent of Storage Natural Gas & its Use In ANGV", Environmental Engineering Research & Development Center, University of Petroleum, Beijing
15. Chen X.S., et. al., "Theoretical And Experimental Studies Of Methane Adsorption On Micro Porous Carbons", Carbon, 35 (9): 1251-1258, 1997
16. Cheng, H. M. Q. H. Yang and C. Liu , 'Hydrogen Storage In Carbon Nanotubes', Int. J. Hydrogen Energy, 27 (2002), 193-202.
17. Cook, T.L. and D.B.Horne, "Low Pressure Adsorbed Natural Gas Vehicle Demonstration", 20th World Gas Conference, Copenhagen, 1997
18. 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.
19. Deiana, A. C. et. al. , 2004, "Use Of Grape Must As A Binder To Obtain Activated Carbon Briquettes", Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 21, No. 04, pp. 585 -591, October - December 2004
20. DeGarmo, E.P., et. al., 1988, "Materials and Processes in Manufacturing", Macmillan, New York.
21. Dubinin M. M., 'The Potential Theory Of Adsorption Of Gases And Vapors For Sorbents With Energetically Nonuniform Surfaces', Chem. Rev., 60 (1960), 235-241.
22. Dullien, F.A.L., 1979, " Porous Media, Fluid Transport and Pore Structure ", Academic Press, New York.
23. Ginzburg, Y , 2006, "ANG Storage As A Technological Solution For The Chicken-And-Egg Problem Of NGV Refueling Infrastructure Development", 23rd World Gas Conference, Amsterdam
24. Giunta, P. R., 2005, "Fabrication And Characterization Of Novel Nanocomposite Materials", A Dissertation submitted to the Department of Chemistry and Biochemistry, The Florida State University College Of Arts And Sciences
25. Harris., P J F, 1999, "Carbon Nanotubes And Related Structures. New Materials For The Twenty-First Century", Cambridge University Press, Cambridge.
26. Hartati, N. S. et.al, "Analisis Kadar Pati dan Serat Kasar Tepung beberapa Kultivar Talas

- (*Colocasia esculenta* L. Schott)", *Jurnal Natur Indonesia* 6(1): 29-33 (2003).
27. Hasller, J.W., 1951, "Active Carbon", Chemical Publishing Co., Inc., New York.
 28. Herring, C. , 1952, "Structure and Properties of Solid Surface ", University of Chicago, Chicago.
 29. Hickman, "Process For Manufacturing Activated Carbon Honeycomb Structures", US Patent No. 6,372,289 B1, April 16, 2002.
 30. Hiemenz, P.C., 1977, "Principles of Colloid and Surface Chemistry", Marcel Dekker, New York.
 31. Hynek Set. Al., 'Hydrogen Storage By Carbon Sorption', *Int. J. Hydrogen Energy*, 22 (1997), 601-610.
 32. Ikoku, Chi U., "Natural Gas Production Engineering", John Willey & Son Inc. Pennsylvania, 1984.
 33. Makogon, Y.F., 1981, "Hydrates of Natural Gas", PennWell Books, Tulsa, Oklahoma, USA.
 34. Marsh H. And Yan, D. S. "Formation Of Active Carbons From Cokes Using Potassium Hydroxide", *Carbon*, 22(6), 603611, 1984
 35. Matranga K.R., et al. "Storage Of Natural Gas By Adsorption On Activated Carbon. *Chemical Engineering Science*, 47 (7):15691579, 1992
 36. Pfeifer, Peter, 2006, "ALL-CRAFT Technology for Low-Pressure Storage of Methane from Biomass", 34th Annual Missouri Waste Management Conference, Lake Ozark, Columbia
 37. Quinn, D. , 2005, "Adsorption Storage A Viable Alternative To Compression For Natural Gas Powered Vehicles ?", All-Craft, Columbia
 38. Schulz, M. J., et. al. , 2006, "Nanoengineering of Structural, Functional, and Smart Materials ", CRC Press, Washington DC.
 39. Saito, R., et. al., 1998, " Physical Properties of Carbon Nanotubes ", Imperial College Press, London.
 40. Tanaka, K., et. al. , 1999, "The Science and Technology of Carbon Nanotubes", Elsevier, Amsterdam.
 41. Theodore, L., 2006, "Nanotechnology : Basic Calculations for Engineers and Scientists", Wiley-Interscience, New York.
 42. Vasilievi, L. L , et. al., "Activated Carbon Fiber Composites For Ammonia, Methane And Hydrogen Adsorption", *International Journal of Low Carbon Technologies* 1/2 ,
 43. Vasiliev, L. L., et.al, 'Solar – Gas Solid Sorption Refrigerator', *Adsorption*, 7 (2001), 149-161.
 44. 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.
 45. Vasiliev L. L., et.al., 'Adsorbed Natural Gas Storage And Transportation Vessels', *Int. J. Therm. Sci.*, 39 (2000), 1047-1055.
 46. Vasiliev, et. al., 'A New Method Of Methane Storage And Transportation', *Int. J. Environmentally Conscious Design & Manufacturing*, 9 (2000), 35-62.
 47. Vasiliev, et. al., 'Activated Carbon For Gas Adsorption' In Int. Conference Solid State Hydrogen Storage – Materials And Applications, Hyderabad, India., 2005.
 48. Vasiliev L. L., et. al., 'Heat Pipe Applications In Sorption Refrigerators, Low Temperature And Cryogenic Refrigeration', *Nano Science Series II*, 99 (2003), Kluwer Academic Publishers, 401-414.