



Optimalisasi Metode Aktivasi Adsorben Karbon Aktif dengan Sulfur, Tembaga, Sulfida, dan Seng Klorida Serta Uji Kapasitas Adsorpsi dengan Variasi Kondisi Saturasi Gas Alam

Eko Handoyo, Yayun Andriani, Lisna Rosmayati, Annisa Chairuna, dan Endi Suhendi

Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi “LEMIGAS”
Jl. Ciledug Raya Kav. 109, Cipulir, Kebayoran Lama, Jakarta Selatan 12230

Artikel Info:

Naskah Diterima:
12 Agustus 2020
Diterima setelah
perbaikan:
5 November 2020
Disetujui terbit:
30 Desember 2020

Kata Kunci:

optimalisasi
adsorben
impregnasi
merkuri
gas Bumi

ABSTRAK

Hidrokarbon berat diketahui dapat terkondensasi dalam pori karbon aktif sehingga menurunkan kapasitas adsorpsi adsorben merkuri yang terbuat dari karbon aktif. Untuk itu, perlu dilakukan modifikasi karbon aktif agar memiliki kapasitas adsorpsi merkuri yang optimum untuk digunakan pada lapangan migas. Penelitian ini diawali dengan tahap rancang bangun alat uji kinerja skala lab dan dilanjutkan dengan optimalisasi metode pembuatan adsorben merkuri AC-S, AC-CuS, dan AC-ZnCl₂. Adsorben yang dihasilkan dari metode pembuatan yang telah dioptimalisasi kemudian diuji adsorpsi pada temperatur embun hidrokarbon berat/temperatur uji adsorpsi 15°C/40°C, 25°C/40°C, 30°C/30°C, dan 40°C/40°C serta dikarakterisasi luas permukaannya. Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa kapasitas adsorpsi adsorben yang dibuat tidak mengalami penurunan kapasitas adsorpsi Hg saat melewati gas dengan titik embun air dan hidrokarbon sama dengan suhu proses adsorpsi. Dari penelitian ini juga dihasilkan dua metode pembuatan adsorben terbaik yang diuji pada skala laboratorium yaitu impregnasi Sulfur 33% pada temperatur 525°C selama 1 jam dengan kapasitas rata-rata 50. g mg Hg/g dan impregnasi tembaga (Cu) 34 g/l dan Sulfur 20% dengan kapasitas adsorpsi rata-rata 30.4 mg/g.

© LPMGB - 2020

PENDAHULUAN

Merkuri merupakan salah satu kontaminan yang biasanya terkandung dalam gas bumi yang dapat menyebabkan kerusakan pada fasilitas peralatan, mencemari lingkungan dan berbahaya bagi kesehatan. Konsentrasi merkuri dalam gas bumi dibatasi tidak lebih dari 100 ug/m³ (Badan Standarisasi Nasional, 2017). Jika gas bumi dicairkan menjadi LNG atau diproses menjadi produk LPG (campuran *propane* dan *butane*), konsentrasi Merkuri dibatasi tidak lebih dari 0.01 ug/m³.

Korespondensi:

E-mail: eko.handoyo@esdm.go.id (Eko Handoyo)

Karbon aktif merupakan senyawa amorf yang dihasilkan dari bahan-bahan yang mengandung karbon atau arang yang diperlakukan secara khusus untuk mendapatkan daya adsorpsi yang tinggi. Karbon aktif dapat mengadsorpsi gas dan senyawa-senyawa kimia tertentu atau sifat adsorpsinya selektif, tergantung pada besar atau volume pori-pori dan luas permukaan. Daya serap karbon aktif sangat besar, yaitu 25-100% terhadap berat karbon aktif (Darmawan, 2008).

Penelitian dan pemanfaatan adsorben berbahan dasar karbon aktif dari tempurung kelapa untuk mengeliminasi merkuri dari gas bumi sudah pernah dilakukan di Indonesia, akan tetapi masih terdapat kendala di bumi keefektifan

penyerapan merkuri pada kondisi di lapangan migasnya, terutama pada kondisi tertentu dimana gas dengan titik embun air dan hidrokarbonnya sama dengan temperatur operasi. Pada kondisi tersebut, konsentrasi hidrokarbon berat dan uap air yang tinggi menyebabkan uap air dan hidrokarbon terkondensasi di pori-pori adsorben karbon aktif dan menurunkan kapasitas penyerapannya.

Hasil karbonisasi tidak bisa digunakan sebagai adsorben karena porinya tidak berkembang tanpa adanya perlakuan aktivasi. Proses aktivasi sendiri menghasilkan karbon oksida yang tersebar dalam permukaan karbon karena adanya reaksi antara karbon dengan zat pengoksidasi (Kinoshita, 1988). Tujuan utama dari proses aktivasi adalah menambah atau mengembangkan volume pori dan memperbesar diameter pori yang telah terbentuk pada proses karbonisasi serta untuk membuat beberapa pori baru.

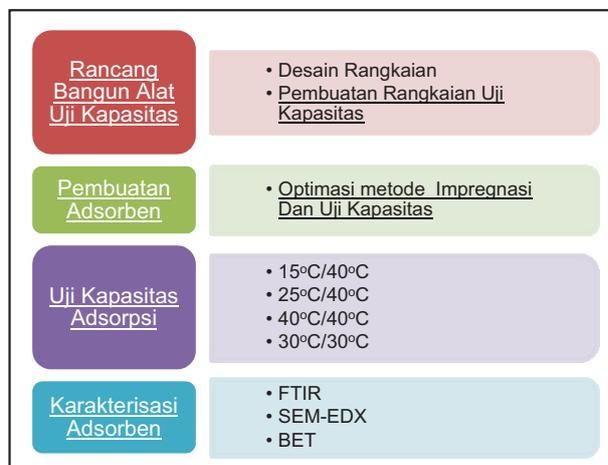
Karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa banyak diproduksi di dalam negeri, oleh karena itu adsorben tersebut akan dikembangkan pada kegiatan penelitian ini dengan metode impregnasi yang berbeda, diantaranya adalah adsorben karbon aktif yang diimpregnasi sulfur (sering digunakan pada adsorben komersial), tembaga sulfide, $ZnCl_2$. Beberapa metode impregnasi yang lain juga akan dicoba kapasitasnya. Adsorben yang memiliki kapasitas terbesar akan dikembangkan pada tahapan penelitian selanjutnya. Tujuan penelitian ini adalah untuk membuat adsorben dengan kapasitas adsorpsi merkuri yang optimum pada kondisi lapangan migas dan memperoleh data hasil kinerja adsorben pada skala laboratorium. Dari hasil penelitian ini, bisa didapatkan metode pembuatan karbon aktif yang memiliki kapasitas terbaik pada kondisi gas basah ataupun kering dan akan diketahui pengaruh adanya hidrokarbon berat dan air pada berbagai metode impregnasi adsorben yang dibuat. Metode yang memiliki kapasitas adsorpsi terbesar akan dianggap sebagai metode terbaik dalam pembuatan adsorben skala komersial.

BAHAN DAN METODE

Parameter yang menjadi pertimbangan dalam pembuatan adsorben merkuri adalah kapasitas adsorpsi adsorben untuk menyerap merkuri dari gas bumi yang dijenuhkan elemental Merkuri (Hg^0) dalam fase gas. Semakin besar kapasitas adsorpsi akan semakin baik karena berat adsorben yang dibutuhkan semakin sedikit. Karenanya, kapasitas

adsorpsi merkuri menjadi pertimbangan awal dalam pemilihan metode pembuatan adsorben.

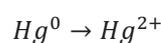
Secara umum, metodologi penelitian dilakukan seperti pada Gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1
Tahapan penelitian adsorben merkuri.

A. Rancang Bangun Alat Uji Kapasitas Adsorpsi

Tahap pertama dari kegiatan penelitian ini adalah mendesain dan membuat rancang bangun alat uji kapasitas adsorpsi adsorben Merkuri untuk digunakan pada tahap optimasi metode pembuatan Adsorben. Prinsip kerja dari rancangan ini adalah dengan mengalirkan gas bumi melewati saturator Merkuri (tabung yang didalamnya terdapat 50gram Elemental Merkuri (Hg^0)). Uap Elemental Merkuri (Hg^0) terbawa aliran gas ke adsorben yang diuji dan gugus aktif permukaan akan bereaksi dengan Merkuri elemental dengan reaksi sebagai berikut:



Selama pengujian, volume gas di gas meter dicatat berkala dan konsentrasi merkuri dalam gas sebelum dan setelah adsorben uji dianalisa tiap jam menggunakan NIC WA-4 dan WA-5 *Mercury Analyzer*. Uji kapasitas dihentikan setelah konsentrasi Merkuri dari gas yang keluar dari adsorben mencapai $1000\mu g/m^3$. Desain rancangan yang telah dibuat digambarkan pada Gambar 2 (atas) dengan kondisi operasi pada Tabel 1.

Kapasitas adsorpsi dari adsorben dipengaruhi oleh kondensasi hidrokarbon berat dan air, sehingga pertimbangan selanjutnya adalah mengetahui kemampuan adsorpsi adsorben terhadap merkuri pada kondisi gas bumi mengandung hidrokarbon berat yang konsentrasinya dinyatakan dalam titik

embun hidrokarbon dan air. Pada uji ini, gas alam dijenuhkan terlebih dahulu dengan Heksana dan air dengan suhu saturasi 15°C, 25°C, 30°C, dan 40°C serta temperatur uji adsorpsi 30°C dan 40°C. Kemudian, gas dialirkan ke saturator merkuri untuk meningkatkan konsentrasi merkuri dalam gas dan adsorben uji dimana merkuri akan diadsorpsi adsorben. Uji kapasitas dihentikan ketika konsentrasi Hg di gas yang keluar dari di *outlet* adsorben mencapai 1000ug/m³. Desain rancangan yang telah dibuat digambarkan pada Gambar 2.

Kapasitas adsorpsi Hg dihitung dengan menjumlahkan selisih konsentrasi gas *inlet* dan outlet dari volume gas 0 L hingga volume dimana konsentrasi gas *outlet* adsorben mencapai 1000ug/m³ dengan persamaan sebagai berikut:

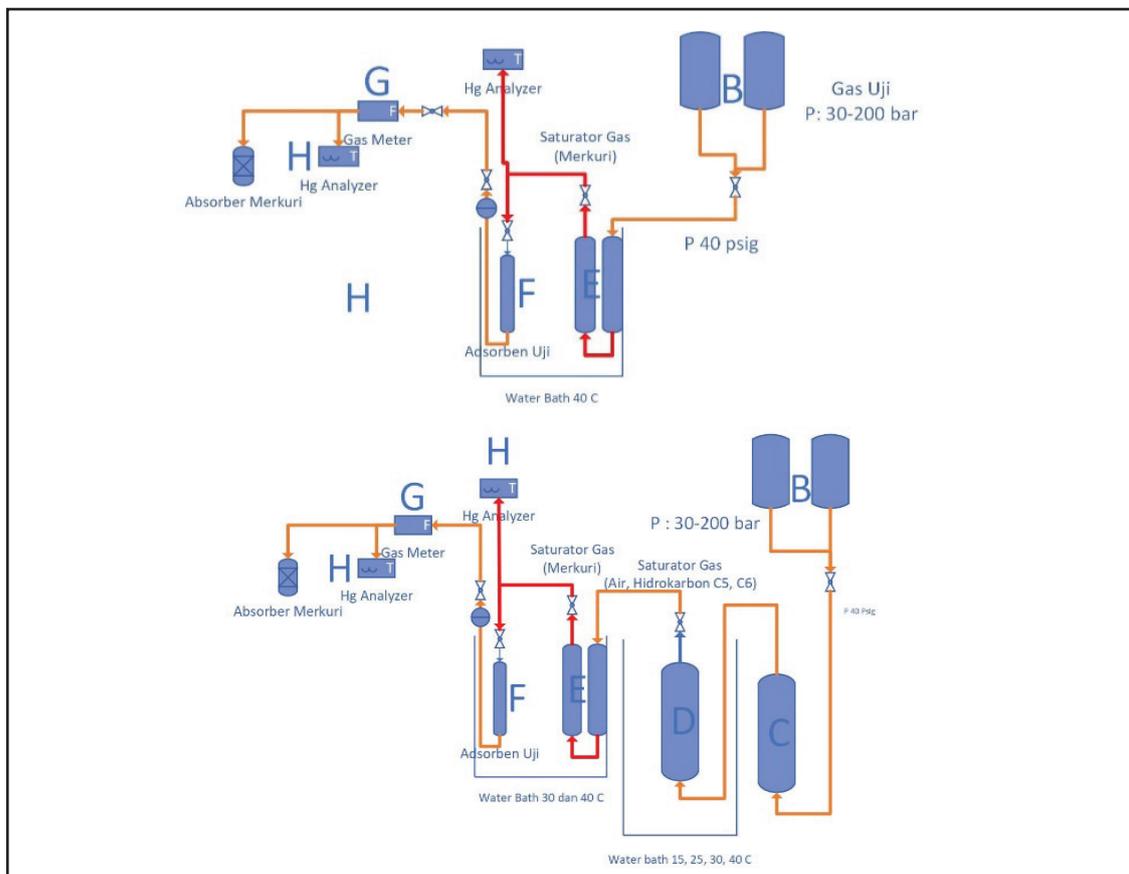
$$\frac{m_{Hg Ads}}{m_{Adsorbent}} = \sum_{V=0}^V \frac{(C_{in} - C_{out})\Delta V}{m_{Adsorbent}}$$

Dimana:

- $m_{Hg Ads}$: Berat Hg teradsorpsi (mg)
- $m_{Adsorbent}$: Berat Adsorben Uji (g)
- C_{out} : Konsentrasi Hg di *outlet* adsorben (ug/m³)
- C_{in} : Konsentrasi Hg di *inlet* adsorben (ug/m³)
- V : Volume gas yang mengalir ke dalam adsorben (m³)

Tabel 1
Kondisi operasi uji kapasitas adsorpsi merkuri

No.	Kondisi	Nilai
1	Berat adsorben Uji	0,1 gram
2	Laju alir	55 L/jam
3	Diameter kolom Uji	6 mm
4	Tinggi kolom	7,5 mm
5	Superficial Velocity	69 mm/s
6	Waktu Kontak	0,11 s
7	Temperatur Uji	40°C
8	Tekanan Uji	40 psig



Gambar 2
Desain rangkaian adsorpsi tanpa saturasi hidrokarbon dan air (atas), dengan saturasi hidrokarbon dan air (bawah).

B. Pembuatan dan Optimalisasi Metode Impregnasi Adsorben

Pada penelitian ini, digunakan karbon aktif Karbosorb dari PT. AIMTOPINDO yang dibuat dari tempurung kelapa. Karbon aktif digerus dan diayak hingga ukuran 60-80 mesh. Karbon aktif kemudian diimpregnasi dengan metode berikut.

1. AC-ZnCl₂

Metode pembuatan karbon aktif yang diimpregnasi ZnCl₂ mengikuti prosedur sebelumnya (Rosmayati, dkk., 2013) (Hu, dkk., 2009). Pada tahap ini, impregnasi dilakukan menggunakan larutan ZnCl₂ dengan konsentrasi 5%, 6%, dan 7% di tahap optimalisasi. Pada tahap uji lanjutan, karbon aktif diimpregnasi dengan ZnCl₂ 7%, 8%, dan 9%.

2. AC-S

Prosedur pembuatan karbon aktif yang diimpregnasi bubuk Sulfur berdasarkan sumber lain (Reddy, dkk., 2014). Pada tahap optimalisasi dibuat variasi temperatur 450°C, 475°C, 500°C, 525°C, dan 550°C serta variasi Hidrokarbon: Sulfur 3:3, 3:2, dan 3:1.

3. AC-CuS , CuS I

Impregnasi dengan larutan NaS, CuS(I).

Metode pembuatan AC-CuS merujuk pada tulisan lain (Reddy, dkk., 2018; Reddy, dkk., 2015) impregnated carbons (*silver/sulfur/iodide*). Variasi yang dilakukan pada tahap optimalisasi adalah variasi konsentrasi berat CuCl₂ 1.2, 2.4, dan 3.6 gram. Sedangkan berat NaS divariasikan 1.5, 3, dan 4.5 gram.

4. AC-CuS impregnasi dengan Sulfur ,CuS II

Pembuatan adsorben karbon aktif yang diimpregnasi dengan tembaga sulfida dilakukan melalui dua tahap yaitu impregnasi dengan larutan Cu dan dilanjutkan impregnasi bubuk Sulfur. Prosedur impregnasi Cu adalah dengan menimbang 25 gram karbon aktif dan 3,4% CuCl₂.2H₂O 100 ml. Larutan distirer dan dipanaskan pada temperatur 120°C hingga kering. Karbon aktif kemudian dibilas aquades 5-10 kali dan dikeringkan kembali pada temperatur 110°C selama 12 jam. Tahap selanjutnya adalah dengan melakukan impregnasi pada temperatur 450°C, 500°C, dan 550°C serta variasi % berat bubuk Sulfur 13%, 20%, dan 33% selama 1 jam. Selanjutnya, temperatur impregnasi 500°C diuji kapasitas adsorpsinya pada tahap uji adsorpsi lanjutan.

5. Karakterisasi Adsorben

Adsorben dikarakterisasi luas permukaan dan distribusi pori menggunakan *Quantachrome Nova 4200e* di Pusat Penelitian Fisika Lipi.

HASIL DAN DISKUSI

A. Optimalisasi Impregnasi AC-S

Dari Gambar 3 diketahui bahwa impregnasi karbon aktif dengan Sulfur merupakan fungsi dari temperatur dan perbandingan Karbon:Sulfur. Semakin besar perbandingan rasio Sulfur terhadap karbon aktif pada temperatur impregnasi yang sama, semakin banyak Sulfur yang terimpregnasi di permukaan karbon aktif. Semakin tinggi temperatur impregnasi, semakin sedikit sulfur yang terimpregnasi karena Sulfur yang memiliki titik didih 445°C lebih cepat menguap dan keluar dari tabung pemanas.

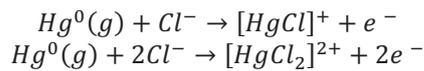
Dari grafik juga dapat terlihat bahwa semakin banyak sulfur terimpregnasi tidak menjamin peningkatan kapasitas adsorpsi merkuri. Pada temperatur impregnasi 450°C, kapasitas adsorpsi paling rendah. Kapasitas adsorpsi juga tidak menunjukkan peningkatan ketika rasio Karbon:Sulfur naik dari 3:1 menjadi 3:3. Hal ini dapat disebabkan karena pada suhu 450°C, Sulfur masih berbentuk cincing atau rantai Sulfur yang panjang(). Sulfur ini cenderung saling mengumpul dan menutup pori karbon aktif dan menurunkan luas permukaan karbon aktif (Reddy, dkk., 2014).

Ketika temperatur impregnasi naik dari 450°C hingga 525°C, kapasitas adsorpsi cenderung naik. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi suhu impregnasi, semakin pendek rantai Sulfur (S2 hingga S4) dan rantai pendek ini lebih terdistribusi di permukaan karbon aktif (Reddy, dkk., 2014). Pada temperatur lebih tinggi, Sulfur yang ada di permukaan karbon aktif menguap, mengurangi konsentrasi Sulfur di permukaan karbon aktif dan mengurangi gugus aktif di permukaan karbon aktif.

Berdasarkan data pada grafik di atas, maka metode pembuatan adsorben AC-S dengan temperatur impregnasi 525°C, waktu pemanasan 1 jam, dan rasio karbon:sulfur 3:1, 3:2, dan 3:3 akan diuji pada tahap selanjutnya.

B. Optimalisasi Impregnasi AC-ZnCl₂

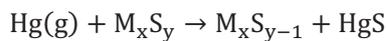
Reaksi antara Hg dalam gas dan Cl⁻ adalah sebagai berikut (Zeng, Jin, Guo, 2004):



Tabel 3 menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi meningkat seiring meningkatnya impregnasi $ZnCl_2$ hingga maksimum pada konsentrasi 7% $ZnCl_2$ dan belum mengalami penurunan sehingga dapat disimpulkan bahwa kapasitas adsorpsi merkuri belum mencapai titik optimum. Karenanya, konsentrasi aktivator akan ditingkatkan pada tahap uji kapasitas adsorpsi lanjutan.

C. Optimalisasi Impregnasi AC-CuS (AC-CuS I)

Pada karbon aktif yang diimpregnasi Tembaga-Sulfida, Sulfur terikat Tembaga sehingga resiko Sulfur larut dalam $C3+$ yang terkondensasi dan mengkontaminasi hilir unit adsorpsi dapat diminimalkan (Reddy, dkk., 2018). Reaksi proses adsorpsi Merkuri adalah sebagai berikut:



Dari hasil optimalisasi metode pembuatan, seperti yang ditampilkan pada Gambar 4, diketahui bahwa metode pembuatan optimum adalah dengan menggunakan 3.6 gram $CuCl_2$ dan 3gram NaS . Metode pembuatan ini kemudian diujicobakan pada uji adsorpsi lanjutan.

D. Optimalisasi Impregnasi AC-CuS (AC- CuS II)

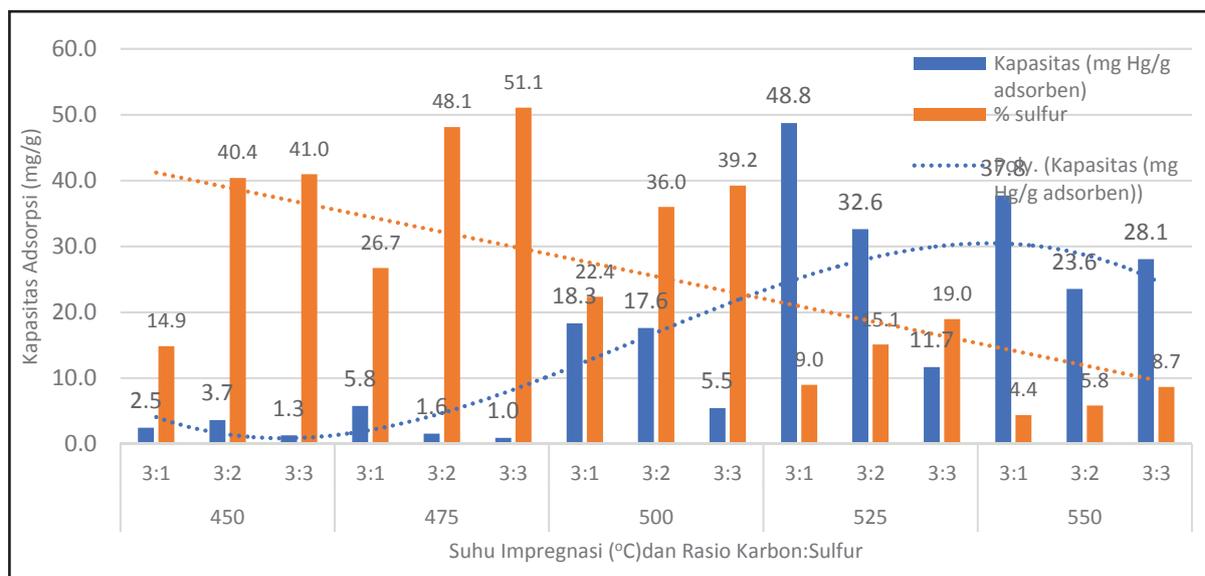
Dari hasil optimalisasi adsorpsi (Gambar 5) diketahui bahwa pada temperatur impregnasi $450^\circ C$ dan $500^\circ C$, kapasitas adsorpsi optimum terjadi dengan impregnasi Sulfur 20%. Kapasitas adsorpsi turun pada impregnasi 33%. Hal ini berbeda dengan temperatur impregnasi $550^\circ C$ dimana kapasitas adsorpsi turun seiring kenaikan sulfur terimpregnasi. Dari gambar juga diketahui bahwa adsorben yang diimpregnasi dengan CuS (II) memiliki kapasitas tertinggi pada temperatur impregnasi $500^\circ C$ sehingga metode pembuatan ACS(II) akan diteruskan pada uji kapasitas adsorpsi lanjutan.

E. Uji Kapasitas Adsorpsi Impregnasi Sulfur (AC-S)

Dari Gambar 6, tidak terlihat kecenderungan penurunan kapasitas yang jelas karena pengaruh kondisi saturasi gas terhadap kapasitas adsorpsi merkuri. Karbon aktif. AC-S 16% menunjukkan

Tabel 2
Hasil optimalisasi metode pembuatan karbon aktif impregnasi $ZnCl_2$

No	% $ZnCl_2$	Kapasitas (mg Hg/g)
1	5%	3.54
2	6%	4.55
3	7%	5.17



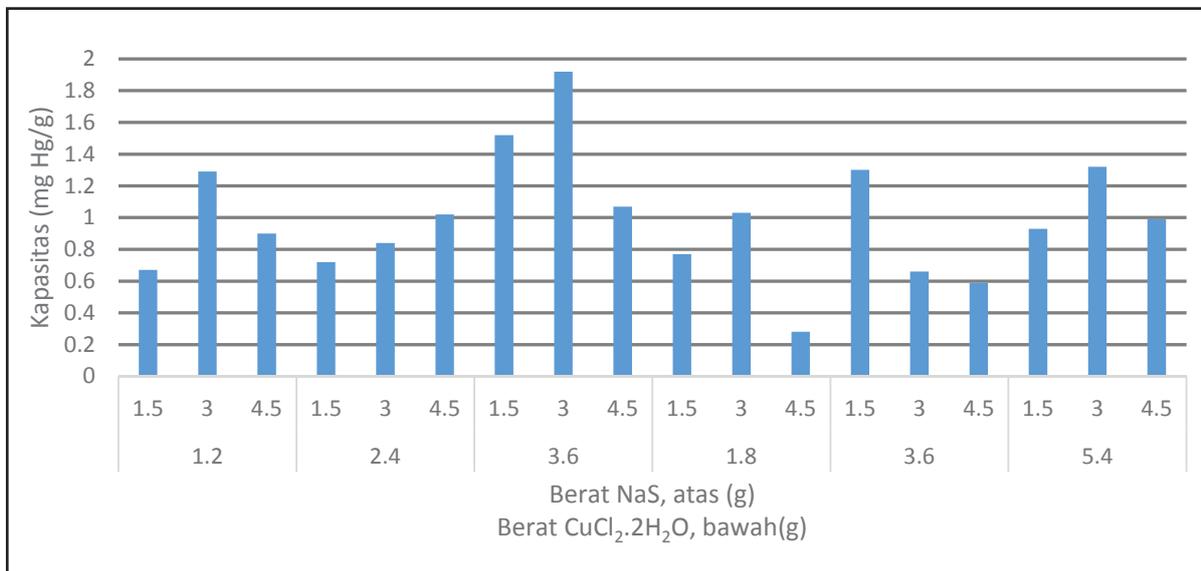
Gambar 3
Hasil optimasi metode pembuatan AC-S.

peningkatan kapasitas seiring peningkatan temperatur saturasi gas. AC-S 33% dan 50% tidak menunjukkan adanya trend yang jelas yang dapat disebabkan karena fluktuasi konsentrasi merkuri dari gas yang dilewatkan ke adsorben pada rentang 4-10 mg/m³. Adsorben yang melewatkan gas dengan konsentrasi merkuri besar akan lebih cepat jenuh dibandingkan adsorben yang melewatkan gas dengan konsentrasi merkuri yang rendah. Akibatnya, trend sulit digambarkan, terutama untuk adsorben dengan kapasitas yang rendah. Namun demikian, Hasil ini tetap menunjukkan bahwa kenaikan titik embun hidrokarbon dan air pada gas tidak menurunkan kapasitas adsorpsi AC-S. Selain itu, karena fluktuasi terjadi pada semua jenis adsorben, maka rata-rata

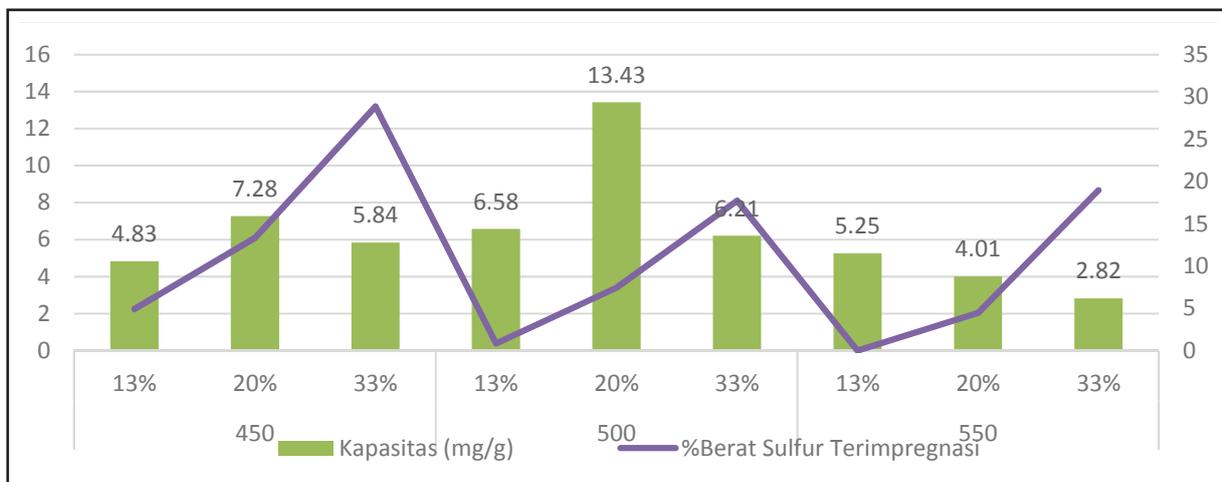
kapasitas dari semua kondisi dapat menggambarkan metode pembuatan yang memiliki kapasitas terbaik.

Secara rata-rata, seperti digambarkan pada Gambar 7, kapasitas adsorpsi karbon aktif AC-S turun seiring dengan meningkatnya sulfur yang diimpregnasikan. Meningkatnya Sulfur terimpregnasi juga menurunkan luas permukaan dan volume pori karbon aktif (Hsi dkk., 2001).

Dari data diatas juga dapat terlihat bahwa belum didapat kapasitas optimum kapasitas karbon aktif. Jika berat impregnan Sulfur diturunkan, kapasitas dapat naik hingga tahap dimana konsentrasi sulfur tidak dapat menutupi seluruh area permukaan karbon aktif. Pada tahap ini, kapasitas adsorpsi merkuri akan mengalami penurunan (Hsi dkk., 2001).



Gambar 4
Kapasitas adsorpsi AC-CuS dengan variasi NaS dan CuCl₂.2H₂O.



Gambar 5
Kapasitas adsorpsi AC-CuS(II).

Hasil dari penelitian lain adsorben karbon aktif diimpregnasi sulfur memiliki kapasitas adsorpsi lebih besar dari 25 mg Hg/g Adsorben(Lee & Park, 2003) . Dibandingkan penelitian ini, penelitian yang dilakukan oleh Lee & Park (2003) belum mencapai titik jenuh adsorben sehingga kapasitas adsorpsi sebenarnya lebih besar dari 25 mg Hg/g.

Sano, dkk. (2017) membuat dan menguji karbon aktif yang diimpregnasi Sulfur dan didapatkan kapasitas adsorpsi mencapai 21 mg Hg/gram karbon aktif dengan waktu kontak yang lebih lambat 20 kali(2.51 s), karbon aktif yang diuji lebih banyak 20 kali (2 gram) dan laju alir lebih lambat lebih dari 1000 kali (0.036 L/jam). Karena tidak ada informasi mengenai ukuran partikel adsorben yang diuji, luas permukaan karbon aktif mencapai 1444 m²/g umumnya didapat dengan ukuran partikel dengan mesh yang lebih besar dari 80. Meskipun demikian, penelitian tersebut menggunakan konsentrasi breakthrough 100ug/m³, 10 kali lebih kecil dari penelitian ini yang mencapai 1000 ug/m³. Mempertimbangkan hal tersebut, maka dapat karbon aktif yang diimpregnasi sulfur 16% memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih baik dibandingkan karbon aktif yang dikembangkan oleh Sano, dkk. (2017).

Pada Tabel 4, dipaparkan penelitian kapasitas adsorpsi adsorben merkuri komersial karbon aktif yang diimpregnasi sulfur yang telah dilakukan. Kapasitas adsorpsi maksimum karbon aktif komersial adalah 18mg Hg/g. Kapasitas adsorben komersial ini jauh lebih kecil dibandingkan kapasitas adsorben AC-S16% yang mencapai 50 mg Hg/g adsorben. Terdapat perbedaan metode uji kapasitas adsorben diantaranya adalah:

- Konsentrasi Merkuri yang besar untuk mempercepat waktu pengujian
- Diuji dengan gas bumi yang ditambahkan hidrokarbon berat dan air yang sesuai dengan kondisi lapangan serta kondisi bertekanan (40 psig)
- Perhitungan akhir uji kapasitas dibatasi ketika konsentrasi outlet adsorben 10-25% konsentrasi inlet.

F. Uji Kapasitas Adsorpsi Impregnasi Tembaga-Sulfur (AC-CuS I dan AC-CuS II)

Sama dengan Adsorben AC-S, pada adsorben AC-CuS(II)dan CuS(I) tidak terlihat kecenderungan penurunan kapasitas akibat pengaruh dari hidrokarbon berat dan air dalam gas (Gambar 6). Pada adsorben CuS 13% dan CuS 20% serta suhu saturasi gas

Tabel 4
Kapasitas adsorpsi Hg adsorben komersial yang diuji di laboratorium

Parameter	AC-S	AC-CuS II	UOP Carbon	HGR-S	HGR (10-15% S)	BPL-S-4/1-600
Kapasitas (mg Hg/g)	50.9	30.4	2.31	2.41	18	2.3
BET (m ² /g)	510.3	435		868	573	820
% S	5%	435	1.7%	12.30%	10-15%	10-10.2%
Particle size (mm)	0.177-0.25		Powder	0.5-1.6mm	Powder	0.177-1.25
Berat uji kapasitas (g)	0.1		0.1	1	0.05	0.1
Laju alir gas (L/h)	55 (Gas alam + air + C5/C6)			300 (Natural gas)	90 (N ₂)	60 (N ₂)
Konsentrasi Hg (ug/m ³)	4000-10000			36	160	55
Waktu kontak	0.11s				0.035 s	
Breakthrough	1000ug/m ³			100%	100%	100%
Referensi	Penelitian ini		(Reddy et al., 2018)	(Chemrak, Benderdouche, Bestani, Benallou, & Cagnon, 2018)	(Lee & Park, 2003)	(Liu, Vidic, & Brown, 2000)

40°C/40°C, kapasitas adsorpsi naik, sedangkan pada AC-CuS 33%, kenaikan suhu pengembunan menyebabkan perubahan kapasitas berfluktuasi pada sentang 9-13 mg/g.

Berbeda dengan AC-S, Adsorben AC-CuS(II) menunjukkan adanya peningkatan kapasitas rata-rata pada kenaikan aktivator dari 13%S menjadi 20% S. Kapasitas adsorpsi mengalami penurunan saat aktivator dinaikkan menjadi 33%. Hal ini menunjukkan kapasitas adsorpsi optimal adalah dengan impregnasi CuS 20%. Lebih dari itu adsorben telah jenuh mengadsorpsi sehingga kapasitas adsorpsinya menurun.

Sama dengan AC-S, luas permukaan pori AC-CuS(II) juga dipengaruhi oleh jumlah impregnan. Semakin tinggi konsentrasi impregnan, semakin rendah luas permukaan (SSA) adsorben.

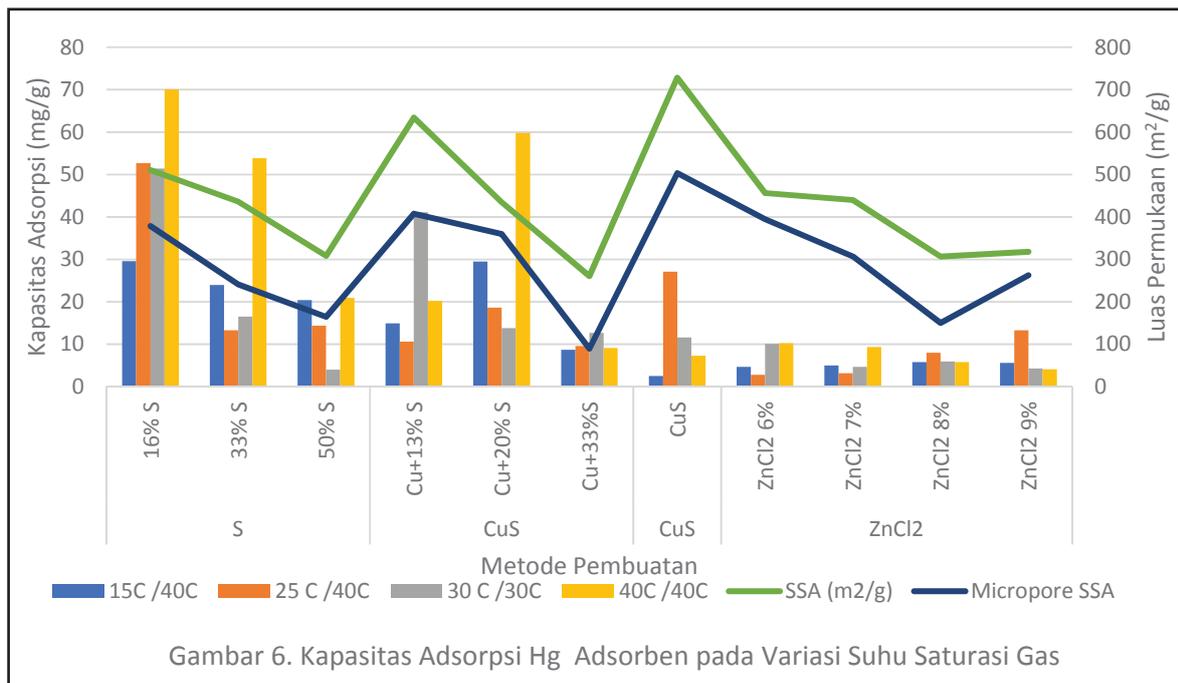
Dari hasil uji kapasitas adsorpsi, karbon aktif AC-CuS yang diimpregnasi dalam larutan CuS dan NaS memiliki kapasitas adsorpsi rata-rata 12.1 mg Hg/g. Meskipun tidak dapat dibandingkan karena informasi metode uji kapasitas yang tidak lengkap, kapasitas adsorpsi pada penelitian ini lebih baik dibandingkan penelitian adsorben karbon aktif yang diimpregnasi logam sulfida yang lain (Reddy, dkk., 2018; Reddy, dkk., 2015). Kedua penelitian tersebut diatas menggunakan karbon aktif dengan surface area lebih besar dari 1000 m²/g, maka ukuran partikel

yang diuji pada kedua penelitian tersebut lebih besar dari 80 mesh. Selain itu, kedua penelitian tersebut menguji kapasitas pada suhu 50-140°C, lebih besar dibandingkan penelitian saat ini. Seperti diketahui, peningkatan suhu uji akan meningkatkan kapasitas adsorpsi adsorben (Reddy, dkk., 2018; Reddy, dkk., 2015).

G. Uji Kapasitas Adsorpsi Impregnasi Seng Klorida (AC-ZnCl₂)

Pada Gambar 6 tidak ada trend penurunan kapasitas adsorpsi yang jelas karena pengaruh saturasi gas dengan kapasitas adsorben. Pada impregnasi ZnCl₂ 6% dan 7%, kapasitas adsorpsi turun ketika gas makin jenuh dengan air dan hidrokarbon berat (temperatur saturasi 15°C ke 25°C). Namun, ketika temperatur saturasi dinaikkan 40°C, kapasitas adsorpsi justru meningkat. Hal sebaliknya terjadi pada karbon aktif yang diimpregnasi ZnCl₂, dimana kapasitas adsorpsi naik pada temperatur saturasi 25°C dan turun pada temperatur saturasi 40°C. Inkonsistensi dapat terjadi karena fluktuasi konsentrasi merkuri pada gas yang masuk ke adsorben yang diuji besar (4-10 mg/m³) dengan kapasitas adsorpsi Merkuri adsorben AC-ZnCl₂ yang relatif kecil (dibawah 10 mg/g).

Penelitian lain mencapai kapasitas adsorpsi Merkuri 13.4 mg/g (duan, Yuan, Jing, & Yuan, 2019). Pada penelitian ini, konsentrasi impregnan mencapai 20% dengan pemanasan lanjutan pada suhu



Gambar 6. Kapasitas Adsorpsi Hg Adsorben pada Variasi Suhu Saturasi Gas

Gambar 6
Kapasitas adsorpsi AC-CuS(II).

600°C. Pemanasan lanjutan 600°C menyebabkan metode pembuatan adsorben lebih rumit. Selain itu, garam ZnCl₂ bersifat higroskopis (National Library of Medicine, 2020) Impregnasi ZnCl₂ konsentrasi tinggi beresiko untuk gas bumi yang jenuh dengan air karena karbon aktif akan menyerap air dari gas dan membuat adsorben menjadi basah. Penelitian lain yang melakukan impregnasi dengan larutan ZnCl₂ 5% hanya mendapatkan kapasitas 0.9 mg Hg/g Adsorben (Zeng, dkk., 2004). Prosedur pembuatan karbon aktif pada penelitian Zeng, dkk., 2004, sama dengan yang dilakukan saat ini, sehingga kapasitas adsorpsi karbon aktif yang dihasilkan pada penelitian ini masih lebih baik dibandingkan penelitian sebelumnya.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kapasitas adsorpsi dari adsorben merkuri yang dibuat pada penelitian ini tidak menunjukkan penurunan akibat adanya hidrokarbon berat dan air dalam gas bumi yang digunakan. Ada 2 metode impregnasi adsorben yang menghasilkan kapasitas adsorpsi terbaik yaitu karbon aktif lokal yang diimpregnasi dengan Sulfur 33% pada temperatur 525°C selama 1 jam dengan kapasitas rata-rata 50.g mg Hg/g dan impregnasi tembaga (Cu) 34 g/l dan Sulfur 20% dengan kapasitas adsorpsi rata-rata 30.4 mg/g.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi "LEMIGAS" atas kesempatan dan dukungan yang telah diberikan sehingga kajian ini bisa diselesaikan.

DAFTAR ISTILAH/SINGKATAN

Simbol	Definisi	Satuan
AC	<i>Activated Carbon</i>	
S	<i>Sulfur</i>	
Cu	Tembaga	
CuS	Tembaga (II) Sulfida	

Simbol	Definisi	Satuan
NaS	Natrium Sulfida	
ZnCl ₂	Seng Klorida	
LPG	<i>Liquified Petroleum Gas</i>	
LNG	<i>Liquified Natural Gas</i>	
UOP	<i>Universal Oil Product</i>	
BET	Brunauer – Emmet - Teller	m ² /g

KEPUSTAKAAN

- Badan Standarisasi Nasional**, 2017. Standar dan mutu (spesifikasi) bahan bakar gas bumi melalui pipa gas untuk industri, pembangkit listrik dan rumah tangga, Jakarta: Badan Standarisasi Nasional (BSN).
- Chemrak, M. A., Benderdouche, N., Bestani, B., Benallou, M.B., & Cagnon, B.**, 2018. Removal of mercury from natural gas by a new activated adsorbent from olive stones. *Canadian Society for Chemical Engineering*, 96(1), pp. 241-249.
- Darmawan, S.**, 2008. Sifat Arang aktif Tempurung Kemiri dan pemanfaatannya sebagai penyerap emisi Formaldehida Papan Serat berkerapatan Sedang. Bogor: Institut Pertanian Bogor (IPB).
- Duan, X.-L., Yuan, C.-G., Jing, T.-T. & Yuan, X.-D.**, 2019. Removal of elemental mercury using large surface area microporous corn cob activated carbon by zinc chloride activation. *Fuel*, 239(1), pp. 830-840.
- Hsi, H.-C., Rood, M.J., Rostam-Abadi, M., Chen, S., & Chang, R.**, 2001. Effects of sulfur impregnation temperature on the properties and mercury adsorption capacities of activated carbon fibers (ACFs). *Environmental Science & Technology*, 35(13), p. 2785–2791.
- Hu, C., Zhou, J., He, S., Luo, Z. & Cen, K.**, 2009. Effect of chemical activation of an activated carbon using zinc chloride on elemental mercury adsorption. *Fuel Processing Technology*, 90(6), pp. 812-817.
- Jang, H.-N., Back, S.-K., Sung, J.-H., Jeong, B.-M., Kang, Y.-S., Lee, C.-K., Jurng, J. & Seo, Y.-C.**, 2017. Adsorption and kinetics of elemental mercury vapor on activated carbons impregnated with potassium iodide, hydrogen chloride, and sulfur.

Korean Journal of Chemical Engineering, Volume 34, p. 806–813.

Kinoshita, K., 1988. *Electrochemical and Physicochemical Properties*. New York: John Wiley & Sons.

Lee, S.-H. & Park, Y.-O., 2003. Gas-phase mercury removal by carbon-based sorbents. *Fuel Processing Technology*, 84(1-3), pp. 197-206.

Liu, W., Vidic, R. D. & Brown, T. D., 2000. Optimization of high temperature sulfur impregnation on activated carbon for permanent sequestration of elemental mercury vapors. *Environmental Science & Technology*, 34(3), p. 483–488.

National Library of Medicine, 2020. National Library of Medicine. [Online] Available at: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Zinc-chloride#section=Experimental-Properties> [Accessed 15 April 2020].

Reddy, K. S. K., Al Shoaibi, A. & Srinivasakannan, C., 2014. Elemental mercury adsorption on sulfur-impregnated porous carbon-A review. *Environmental Technology*, 35(1), pp. 18-26.

Reddy, K. S. K., AlShoaibi, A. & Srinivasakannan, C., 2018. Mercury removal using metal sulfide porous carbon complex. *Process Safety and Environmental Protection*, Volume 114, pp. 153-158.

Reddy, K. S. K., AlShoaibi, A. & Srinivasakannan, C., 2018. Mercury removal using metal sulfide porous carbon Complex. *Process Safety and Environmental Protection*, Volume 114, pp. 153-158.

Reddy, S. K., Alshoaibi, A. & Srinivasakannan, C., 2015. High efficient metal sulphide based porous carbon matrix for mercury removal. Abu Dhabi, Society of Petroleum Engineers.

Rosmayati, L., Nofrizal, Andriani, Y. & Hermawan, N., 2013. Pembuatan Rancang Bangun Adsorber Penghilang Merkuri Berskala Pilot pada Industri Gas Bumi. *Lembaran Publikasi Minyak dan Gas Bumi (LPMGB)*, 47(2), p. 105–114.

Sano, A., Takaoka, M. & Shiota, K., 2017. Vapor-phase elemental mercury adsorption by activated carbon co-impregnated with sulfur and chlorine. *Chemical Engineering Journal*, Volume 315, pp. 598-607.

Zeng, H., Jin, F. & Guo, J., 2004. Removal of elemental mercury from coal combustion flue gas by chloride-impregnated activated carbon. *Fuel*, 83(1), pp. 143-146.