



# **PEMBUATAN DAN UJI KINERJA ADSORBEN UNTUK MENURUNKAN KONSENTRASI MERKURI DARI GAS ALAM**

**DIPA TAHUN ANGGARAN 2020**

**No. Program : 020.11.04.1913.967.001.085**

**No. SK : 06.K/54/BLM/2020**

**LAPORAN AKHIR**

**KEMENTERIAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL  
BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL  
PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN TEKNOLOGI MINYAK DAN GAS BUMI  
“LEMIGAS”**

**Jakarta, Desember 2020**

## TIM PELAKSANA

<b>NO</b>	<b>Nama/Jabatan</b>	<b>Kedudukan Dalam Tim</b>
1	Kepala Badan Litbang ESDM	Pengarah
2	Sekretaris Badan Litbang ESDM	Pengarah
3	Kepala PPPTMGB "LEMIGAS"	Pengarah
4	Koordinator KP3 Teknologi Gas "LEMIGAS"	Penanggung Jawab
5	Eko Handoyo, S.T.	Ketua Tim
6	Dra. Yayun Andriani, M.Si.	Anggota
7	Rudi Suhartono W, Ir. M.M	Anggota
8	Endi Suhendi, A. Md.	Anggota
9	Annisa Chairuna, M.Si.	Anggota
10	Nata Pringgasta, S.T., M.Sc.	Anggota
11	Mitra Eviani, M.T.	Anggota
12	Juliana Retno W. L, S.Kom.	Anggota
13	Dwi Noviyanti, S.E.	Anggota
14	Satia Darma Simanjuntak, A.Md.	Anggota
15	Widodo	Anggota
16	Catur Niken Suciati Utari, S.T.	Anggota
17	Pratama Mahardi, S.T.	Anggota
18	Risan Aji Surendro, S.T.	Anggota
19	Yudha Saputra, A.Md.	Anggota
20	Nurhalim	Anggota
21	Ilham Aswi Syaputra	Anggota
22	Garnis Fithawati, S.Si.	Anggota
23	April Rianto Baktiar, A.Md.	Anggota

## RINGKASAN EKSEKUTIF

Peningkatan kebutuhan gas bumi di dalam negeri harus diiringi dengan peningkatan kualitas dari gas bumi itu sendiri. Kualitas gas bumi yang baik akan memiliki nilai jual yang tinggi, mengurangi masalah operasional, lingkungan, kesehatan dan keselamatan pada proses pengolahan gas. Salah satu upaya untuk peningkatan kualitas gas bumi adalah menghilangkan kandungan merkuri.

Adsorben merkuri untuk pengolahan gas hingga saat ini masih menggunakan produk impor, sehingga pengembangan teknologi terkait dengan penurunan merkuri dalam gas bumi akan mendukung pemerintah dalam pengembangan produk dalam negeri dan meningkatkan Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN). Pengembangan teknologi ini akan memberikan kontribusi besar bagi peningkatan kapasitas industri nasional serta mendukung upaya pemerintah untuk menekan defisit neraca ekspor-impor Indonesia.

Pada tahun 2012, telah dilakukan penelitian adsorben merkuri alternatif karbon aktif yang diimpregnasi dengan  $ZnCl_2$ . Pada penelitian tersebut, didapatkan kapasitas adsorben teoritis untuk menyerap merkuri adalah 12.4% atau 124 g Hg/kg adsorben. Karena kapasitas adsorben karbon aktif  $ZnCl_2$  belum diukur pada kondisi sebenarnya dan belum dibandingkan dengan metode pembuatan adsorben komersial lain, maka dianggap perlu untuk melakukan uji kapasitas adsorben karbon aktif  $ZnCl_2$  dan adsorben dengan metode pembuatan yang sudah komersial pada kondisi gas bumi dengan hidrokarbon berat dan air yang bervariasi. Sebagai tambahan, dianggap perlu juga untuk membuat dan menguji adsorben alternatif lain seperti karbon aktif yang diimpregnasi dengan  $CuS$ ,  $HCl$ , dan  $CS_2$ .

Penelitian ini terbagi menjadi empat tahap, yaitu pembuatan alat uji kinerja skala lab, pemilihan dan optimasi metode pembuatan adsorben merkuri, uji adsorpsi pada beberapa konsentrasi hidrokarbon berat dan air, dan karakterisasi adsorben. Dari hasil pengujian, telah didapatkan dua

metode pembuatan terbaik yang diuji pada skala lab adalah impregnasi karbon aktif dengan sulfur pada suhu 525°C selama 1 jam, rasio Karbon:Sulfur 1:3 dengan kapasitas adsorpsi rata-rata 50.9 mg Hg/g adsorben dan impregnasi dengan Cu 34 g/L, impregnasi sulfur 1:4 dengan kapasitas adsorpsi rata-rata 30.4 mg Hg/g.

Agar metode pembuatan adsorben skala laboratorium dapat dimanfaatkan, maka pada tahun 2021 akan dilakukan *upscale* pembuatan dan pengujian laboratorium, optimasi metode pembuatan, dan uji lapangan. Selanjutnya, data yang dihasilkan pada uji lapangan dapat digunakan untuk desain unit adsorben pada skala komersial.

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga kami dapat menyelesaikan laporan akhir riset yang berjudul Pengembangan Adsorben Merkuri untuk Industri Migas yang selesai tepat pada waktunya.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat adsorben dengan kapasitas adsorpsi merkuri yang baik pada kondisi lapangan dan memperoleh data hasil kinerjanya pada skala laboratorium. Tujuan dari kegiatan ini juga untuk mendapatkan metode pembuatan adsorben merkuri untuk mengurangi penggunaan adsorben merkuri impor .

Kami mengucapkan terimakasih kepada Kepala Badan Litbang ESDM, Kepala PPPTMGB LEMIGAS dan para narasumber atas arahan, masukan, koreksi dan dukungan semangat kepada kami selama kegiatan ini berjalan. Terimakasih kepada semua pihak yang turut membantu kelancaran dan berjalannya kegiatan penelitian ini sampai laporan akhir selesai.

Kami menyadari bahwa penyusunan laporan akhir dari penelitian ini masih belum sempurna, sehingga koreksi dan masukan yang membangun akan kami tindaklanjuti demi kesempurnaan laporan akhir ini.

Laporan penelitian ini terdiri dari Pendahuluan, Kajian Pustaka, Metodologi Penelitian, Hasil Penelitian dan Pembahasan, Kesimpulan dan saran. Hasil penelitian ini diharapkan bermanfaat bagi peningkatan kualitas produksi gas bumi di Indonesia dan peningkatan teknologi di sektor industri migas. Akhir kata disampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberi kepercayaan dan bantuan, ide, gagasan dan tenaga dalam pelaksanaan kegiatan ini.

Jakarta , 27 Desember 2020

## DAFTAR ISI

TIM PELAKSANA .....	i
RINGKASAN EKSEKUTIF .....	ii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
A Latar Belakang.....	1
B Ruang Lingkup Studi.....	3
B.1 Maksud dan Tujuan .....	3
B.2 Hasil yang Diharapkan.....	3
B.3 Indikator Kinerja.....	4
B.4 Jadwal Pelaksanaan Penelitian .....	4
B.5 Kesiapan Peralatan dan Bahan .....	5
B.6 Lokasi Pelaksanaan Kegiatan.....	5
B.7 Dukungan Jasa, Personil dan Fasilitas Instansi Eksternal.....	6
BAB II PEMBUATAN DAN UJI KINERJA ADSORBEN UNTUK MENURUNKAN KONSENTRASI MERKURI DALAM GAS ALAM .....	7
A landasan Teori .....	7
A.1 Gas bumi .....	7
A.2 Batasan Konsentrasi Merkuri dalam Gas Bumi .....	15
A.3 Adsorben Merkuri .....	15

A.4	Metode Impregnasi Karbon Aktif untuk Adsorben Merkuri	18
A.5	Karakterisasi Adsorben.....	34
B	Metodologi .....	39
B.1	<i>Overview</i> .....	39
B.2	Rancang Bangun Alat Uji Kapasitas Adsorpsi .....	40
B.3	Pembuatan dan Optimasi Metode Pembuatan Adsorben	40
B.4	Uji kapasitas awal .....	42
B.5	Uji Kapasitas Adsorpsi Hg dengan Gas Dengan Hidrokarbon Berat dan Air .....	43
B.6	Karakterisasi Adsorben.....	44
C	Data dan Hasil Kegiatan .....	46
C.1	Rancang Bangun Alat Uji Kapasitas Adsorben.....	46
C.2	Hasil <i>Screening</i> Metode Pembuatan .....	48
C.3	Variasi Metode AC-S .....	49
C.4	Variasi Metode AC-ZnCl <sub>2</sub> .....	50
C.5	Variasi Metode AC-CuS Impregnasi dalam Larutan NaS	51
C.6	Variasi Metode AC-CuS Impregnasi dengan Sulfur.....	51
C.7	Hasil Uji Kapasitas Adsorpsi Merkuri dengan Saturasi Pentana/Heksana .....	52
C.8	Karakterisasi Adsorben.....	59
D	Analisis dan Evaluasi.....	78
D.1	Rancang Bangun Alat Uji Kapasitas Adsorben.....	78
D.2	Hasil Uji Kapasitas Adsorpsi Merkuri dengan Saturasi Pentana/Heksana .....	79

BAB III PENUTUP .....	83
A Kesimpulan .....	83
B Saran .....	83
DAFTAR PUSTAKA .....	85
LAMPIRAN .....	89



## DAFTAR TABEL

Tabel 1. Jadwal Kegiatan.....	5
Tabel 4. Komposisi Gas Bumi yang Umum .....	7
Tabel 5. Batasan Konsentrasi Kontaminan untuk Proses Refrigerasi.....	11
Tabel 6. Estimasi Konsentrasi Merkuri di Gas Bumi dan Kondensat (Boschee, 2013) .....	12
Tabel 7. Batasan Paparan Senyawaan Merkuri Pada Tubuh .....	12
Tabel 9. Spesifikasi MRU di Pengolahan Gas Salam, Mesir .....	18
Tabel 10. Jenis Adsorben Merkuri Komersial( <i>Chalkidis, Jampaiah, Hartley, Sabri, &amp; Bhargava, 2020</i> ) .....	30
Tabel 11. Karakteristik Adsorben Karbon Aktif Komersial.....	31
Tabel 12. Karakteristik Adsorben Durasorb .....	31
Tabel 13. Contoh Pemanfaatan Adsorben Merkuri di Indonesia.....	32
Tabel 14. Kondisi Operasi Uji Kapasitas Adsorpsi Merkuri .....	48
Tabel 15. Screening Awal Metode Pembuatan .....	48
Tabel 16. Hasil Optimasi Metode Pembuatan Karbon Aktif Impregnasi ZnCl <sub>2</sub> .....	51
Tabel 17. Hasil Optimasi Metode Pembuatan Karbon Aktif CuS Impregnasi Kering .....	53
Tabel 18. Karakteristik Pori Karbon Aktif AC-S.....	60
Tabel 19. Karakteristik Pori Karbon Aktif AC-CuS .....	61
Tabel 20. Karakteristik Pori Karbon Aktif AC-ZnCl <sub>2</sub> .....	61
Tabel 21. Rincian Hasil Analisis SEM-EDX pada sampel karbon aktif yang dimodifikasi dengan penambahan Sulfur.....	71
Tabel 22. Rincian Hasil Analisis SEM-EDX pada Sampel Karbon Aktif yang Dimodifikasi dengan Penambahan CuCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O dan Sulfur .....	72
Tabel 23. Rincian Hasil Analisis SEM-EDX pada sampel karbon aktif yang dimodifikasi dengan penambahan ZnCl <sub>2</sub> .....	78
Tabel 24. Kapasitas Adsorpsi Karbon Aktif Komersial yang Diuji Skala Laboratorium.....	80

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Sabuk Merkuri dan Hot Spot Merkuri(kiri), Insiden yang terjadi karena merkuri(kanan) (Axens, 2015) .....	1
Gambar 2. Retakan pada Logam Akibat LME .....	1
Gambar 4. Tahapan dalam Pengolahan Gas .....	8
Gambar 5 Proses Pemisahan Metana dan Etana dengan Propana, Butana, dan Fraksi C5+. .....	10
Gambar 6. <i>Mercury Removal Bed</i> .....	17
Gambar 7. Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Efisiensi Proses Adsorpsi (Kiri), Pengaruh Kelembaban Terhadap Kapasitas Adsorpsi (Kanan). ..	29
Gambar 8. Klasifikasi Isoterm Adsorpsi IUPAC .....	35
Gambar 9 Tahapan Penelitian Adsorben Merkuri Untuk Industri Migas ..	39
Gambar 10. Aliran Gas pada Uji Kapasitas Awal Adsorben .....	43
Gambar 11. Uji Kapasitas Adsorben dengan Gas Basah .....	44
Gambar 12. Desain Rangkaian Adsorpsi (kiri), Peralatan Uji Kapasitas yang Telah Dirangkai (kanan) .....	46
Gambar 13. Vessel uji adsorben.....	47
Gambar 14. Hasil Optimasi Metode Pembuatan AC-S .....	49
Gambar 15. Kapasitas Adsorpsi AC-CuS dengan variasi NaS dan $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .....	51
Gambar 16. Kapasitas Adsorpsi AC-CuS(II).....	52
Gambar 17. Kapasitas Adsorpsi AC-S dengan Variasi Berat Impregnan dan Suhu Saturasi Gas.....	53
Gambar 18. Kapasitas Adsorpsi AC-S Rata-Rata dengan, Luas Area Mikro dan Meso/Makropori.....	55
Gambar 19. Kapasitas Adsorpsi AC-CuS Rata-Rata dengan, Luas Area Mikro dan Meso/Makropori .....	56
Gambar 20. Kapasitas Adsorpsi AC-CuS dengan Variasi Berat Impregnan dan Suhu Saturasi Gas.....	57
Gambar 21. Kapasitas Adsorpsi AC-ZnCl <sub>2</sub> dengan variasi berat impregnan dan suhu saturasi gas.....	57

Gambar 22. Kapasitas Adsorpsi AC-ZnCl <sub>2</sub> Rata-Rata dengan, Luas Area Mikro dan Meso/Makropori .....	58
Gambar 23. Spektrum FTIR AC-S 16%(a), 33%(b), 50% (c).....	63
Gambar 24. Spektrum FTIR Karbon Aktif AC-Cu 13%S (a), 20%S(b), 33 %S (c).....	64
Gambar 25. Spektrum FTIR Karbon Aktif yang Dimodifikasi dengan Impregnasi Larutan CuCl <sub>2</sub> dan NaS.....	65
Gambar 26. Spektrum FTIR Karbon Aktif yang Dimodifikasi dengan Penambahan ZnCl <sub>2</sub> 6% (a), 7% (b), 8% (c), 9% (d).....	66
Gambar 27. Hasil Analisis SEM pada Sampel Karbon Aktif Sebelum Modifikasi.....	67
Gambar 28. Hasil Analisis EDX pada Sampel Karbon Aktif Sebelum Modifikasi.....	68
Gambar 29. Hasil Analisis SEM terhadap Sampel Karbon Aktif dengan Penambahan Sulfur .....	69
Gambar 30. Hasil Analisis EDX terhadap Sampel Karbon Aktif dengan penambahan Sulfur .....	70
Gambar 31. Hasil Analisis SEM terhadap Sampel Karbon Aktif dengan Penambahan CuCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O dan Sulfur .....	73
Gambar 32. Hasil Analisis EDX terhadap Sampel Karbon Aktif dengan Penambahan CuCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O dan Sulfur.....	74
Gambar 33. Hasil analisis SEM pada sampel karbon aktif dengan Penambahan CuCl <sub>2</sub> dan Na <sub>2</sub> S.....	75
Gambar 34 Hasil Analisis EDX terhadap sampel karbon aktif dengan penambahan CuCl <sub>2</sub> dan Na <sub>2</sub> S .....	75
Gambar 35. Hasil Analisis SEM terhadap sampel karbon aktif dengan penambahan ZnCl <sub>2</sub> .....	76
Gambar 36. Hasil Analisis EDX terhadap sampel karbon aktif dengan penambahan ZnCl <sub>2</sub> .....	77

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Foto Pembuatan Karbon Aktif yang Diimpregnasi Sulfur .....	89
Lampiran 2 Foto Pembuatan Karbon Aktif yang Diimpregnasi Tembaga-Sulfur, Metode Impregnasi dalam Larutan.....	90
Lampiran 3 Pembuatan Karbon Aktif yang Diimpregnasi Tembaga-Sulfur (Metode Impregnasi Suhu 500oC).....	91
Lampiran 4 Foto Pembuatan Karbon Aktif yang Diimpregnasi ZnCl <sub>2</sub> .....	92
Lampiran 5 Foto Pembuatan Karbon Aktif yang Diimpregnasi HCl.....	93
Lampiran 6 Foto Pembuatan Karbon Aktif yang Diimpregnasi CS <sub>2</sub> .....	94
Lampiran 7 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Berbagai Metode Pembuatan Adsorben Merkuri .....	95
Lampiran 8 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Penelitian Pembuatan Adsorben Merkuri dengan Impregnasi Sulfur .....	103
Lampiran 9 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Penelitian Pembuatan Adsorben Merkuri dengan Impregnasi Logam Sulfida .....	106
Lampiran 10 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Penelitian Pembuatan Adsorben Merkuri dengan Impregnasi ZnCl <sub>2</sub> .....	107
Lampiran 11 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Penelitian Pembuatan Adsorben Merkuri Komersial .....	108
Lampiran 12 Komposisi Gas Feed Gas Kilang LPG PT. BBWM .....	111
Lampiran 13 Komposisi Gas Lean Gas Kilang LPG PT. BBWM.....	113
Lampiran 14 Hasil Optimasi Metode Pembuatan AC-S .....	115
Lampiran 15 Hasil Optimasi Metode Pembuatan AC-CuS (Impregnasi dalam Larutan).....	116
Lampiran 16 Hasil Optimasi Metode Pembuatan AC-CuS (Impregnasi pada Suhu Tinggi) .....	117
Lampiran 17 Hasil Uji FTIR.....	118
Lampiran 18 Hasil Uji BET .....	124
Lampiran 19 Kurva Uji Kinerja Adsorben Suhu Saturasi 15°C dan Suhu Uji 40°C.....	139

Lampiran 20 Kurva Uji Kinerja Adsorben Suhu Saturasi 25°C dan Suhu Uji 40°C.....	145
Lampiran 21 Kurva Uji Kinerja Adsorben Suhu Saturasi 30°C dan Suhu Uji 30°C.....	151
Lampiran 22 Kurva Uji Kinerja Adsorben Suhu Saturasi 40°C dan Suhu Uji 40°C.....	157
Lampiran 23 Hasil Uji SEM-EDX.....	163

## BAB I PENDAHULUAN

### A Latar Belakang

Secara geologi, Indonesia berada dalam hotspot pada sabuk merkuri dimana konsentrasi merkuri di dalam tanah relatif lebih besar dibandingkan area lainnya seperti terlihat pada Gambar 1. Karenanya, konsentrasi Merkuri dalam gas bumi dapat mencapai  $300\text{ug}/\text{m}^3$  dan kondensat mencapai 800 ppbw.



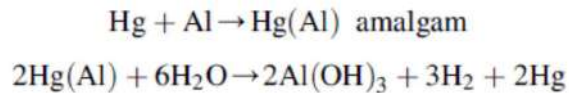
Gambar 1. Sabuk Merkuri dan Hot Spot Merkuri(kiri), Insiden yang terjadi karena merkuri(kanan) (Axens, 2015)

Konsentrasi merkuri dalam minyak dan gas yang relatif tinggi akan menyebabkan berbagai masalah pada proses pengolahan, transportasi, dan pemanfaatan gas. Merkuri dapat menyebabkan korosi pada logam yang dikenal dengan *Liquid Metal Embrittlement* (LME) dimana merkuri terdifusi pada cacat di permukaan logam, menyebabkan berkurangnya elastilitas dan kekuatan logam. Hal ini dapat mengakibatkan retakan seperti terlihat pada gambar 2. Selain terdifusi, merkuri juga melarutkan logam dan mengubah sifat-sifat logam yang berpotensi menyebabkan masalah yang besar karena penukar panas kriogenik umumnya beroperasi pada tekanan tinggi.



Gambar 2. Retakan pada Logam Akibat LME

Korosi terjadi pada logam yang membentuk amalgam dengan merkuri. Jika lapisan oksida yang melindungi logam dari korosi rusak, cairan merkuri dapat dengan cepat melarutkan logam dan menyebabkan kerusakan logam. Jika ada air dan sedikit merkuri bebas, maka amalgam dapat terbentuk dan menyebabkan korosi lebih lanjut dengan reaksi berikut:



Masalah korosi, terutama terjadi pada system kriogenik di fasilitas LNG dan LPG. Karenanya, konsentrasi merkuri pada masukan system kriogenik dibatasi tidak lebih besar dari 0.01 ug/m<sup>3</sup>. Tujuannya, untuk mencegah pembentukan logam merkuri bebas pada suhu lebih rendah dari -40°C. Jika konsentrasi merkuri lebih besar dari 0.01 ug/m<sup>3</sup>, ada potensi terbentuknya merkuri bebas yang akan menyerang plat penukar panas pada system kriogenik(Gas Processors Suppliers Association, 2012).

Selain korosi, gas yang mengandung merkuri juga akan merusak katalis pada industri petrokimia. Merkuri juga menyebabkan bahaya lingkungan dan keselamatan. Efek kumulatif dari bahaya tersebut telah mengarahkan desain fasilitas penghilang merkuri untuk menurunkan konsentrasi Hg hingga dibawah 0.01 ug/m<sup>3</sup>. Merkuri juga berbahaya terhadap kesehatan manusia dan berbagai peraturan telah diterbitkan untuk mengontrol dan membatasi emisi dari sumber antropogenik ke lingkungan. Alat pelindung diri diperlukan selama pekerjaan perawatan di area dimana dicurigai adanya merkuri. Batasan paparan merkuri selama 8 jam adalah 10 ug/m<sup>3</sup>.

Karenanya, menjadi penting untuk menjamin konsentrasi merkuri dalam gas yang masuk ke dalam system kriogenik sekecil mungkin yaitu dengan menggunakan adsorben merkuri. Hingga saat ini, adsorben merkuri yang digunakan di fasilitas pengolahan gas yang menggunakan system kriogenik merupakan produk impor. Dengan kondisi tersebut, maka adanya adsorben merkuri yang dikembangkan didalam negeri dari bahan baku lokal

akan mendukung pemerintah dalam pengembangan produk dalam negeri dan peningkatan *Tingkat Komponen Dalam Negeri* (TKDN). Pengembangan ini juga akan memberikan kontribusi besar bagi peningkatan kapasitas industri nasional serta mendukung upaya pemerintah untuk menekan defisit neraca ekspor-impor Indonesia. Karena bahan baku adsorben yang seluruhnya diproduksi di dalam negeri, diharapkan harga adsorben merkuri yang nantinya dibuat lebih murah dibandingkan produk impor sehingga dapat membantu industri migas untuk menurunkan biaya operasi pengolahan gas. Penelitian terkait adsorben merkuri menjadi penting karena dapat menjadi awal pengembangan unit pemurnian gas lainnya yang dikembangkan di dalam negeri.

Di Indonesia sendiri, sudah dilakukan penelitian adsorben merkuri dari gas alam, namun kapasitas adsorpsi merkuri baru dihitung secara teoritis. Selain itu, adsorben merkuri yang dibuat belum mempertimbangkan kondisi operasional yang ada di lapangan seperti suhu, tekanan, kadar air, dan komposisi hidrokarbon berat. Penelitian sebelumnya juga belum mengukur kapasitas adsorpsi adsorben merkuri yang dibuat. Untuk itu pada penelitian ini akan dibuat adsorben merkuri untuk menurunkan konsentrasi merkuri dalam gas bumi dengan mempertimbangkan kondisi lapangan.

## **B Ruang Lingkup Studi**

### **B.1 Maksud dan Tujuan**

Maksud dari kegiatan ini adalah untuk membuat adsorben dengan kapasitas adsorpsi merkuri yang baik pada kondisi lapangan dan memperoleh data hasil kinerjanya pada skala laboratorium. Tujuan dari kegiatan ini adalah untuk mendapatkan metode pembuatan adsorben merkuri untuk mengurangi penggunaan adsorben merkuri impor.

### **B.2 Hasil yang Diharapkan**

Hasil yang diharapkan dari kegiatan ini adalah sebagai berikut:



- a. Memperoleh data teknis pembuatan adsorben merkuri skala lab
- b. Memperoleh data karakterisasi adsorben sebagai pembanding adsorben komersial
- c. Memperoleh data teknis hasil uji kinerja adsorben untuk digunakan dalam pengembangan selanjutnya

### B.3 Indikator Kinerja

Indikator kinerja yang akan dicapai pada kegiatan Pembuatan dan Uji Kinerja Adsorben untuk menurunkan konsentrasi Merkuri dalam Gas bumi Tahun Anggaran 2020 sebagai berikut:

- a. Output  
Output Kegiatan Pembuatan adsorben untuk mengurangi konsentrasi merkuri dalam gas bumi tahun 2020, yaitu:
  - 1) Produk adsorben merkuri skala lab dan uji kinerjanya pada kondisi lapangan
  - 2) Laporan kegiatan
- b. Outcome  
Tersedianya data teknis metode pembuatan adsorben merkuri dari gas bumi dengan kondisi lapangan dan uji kinerjanya.
- c. Dampak  
Mengurangi ketergantungan terhadap produk adsorben impor.

### B.4 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

Kegiatan penelitian ini dilaksanakan selama 12 bulan pada tahun 2020 dengan perincian seperti terlihat pada Tabel 1. Disebabkan adanya pandemi, maka kegiatan survey, persiapan, dan pengujian baru dimulai dilakukan pada bulan Juni 2020. Kegiatan ke KKKS juga dibatalkan karena pada masa pandemi, KKKS sangat membatasi kunjungan ke lapangan gas. Karenanya, kegiatan survey dialihkan ke kegiatan survey produsen adsorben karbon aktif dan ke instalasi pengolahan limbah adsorben merkuri.

Tabel 1. Jadwal Kegiatan

No	Tahapan Penelitian	Tahun 2020, Bulan											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.	Pengumpulan Data Literatur, Mengatur dan Mendistribusi Kerja	■	■	■	■	■	■						
2.	Survey dan Konsultasi Teknis							■	■	■	■	■	
3.	Penyiapan Bahan dan Peralatan Pengujian						■	■	■	■	■		
4.	Pemilihan, Pembuatan dan karakterisasi adsorben								■	■	■	■	
5.	Uji kinerja adsorben skala lab									■	■	■	
6.	Evaluasi dan Analisa Pelaporan											■	
7.	Laporan Hasil											■	■

#### B.5 Kesiapan Peralatan dan Bahan

Fasilitas penunjang selama kegiatan ini adalah Laboratorium Kimia Fisika Gas dan Laboratorium Komposisi Gas yang berada di lokasi Laboratorium Kelompok Pelaksana Penelitian dan Pengembangan Teknologi Gas PPPTMGB “LEMIGAS”. Selain itu pengujian karakterisasi adsorben ukuran pori dan luas permukaan adsorben dilakukan di lab uji milik pemerintah seperti LIPI.

#### B.6 Lokasi Pelaksanaan Kegiatan

Kegiatan Penelitian adsorben merkuri untuk industri migas dilaksanakan di PPPTMGB “LEMIGAS” jakarta. Adapun kegiatan yang dilakukan diluar kota dapat dijelaskan sebagai berikut :

- a. Perjalanan dinas ke bogor dalam rangka diskusi dengan rekan peneliti yang melakukan pengembangan karbon aktif dan PPLI yang mengolah limbah adsorben merkuri yang telah jenuh.
- b. Perjalanan dinas ke Bandung dalam rangka diskusi dengan rekan swasta yang melakukan pengembangan adsorben di gas bumi serta membuat karbon aktif lokal.

- c. Perjalanan dinas ke Serang dalam rangka survey industri karbon aktif dan diskusi mengenai proses pembuatan dan karakterisasi karbon aktif lokal.
- d. Perjalanan dinas ke Bekasi, Jawa Barat dilakukan dalam rangka mengambil sampel gas bumi dan analisa gas yang menggunakan sistem kriogenik untuk ekstraksi propana dan butana (LPG). Sistem kriogenik umumnya mensyaratkan konsentrasi merkuri yang rendah.
- e. Perjalanan dinas ke Cirebon dalam rangka survey industri karbon aktif dan diskusi mengenai proses pembuatan dan karakterisasi karbon aktif lokal.
- f. Perjalanan dinas ke serpong dalam rangka pengujian BET karbon aktif di LIPI

Selain kunjungan lapangan, dilakukan pula konsinyasi yang mengundang pakar yang terlibat dalam pengembangan adsorben, dan akademisi.

#### B.7 Dukungan Jasa, Personil dan Fasilitas Instansi Eksternal

Pelaksanaan kegiatan ini melibatkan pihak lain seperti Universitas, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, dan pihak swasta.

## BAB II PEMBUATAN DAN UJI KINERJA ADSORBEN UNTUK MENURUNKAN KONSENTRASI MERKURI DALAM GAS ALAM

### A landasan Teori

#### A.1 Gas bumi

Gas bumi adalah campuran gas hidrokarbon ringan pada tekanan dan suhu lingkungan. Gas bumi tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, lebih ringan dari udara dan digunakan terutama sebagai bahan bakar. Di rumah tangga, gas bumi digunakan untuk tungku, pemanas air dan kompor memasak dan sebagai bahan bakar industri digunakan untuk menghasilkan uap dalam ketel air dan sebagai sumber panas bersih untuk mensterilkan instrumen dan mengolah makanan. Sebagai bahan baku digunakan untuk produksi hidrogen, belerang, dan amonia.

Tabel 2. Komposisi Gas Bumi yang Umum

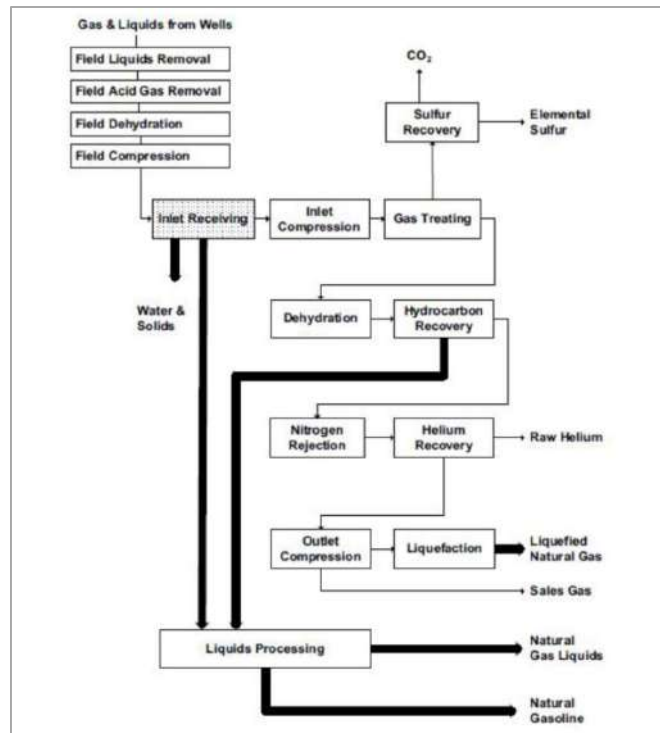
Nama Senyawaan	Volume (%)
Metana	>85
Etana	3-8
Propana	1-2
Butana	<1
Pentana	<1
Karbon Dioksida	1-2
Hidrogen Sulfida	<1
Nitrogen	1-5
Helium	<0.5

Dalam reservoir batuan, gas bumi dibentuk oleh degradasi bahan organik selama jutaan tahun dalam kondisi bertekanan. Gas bumi sebagian besar terdiri dari metana. Konstituen lain termasuk etana, propana, butana dan sebagian kecil hidrokarbon C5 +. Senyawa berikut ada dalam jumlah yang kecil seperti komponen beracun seperti benzena, toluena, dan xilena, komponen pengotor seperti sulfur, nitrogen, halogen, dan senyawa logam

berat, seperti merkuri. Meskipun komposisi gas bumi bervariasi tergantung pada bidang tempat pengambilannya, komposisi umum gas bumi dapat ditemukan di bawah ini:

### A.1.1 Pengolahan Gas bumi

Gas bumi yang berasal dari sumur harus diolah terlebih dahulu dengan memisahkan gas bumi, kondensat, gas asam dan air. Juga penting untuk mengontrol aliran cairan hidrokarbon dan tekanan pengiriman gas. Tahapan operasi pengolahan gas bumi dipaparkan pada gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3. Tahapan dalam Pengolahan Gas

#### A.1.1.1 Pemisahan fisik

Gas bumi yang masuk ke dalam fasilitas pengolahan dipisahkan secara fisik untuk memisahkan padatan, cairan hidrokarbon, gas bumi, dan air. Padatan dan cairan diolah lebih lanjut agar aman untuk dibuang sebagai limbah. Kondensat distabilkan tekanannya dengan menurunkan

tekanannya dan memisahkan fraksi ringannya agar kondensat tersebut aman untuk ditransportasikan.

#### A.1.1.2 Pemisahan Gas Asam

Setelah pemisahan fisik, gas mengalir ke fasilitas pengolahan dimana gas asam dan merkuri dipisahkan dari gas bumi. Selama pengolahan gas asam yaitu  $H_2S$ ,  $CO_2$ , dan senyawaan sulfur lainnya seperti merkaptan dipisahkan dari gas bumi. Senyawaan sulfur dan  $CO_2$  perlu dihilangkan dari gas bumi karena dengan adanya air menghasilkan asam karbonat dan asam sulfit yang menyebabkan korosi. Kebanyakan proses pengolahan gas menggunakan proses adsorpsi dan absorpsi. Proses adsorpsi dengan menggunakan adsorben yang reaktif dengan gas asam seperti *iron sponge*. Proses kedua dengan metode absorpsi yang menggunakan air yang mengandung amin, basa, natrium karbonat, dan cairan hidrokarbon *non-volatile* tergantung tipe gas yang harus dipisahkan.

#### A.1.1.3 Dehidrasi

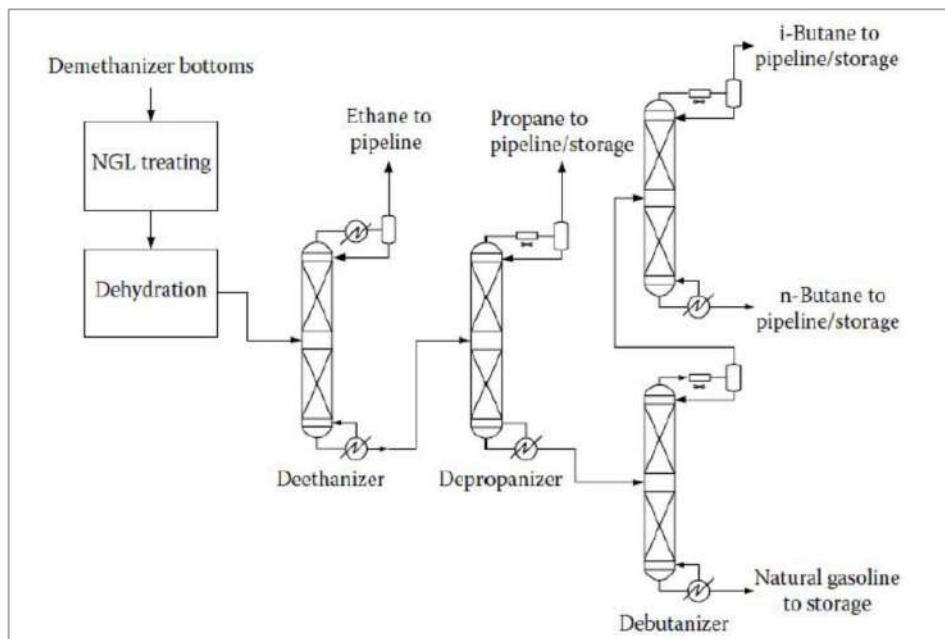
Gas yang telah melewati *acid gas removal* umumnya jenuh dengan air sehingga diperlukan tahap dehidrasi. Dehidrasi menjadi penting karena gas bumi dengan air pada kondisi tertentu dapat membentuk hidrat yang menyumbat pipa. Air jika terkondensasi di pipa dapat menyebabkan erosi dan korosi. Uap air juga meningkatkan volume gas dan menurunkan panas pembakaran gas. Metode yang paling umum untuk memisahkan air dari gas bumi adalah dengan menggunakan glikol dan adsorben *mol sieve*. Air yang ada dalam gas bumi terikat pada cairan dan adsorben kemudian air yang terikat ini akan dilepaskan dengan pemanasan. Metode lainnya adalah dengan refrigerasi dimana gas ditambahkan inhibitor dan didinginkan dan air yang terpisah dikeluarkan dari aliran gas.

#### A.1.1.4 Recovery Hidrokarbon

Gas hidrokarbon selain metana ( $C_2+$ ) mungkin ada dalam aliran gas. Jika jumlahnya berlebih,  $C_2+$  yang dikenal sebagai *natural gas liquids* (NGLs), dapat dipisahkan dari gas bumi karena NGL lebih bernilai jika

dipisahkan dari gas bumi. Selain itu, persyaratan gas pipa membatasi nilai kalor maksimum dalam gas bumi sehingga menjadi perlu untuk memisahkan fraksi berat dari gas bumi untuk menurunkan nilai kalor. Hidrokarbon recovery juga diperlukan untuk mengontrol titik embun hidrokarbon sehingga kondensasi hidrokarbon selama transportasi gas bumi melalui pipa dapat dihindarkan.

NGL dapat dipisahkan dengan beberapa metode pemisahan seperti refrigerasi, absorpsi, adsorpsi, dan membrane. Setelah dipisahkan, NGL dapat dijual sebagai produk campuran atau difraksinasi menggunakan kolom destilasi. Skema kolom destilasi dapat terlihat pada gambar 4 berikut.



Gambar 4 Proses Pemisahan Metana dan Etana dengan Propana, Butana, dan Fraksi C5+.

Pada *deethanizer*, gas didinginkan hingga suhu dibawah  $-40^{\circ}\text{C}$  untuk memisahkan fraksi ringan (etana dan metana) dengan fraksi beratnya (Propana dan komponen yang lebih berat lainnya). Agar proses ini dapat berjalan, gas harus dimurnikan terlebih dahulu untuk mengurangi kontaminan ke batas yang aman. Kontaminan yang harus dibatasi umumnya ditampilkan pada tabel 3. Komponen yang melebihi batasan

tersebut akan menyebabkan penyumbatan aliran akibat pembekuan, korosi, dan penurunan efisiensi dalam sistem refrigerasi.

Tabel 3. Batasan Konsentrasi Kontaminan untuk Proses Refrigerasi

Component	Specification	Unit Operation
Water (H <sub>2</sub> O)	< 1 ppmv	Dehydration
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	< 50 ppmv	Acid Gas Removal
Hydrogen sulphide (H <sub>2</sub> S)	< 3.3 ppmv	Acid Gas Removal
Organic S (RSH, COS, CS <sub>2</sub> )	< 50 ppmv	Acid Gas Removal
Mercury (Hg)	< 10 ng/Nm <sup>3</sup>	Mercury Removal
C <sub>5</sub> + Hydrocarbons	< 1,000 ppmv	Front End of Liquefaction
Aromatics (BTX) Liquefaction	< 10 ppmv	Front End of
Nitrogen (N <sub>2</sub> )	< 1%	End flash

Gas ethane dan methane dialirkan ke *pipeline*, sedangkan propane dan fraksi yang lebih berat diolah lebih lanjut untuk dipisahkan komponen propane, butana, dan fraksi yang lebih berat.

#### A.1.2 Merkuri dalam Gas bumi

Merkuri merupakan komponen pengotor yang ada di semua bahan bakar fosil termasuk gas bumi, kondensat, minyak, dan batu bara. Konsentrasi merkuri dalam minyak mentah dan gas bumi sangat tergantung pada lokasi geologi dan bervariasi antara 0.01 ppb hingga 10 ppm. Deposit merkuri umumnya terasosiasi dengan lempeng geologi dan area dengan aktivitas vulkanik. Tabel 4 memaparkan konsentrasi merkuri di gas bumi dan kondensat berdasarkan areanya.



Tabel 4. Estimasi Konsentrasi Merkuri di Gas Bumi dan Kondensat (Boschee, 2013)

Location	Estimated mercury in natural gas and condensate for world regions	
	Gas ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Liquids ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )
Europe	100-150	-
South America	50-120	50-100
Gulf of Thailand	100-400	400-1200
Africa	80-100	500-1000
Gulf of Mexico (USA)	0.02-0.4	-
Overthrust Belt (USA)	5-15	1-5
North Africa	50-80	20-50
Malaysia	1-200	10-100
Indonesia	200-300	10-500

Adanya merkuri dalam gas bumi menimbulkan kekhawatiran terhadap degradasi peralatan, kesehatan dan keselamatan petugas lapangan, dan efeknya terhadap lingkungan karena merkuri merupakan senyawaan yang mudah terakumulasi dan beracun.

#### A.1.2.1 Efek merkuri

Efek merkuri terhadap kesehatan bergantung dari jenis merkuri yang terpapar ke manusia dan bagaimana merkuri masuk ke dalam tubuh. Efek Kesehatan juga dibagi menjadi efek kronis dan efek akut. Tabel 5 menjelaskan persentase jalur masuk merkuri ke dalam tubuh dan batas paparan dari masing-masing jenis merkuri.

Tabel 5. Batasan Paparan Senyawaan Merkuri Pada Tubuh

Mercury Form	Routes of Entry	PEL ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )
Elemental	Inhaled – 80% Skin - ~3% Ingest – poor	0.025 Ceiling: 0.03
Organic (Alkyl)	Inhaled – 90% skin ~ 5% Ingest – 95%	0.01
Inorganic (Aryl)	Inhaled – 15% Skin – limited information Ingest – 20%	0.1

Paparan merkuri konsentrasi rendah menyebabkan efek berbahaya pada syaraf, pencernaan, pernapasan, dan ginjal. Salah satu gejala paparan konsentrasi tinggi merkuri adalah kelelahan, demam, dan

menggigil. Paparan merkuri juga dapat mempengaruhi system pernafasan dan menyebabkan gejala seperti batuk, nafas yang pendek, sesak nafas, dan rasa terbakar di dada serta inflamasi paru-paru. Paparan 1-44 mg/m<sup>3</sup> merkuri selama 4-8 jam menyebabkan sakit pada dada, batuk, batuk dengan darah, terganggunya fungsi paru dan peradangan paru. Kerusakan jaringan syaraf tangan dan kaki telah dilaporkan terjadi pada pegawai dengan paparan tersebut. Berkurangnya kekuatan tangan dan kaki, keram dan pengurangan refleks juga telah dilaporkan.

Konsentrasi merkuri di udara ambien dibatasi tidak lebih dari 0.05 mg/m<sup>3</sup>. Paparan jangka panjang merkuri yang melewati batas aman terlihat pada sistem syaraf. Hal ini dapat terlihat pada berkurangnya koordinasi otot, perubahan mood, perilaku, memori, dan berkurangnya refleks. Efek kerusakan system syaraf seringkali disebut sebagai "Mad Hatter's Disease" karena merkuri nitrat dulu digunakan untuk membuat topi. Tremor merupakan indikasi paparan konsentrasi rendah merkuri dalam jangka Panjang. Hal tersebut merupakan tanda umum keracunan merkuri, umumnya terjadi di jari, tangan, dan mungkin terjadi pada sedikit kasus di kelopak mata, bibir, lidah dan seluruh badan.

#### A.1.2.2 Efek terhadap Lingkungan

Kebanyakan merkuri yang dilepaskan ke lingkungan merupakan merkuri metalik (Hg<sup>0</sup>) dan merkuri anorganik. Metalik merkuri masuk ke lingkungan melalui emisi bahan bakar gas yang mengandung merkuri. Merkuri organik, merkuri an organik, dan merkuri metalik juga dapat masuk ke lingkungan selama proses pengolahan gas.

Mirkoorganisme mengkonversi merkuri tersebut menjadi merkuri organik metil merkuri. Metil merkuri yang dilepaskan mikroorganisme dapat masuk ke air atau tanah dan masuk ke dalam rantai makanan. Metil merkuri akan terakumulasi pada rantai makanan terakhir.

### A.1.2.3 Efek terhadap Fasilitas Pengolahan Gas

Salah satu masalah yang terjadi pada pengolahan gas adalah kerusakan peralatan karena pembentukan amalgam. Pembentukan amalgam terjadi ketika unsur merkuri terkondensasi dan menjadi cairan dengan logam di system kriogenik. Korosi amalgam menggunakan merkuri sebagai katalis dengan adanya air untuk membentuk oksida kristal terhidrasi dari logam dasar. *Liquid metal embrittlement* (LME) melibatkan difusi cairan merkuri di sepanjang batas butir dalam logam dan dapat menyebabkan penyebaran retakan yang cepat. Korosi galvanik merkuri mempercepat reaksi asam / basa untuk logam dalam proses pengolahan gas yang korosif.

Korosi amalgam dan LME telah menjadi penyebab utama kerusakan peralatan aluminium karena merkuri. Kedua metode serangan ini dapat dicegah dengan menjaga suhu yang sangat rendah sehingga reaksi korosi terhambat, atau dengan pelapisan lapisan oksida pada permukaan logam. Namun, merkuri beku cenderung terakumulasi di retakan dan celah di mana logam belum membentuk lapisan oksida atau oksida telah retak karena perubahan suhu sistem selama penghentian proses pengolahan gas.

Area yang rentan adalah di sepanjang bagian las di mana panas lasan telah merusak oksida dan / atau membentuk paduan aluminium / magnesium (paduan Aluminium 5083 memiliki 4,5% berat magnesium) yang sangat rentan terhadap serangan merkuri. Setelah periode penghentian operasi yang lama, atau setelah proses pencairan merkuri, merkuri akan meleleh dan menyerang logam pada penukar panas.

Merkuri dan senyawanya memiliki efek negatif terhadap peralatan proses dan efisiensi katalis. Merkuri membentuk amalgam dengan berbagai logam, termasuk aluminium, tembaga, kuningan, Zinc, krom, besi, dan nikel dan menyebabkan *Liquid Metal Embrittlement* (LME) yang merupakan mekanisme kerusakan logam yang kompleks yang terjadi tanpa peringatan sebelumnya.

Ketika amalgam ini terbentuk dengan komponen logam di peralatan proses, akan terjadi korosi logam karena amalgam membuat logam menjadi

lemah atau karena hilangnya lapisan pelindung  $\text{Al}_2\text{O}_3$  di permukaan logam karena bereaksi dengan merkuri. Contoh spesifik dari peristiwa ini adalah korosi di penukar panas aluminium dan *well head valve*.

Korosi karena merkuri yang menyebabkan bencana adalah kerusakan penukar panas di plant LNG Skikda, Algeria. Merkuri dan senyawanya juga dapat berikatan dengan berbagai katalis dan menyebabkan penurunan efisiensi katalis. Kecelakaan lain terjadi pada tanggal 1 Januari 2004 di fasilitas pengolahan gas Santos Mooba, Australia. Insiden ini disebabkan oleh LME yang menyebabkan kerusakan pipa penukar panas, dilanjutkan dengan kebocoran gas, dan ledakan.

Karena insiden tersebut, konsentrasi merkuri dibatasi tidak lebih dari  $10 \text{ ng/m}^3$ . Meskipun dibatasi, pada LNG plant dengan kapasitas 8000 ton LNG/tahun, merkuri masih dapat terbentuk dan membeku di dalam penukar panas (Rios, Coyle, Durr, & Frankie, 1998). Berdasarkan diagram fase, merkuri dapat membeku pada suhu  $-40^\circ\text{C}$ .

## A.2 Batasan Konsentrasi Merkuri dalam Gas Bumi

Agar pengolahan dan pemanfaatan gas bumi aman digunakan dan tidak mencemari lingkungan, maka konsentrasi merkuri dibatasi sesuai dengan untuk apa gas bumi tersebut digunakan. Berdasarkan SNI 8414:2017, gas bumi yang digunakan untuk sumber bahan bakar pembangkit, pemanas, boiler, jargas, industri, dan, maka konsentrasi merkuri dalam gas bumi dibatasi tidak lebih besar dari  $100 \text{ ug/m}^3$ . Jika gas bumi akan diproses lebih lanjut dengan proses kriogenik seperti LNG dan LPG, atau proses petrokimia, maka konsentrasi merkuri dibatasi tidak lebih besar dari  $0.01 \text{ ug/m}^3$ .

## A.3 Adsorben Merkuri

Adsorpsi merkuri dari *raw* gas bumi merupakan teknologi yang telah matang. Metode ini juga dianggap sebagai metode yang paling mudah dioperasikan dibandingkan metode lainnya karena desain yang lebih sederhana, biaya relatif rendah, dan mudah dioperasikan. Merkuri

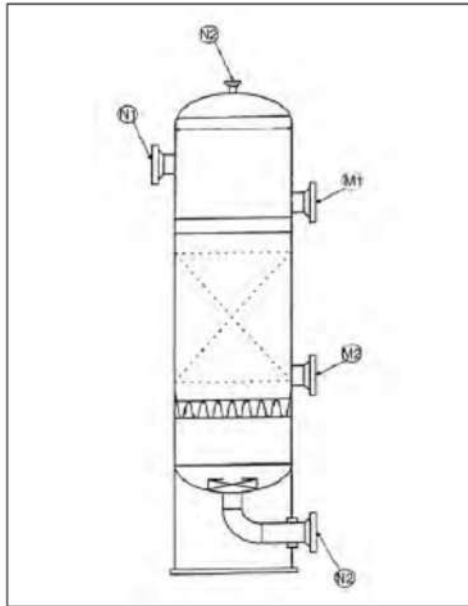
elemental dapat diadsorpsi dengan adsorben berbasis sulfur. Umumnya, untuk mengadsorp merkuri, adsorben komersial menggunakan sulfur, sulfida logam, perak, dan emas sebagai bahan aktif yang bereaksi dengan merkuri. Material *support* yang umum digunakan adalah karbon aktif, alumina, dan zeolite. Suhu operasi dari suhu ambien hingga 100°C dengan tekanan mencapai 100 bar.

Unsur merkuri dalam fase gas mudah teradsorpsi oleh adsorben berbasis sulfur yang mengikat merkuri dalam bentuk merkuri sulfida (HgS) yang tidak volatil. Paling umum, karbon aktif diolah secara kimiawi atau diimpregnasi dengan senyawa pengikat merkuri seperti belerang. Merkuri diadsorpsi secara kimiawi ke karbon aktif yang harus diganti secara berkala (biasanya setiap 3-4 tahun).

Kapasitas muatan merkuri dari karbon aktif adalah 10-30 wt% dari berat karbon, tergantung pada pabrikannya. Efisiensi pembuangan merkuri lebih besar dari 99% dengan konsentrasi gas pada keluaran adalah bawah 0,01 ug / Nm<sup>3</sup>. Karbon aktif bekerja paling baik pada aliran gas yang bersuhu 10-20°C di atas titik embun hidrokarbonnya dan tidak jenuh dengan air (kelembapan relatif gas adalah 70% atau kurang). Kondensasi hidrokarbon dan air akan mempengaruhi efisiensi penghilangan merkuri dari karbon aktif dan frekuensi pergantiannya.

*Mercury Removal Unit* (MRU) dapat dipasang di berbagai lokasi di dalam fasilitas pengolahan gas. Lokasi instalasi adsorben Merkuri bergantung pada komposisi gas inlet, konsentrasi merkuri pada *feed gas*, dan tujuan dari pengurangan konsentrasi merkuri. Jika konsentrasi merkuri pada *feed gas* relative kecil (dibawah 1 ug/m<sup>3</sup>) dan akan diekstrak LPG nya atau akan dijadikan LNG, maka MRU dapat diinstall setelah unit *acid gas removal* dan unit dehidrasi. Pada kondisi ini, kondensasi retrograde dapat dihindari dan gas sudah dibersihkan dari kontaminan sehingga proses pemisahan merkuri menjadi lebih efektif. Penempatan MRU setelah unit penghilang gas asam dan unit dehidrasi, mengurangi ukuran adsorben, karena volume gas yang melewati adsorben akan berkurang karena proses sebelumnya. Karena konsentrasi merkuri pada *raw gas* relative kecil, maka

emisi merkuri dari aktifitas regenerasi pada unit dehidrasi dan acid gas removal juga sangat kecil. Sebaliknya, jika konsentrasi merkuri pada *feed gas* sangat besar, maka instalasi MRU pada *inlet* proses pengolahan gas menjadi keharusan.



Gambar 5. *Mercury Removal Bed*

Setiap vendor memiliki kriteria untuk mengukur ukuran vessel adsorpsi. Kriteria desain yang umum adalah dengan kecepatan aliran superfisial sekitar 0,25 m / s dan waktu tinggal 10 detik. Dengan konsentrasi merkuri dalam gas yang relatif, maka adsorben dapat digunakan bertahun-tahun tanpa penggantian.

Tabel 6. Spesifikasi MRU di Pengolahan Gas Salam, Mesir

<u>Catalyst Information</u>		<u>Operational Conditions</u>	
Type	PURASPEC 1156	No. of trains	2
Weight	19 t	Flow rate per train	120 MMSCFD
Density	1000 kg·m <sup>-3</sup>	Turn-down ratio	50%
Diameter	2.8-4.75 mm	Pressure	63.1 barg (normal), 70 barg (design)
Form	Spherical granules	Temperature	61 °C (normal), 100 °C (design)
<u>Composition (mol %)</u>		Hg <sub>in</sub>	170 µg·Sm <sup>-3</sup>
N <sub>2</sub>	1	Hg <sub>out</sub>	< 0.1 µg·Sm <sup>-3</sup>
CO <sub>2</sub>	6.59	<u>Bed Information</u>	
C <sub>1</sub>	73.91	Volume	19 m <sup>3</sup>
C <sub>2</sub>	10.85	Diameter	3 m
C <sub>3</sub>	5.31	Height	2.7 m
i-C <sub>4</sub>	0.73	Pressure drop	< 0.5 bar
n-C <sub>4</sub>	0.97	Life	5 years
i-C <sub>5</sub>	0.25		
n-C <sub>5</sub>	0.15		
C <sub>6+</sub>	0.24		
SG	0.764		
MW	22.13		

#### A.4 Metode Impregnasi Karbon Aktif untuk Adsorben Merkuri

##### A.4.1 Overview

Karbon aktif yang memiliki luas permukaan besar, volume pori dan distribusi pori yang luas, telah digunakan untuk adsorben merkuri melalui adsorpsi fisik dan kimia. Secara fisik, merkuri terkondensasi di dalam pori hidrokarbon. Ikatan karena kondensasi sensitif terhadap perubahan suhu dan terikat dengan lemah. Proses ini bersifat eksotermis. Sebaliknya, adsorpsi kimia terjadi dengan gugus aktif pori, menghasilkan senyawaan yang tidak mudah menguap dan tidak sensitif terhadap perubahan suhu. Sulfur dan klorida direkomendasikan sebagai impregnan karbon aktif untuk mengadsorpsi merkuri.

##### A.4.1.1 Impregnasi Sulfur

Karbon aktif yang diimpregnasi sulfur sudah digunakan secara komersial untuk menghilangkan merkuri dalam gas bumi. Metode pembuatan karbon aktif yang diimpregnasi sulfur sudah banyak

diinformasikan pada banyak tulisan ilmiah (Chemrak, Benderdouche, Bestani, Benallou, & Cagnon, 2018; Feng et al., 2006a; Feng, Borguet, & Vidic, 2006a; Hsing Cheng Hsi, Rood, Rostam-Abadi, Chen, & Chang, 2001; Hsing Cheng Hsi, Tsai, Kuo, & Chiang, 2011; N. C. Hsi, Rood, Rostam-Abadi, Chen, & Chang, 2002; Kwon & Vidic, 2000; S. J. Lee, Seo, Jung, & Lee, 2004; Liu, Vidic, & Brown, 2000; Liu, Vidić, & Brown, 1998; Mukamurara et al., 2019; Skodras, Diamantopoulou, Natas, Palladas, & Sakellaropoulos, 2005; Vidic, Chang, & Thurnau, 1998). Impregnasi sulfur menambah gugus aktif permukaan dan menjadi gaya pendorong untuk meningkatkan efisiensi pemisahan merkuri. Mekanisme ikatan merkuri diawali oksidasi  $Hg^0$  menjadi  $Hg^{2+}$  dengan membentuk ikatan ganda dengan sulfur dengan menggunakan dua pasang electron berpasangan. Kemudian, salah satu electron mentransfer dari ikatan ganda  $Hg=S$  ke ikatan tunggal C-S, meninggalkan satu electron merkuri dan karbon, yang reaktif untuk menghasilkan ikatan tunggal. Selanjutnya ikatan, yang awalnya menghubungkan karbon dan belerang, putus, menciptakan pasangan elektron bebas. Karbon dengan struktur meso dan makro memiliki performa yang lebih baik karena peningkatan akses ke gugus aktif permukaan.

Proses impregnasi sulfur, dipengaruhi oleh metode impregnasi, waktu impregnasi, perbandingan karbon:sulfur, dan suhu impregnasi. Pada suhu impregnasi 400-600°C telah dilaporkan sebagai suhu optimum untuk menghasilkan adsorben yang efektif. Dibawah suhu 300°C, sulfur berkumpul di pori karbon dalam bentuk kluster sehingga menutup pori.

Pada perkembangannya, adsorben karbon aktif berbasis sulfur masih memiliki kendala yaitu sulfur yang lepas dari adsorben sehingga mengkontaminasi instalasi selanjutnya dengan sulfur. Adsorben yang diimpregnasi sulfur juga dapat dengan mudah teroksidasi jika terpapar oksigen sehingga mengurangi kapasitas dan efisiensi adsorben merkuri.

Karbon yang diimpregnasi sulfur secara meluas telah digunakan untuk demercurisasi di industri pengolahan gas bumi. Meskipun demikian, telah dilaporkan adanya kendala serius dalam penggunaan karbon aktif yang



diimpregnasi sulfur. Karbon sangat jarang diregenerasi karena suhu regenerasi yang sangat tinggi. Pada gas yang basah, ada potensi larutnya sulfur dalam aliran gas dan mengkontaminasi gas. Aliran gas basah juga memiliki potensi menyebabkan terjadinya kondensasi kapiler karena adanya mikropori pada struktur karbon aktif dan menyebabkan penurunan kapasitas adsorpsi merkuri. Konsekuensinya, adsorben merkuri ditempatkan di tahap akhir pemurnian atau setelah *dryer molecular sieve*. Solusi potensial permasalahan ini adalah dengan menggunakan sulfida logam di pori matrik karbon karena logam sulfida cenderung tidak larut karena gas yang basah.

Hal-hal yang mempengaruhi kualitas karbon aktif sulfur yang dibuat diantaranya adalah metode pembuatan, perbandingan rasio sulfur dan karbon, karakteristik karbon, suhu adsorpsi, dan komposisi hidrokarbon berat dalam gas.

#### II.A.4.1.1.1 Pengaruh Pemilihan Metode Impregnasi

Ada dua metode impregnasi karbon aktif menggunakan sulfur. Pada metode 1, karbon aktif dan bubuk sulfur ditempatkan dalam wadah keramik terpisah. Nitrogen UHP dialirkan sebesar 50 ml/min untuk menjaga lingkungan inert selama proses impregnasi. Suhu furnace dijaga konstan selama waktu yang ditetapkan. Furnace kemudian didinginkan dan karbon aktif dapat digunakan untuk mengadsorpsi merkuri. Metode 2 secara prinsip sama dengan metode 1, namun sulfur dicampur dengan karbon dengan perbandingan tertentu didalam wadah keramik

Metode 2 lebih baik dalam hal jumlah sulfur yang digunakan dan sulfur lebih terdistribusi di permukaan karbon aktif. Metode impregnasi, termasuk suhu impregnasi, rasio karbon-sulfur, dan waktu impregnasi dilaporkan mempengaruhi keefektifan impregnasi dengan sulfur. Pemilihan metode ditujukan untuk mendistribusikan sulfur secara merata dalam struktur pori tanpa menyumbat pori. Dapat diketahui juga dari literatur bahwa kadar sulfur yang lebih tinggi tidak secara proporsional meningkatkan kapasitas adsorpsi merkuri. Diketahui juga bahwa distribusi sulfur lebih penting

dibandingkan perbandingan sulfur/karbon. Pemahaman yang baik mengenai parameter yang berkontribusi terhadap distribusi sulfur yang merata penting agar bisa didapatkan kapasitas adsorpsi yang baik.

#### II.A.4.1.1.2 Pengaruh Suhu Impregnasi dan Rasio Karbon:Sulfur

Suhu dan rasio sulfur terhadap karbon sangat penting untuk distribusi sulfur di pori-pori dan di permukaan luar karbon aktif. Pada suhu impregnasi yang lebih rendah, molekul sulfur membentuk cincin atau rantai linier Panjang. Meskipun struktur ini menghadirkan sedikit hambatan sterik pada pori-pori besar, agregat sulfur cenderung menghalangi jalan masuk ke pori-pori berukuran sedang dan juga membentuk banyak lapisan yang mengurangi luas permukaan karbon aktif.

Di sisi lain, pada suhu impregnasi yang lebih tinggi, molekul belerang membentuk rantai pendek yang lebih kecil menjadi dominan dan mudah bermigrasi melalui pori-pori karbon, menghasilkan distribusi belerang yang lebih seragam. Rasio sulfur terhadap karbon kurang signifikan dibandingkan suhu impregnasi, tetapi masih dilaporkan sebagai parameter penting. Pada rasio sulfur terhadap karbon yang tinggi, sulfur mungkin tidak terimpregnasi secara merata di permukaan karbon dan dapat membentuk cluster atau bentuk terkondensasi lainnya sehingga tidak efektif untuk adsorpsi merkuri. Kapasitas adsorpsi merkuri terbaik diperoleh dengan sulfur yang secara kimiawi terikat pada karbon. Sehingga, sifat ikatan terhadap karbon Bersama dengan distribusi sulfur yang merata menjadi lebih penting daripada persentase sulfur yang ada pada karbon.

Liu dan Vidic telah membuat protokol impregnasi sulfur yang dioptimalkan untuk penghilangan merkuri dalam fase gas menggunakan karbon aktif. Kinetika adsorpsi menunjukkan karbon aktif yang diimpregnasi sulfur dapat mengadsorp merkuri dari fase gas dibandingkan karbon aktif tanpa impregnasi.

Difusi merkuri ke sulfur merupakan tahap yang paling lambat pada proses adsorpsi. Kapasitas adsorpsi maksimum dilaporkan menjadi 2600  $\mu\text{g Hg} / \text{g}$  karbon aktif yang diimpregnasi sulfur. Mereka juga melaporkan

suhu impregnasi menjadi faktor dominan daripada rasio sulfur terhadap karbon.

His et al. telah melaporkan suhu impregnasi sulfur optimal menjadi 300-400°C, dengan kapasitas adsorpsi maksimum 4509 µg Hg / g karbon, yang secara signifikan lebih tinggi daripada yang dilaporkan oleh Liu, Vidic, dan Brown. Mereka merekomendasikan diameter pori yang lebih besar dari 20 Å untuk memfasilitasi ikatan belerang di pori-pori dalam karbon. Ikatan antara karbon dan sulfur diidentifikasi sebagai hal yang kritis dibandingkan rasio karbon/belerang. Literatur lain menjelaskan bahwa suhu impregnasi sulfur dalam kisaran 300-600°C adalah parameter paling kritis dalam menyiapkan karbon yang diimpregnasi sulfur.

Singkatnya, pada suhu impregnasi tinggi, sulfur terpecah menjadi rantai kecil yang memfasilitasi difusi lebih mudah ke dalam struktur berpori, membentuk ikatan karbon-sulfur. Pada rasio sulfur-karbon yang tinggi, terdapat kemungkinan pembentukan rantai yang tinggi di pori-pori karbon, yang menutup pori dan menurunkan luas permukaan yang tersedia untuk adsorpsi. Pada waktu aktivasi yang lebih lama, sulfur diharapkan terdistribusi merata. Karena banyak faktor yang saling berhubungan, dan kondisi pori dari karbon aktif berkontribusi terhadap variasi kualitas adsorben. Juga perlu diingat bahwa kondisi optimum juga sangat tergantung pada tipe karbon. Kondisi optimum sangat mungkin berbeda antara sumber karbon satu dan lainnya.

#### II.A.4.1.1.3 Penelitian Adsorben Karbon Aktif-Sulfur yang lain

Penelitian pembuatan adsorben merkuri dengan impregnasi sulfur sudah banyak dilakukan dengan kapasitas adsorpsi tertinggi mencapai 25 mg Hg/g Adsorben (S. H. Lee & Park, 2003). Pada penelitian tersebut adsorben karbon aktif diimpregnasi dengan sulfur dari wadah terpisah pada suhu 400°C. Kapasitas didapatkan dengan pengujian 0.05 gram adsorben Sulfur, 60-90 L/jam aliran N<sub>2</sub> yang mengandung 160 ug Hg/m<sup>3</sup>, dan waktu kontak 0.035 s.

Mukamurara et al, 2019, melakukan impregnasi karbon aktif 20x40 mesh pada suhu 350°C, rasio Karbon:Sulfur=1:10, dan kadar sulfur 10%. Uji kapasitas adsorpsi dilakukan dengan mengalirkan gas mengandung merkuri ke 0.1 g karbon aktif dengan ukuran 180x200 mesh. Kapasitas dihitung dengan mengintegrasikan area grafik antara konsentrasi merkuri dari gas inlet dan outlet. Kapasitas adsorpsi Hg mencapai 24 mg Hg/g adsorben.

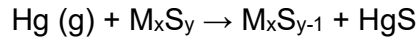
Penelitian lain menggunakan impregnasi karbon aktif dengan larutan K<sub>2</sub>S dan didapatkan kapasitas adsorpsi 21 mg Hg/g Adsorben dan kadar sulfur dalam adsorben 6.7%(Sano, Takaoka, & Shiota, 2017). Pengujian kapasitas dilakukan dengan mengalirkan gas N<sub>2</sub> yang mengandung merkuri dengan konsentrasi 8 mg/m<sup>3</sup> ke dalam 2 gram adsorben. Kecepatan superficial pada uji kapasitas ini adalah 7.96 m/s dengan waktu kontak 2.51 s.

#### A.4.1.2 Impregnasi CuS

Pada beberapa kasus, terutama gas dengan hidrokarbon berat, terdapat potensi dimana sulfur terbawa aliran gas dan menyebabkan penurunan kapasitas dari adsorben. Akibatnya, adsorben jenuh lebih cepat dari yang dijadwalkan dan terjadi penghentian proses yang tidak terjadwal. Adsorben metal sulfida dikembangkan agar sulfur di permukaan karbon aktif lebih stabil dan meminimalkan terbawanya sulfur oleh aliran gas. Adsorben nano-metal sulfida dilaporkan memiliki kapasitas yang lebih baik dibandingkan karbon aktif, namun demikian penggunaan komersial terbatas karena tingginya penurunan tekanan(*Pressure drop*) di kolom adsorpsi. Untuk mengatasi masalah tersebut, digunakan berbagai material *support* seperti karbon aktif, alumina, atau silica dengan berbagai sulfida logam seperti tembaga, perak, perak/emas, nikel dsb.

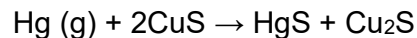
Karbon aktif yang diimpregnasi logam sulfida dapat menjadi metode alternatif untuk mengatasi masalah yang terjadi pada adsorben karbon aktif yang diimpregnasi sulfur. Logam terikat di permukaan material *support* anorganik dengan sulfida, atau direaksikan dengan gas H<sub>2</sub>S. Reaksi kimia

antara merkuri dan logam sulfida merupakan reaksi *non-reversible* dan proses nya telah digunakan di industri secara umum.



Logam sulfida dapat digunakan baik pada gas basah maupun gas kering karena spesies reaktif dan material *support* memiliki struktur mesopori dengan sedikit afinitas untuk hidrokarbon cair. Selain itu, risiko kondensasi kapiler sangat kecil dibandingkan karbon aktif dan tidak ada risiko migrasi sulfur melalui sublimasi atau disolusi.

Penelitian terbaru telah dilakukan mensintesis berbagai sulfida logam dengan metode presipitasi. CuS memiliki serapan Hg<sup>0</sup> terbesar pada 50°C, diikuti oleh MnS, SnS, ZnS dan CdS. Efisiensi adsorpsi Hg oleh adsorben CuS meningkat dengan menurunkan aliran gas. Dengan logam sulfida, pengaruh O<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub> dapat diabaikan. Mekanisme penghilangan merkuri melibatkan oksidasi Hg<sup>0</sup> menjadi Hg<sup>2+</sup> karena adanya Cu<sup>2+</sup>, sementara pada saat yang sama Cu<sup>2+</sup> direduksi menjadi Cu<sup>1+</sup> (Cu<sub>2</sub>S).



Jubin dan Ducreux (2014) berpendapat bahwa faktor pembatas untuk mekanisme ini lebih pada difusi merkuri daripada termodinamika atau kinetika reaksi. Berbagai jenis difusi terlibat dalam proses ini: difusi merkuri dari gas ke permukaan luar adsorben, kemudian difusi pada lapisan di sekitar partikel adsorben, dan akhirnya difusi di dalam partikel adsorben. Bentuk dan ukuran partikel sorben dapat disetel untuk meningkatkan difusi eksternal merkuri, dan porositas pembawa juga dapat disesuaikan untuk mengoptimalkan efisiensi adsorpsi merkuri, dengan mencegah kondensasi kapiler (Nédez et al., 1996) dan meningkatkan akses merkuri ke situs aktif.

Mengingat spesifikasi konsentrasi merkuri dalam gas yang masuk ke kilang LNG sangat rendah, maka target efisiensi adsorpsi merkuri harus mencapai 99.9%. Jika efisiensi penyerapan turun hingga dibawah 99%,

adsorben perlu diganti. Reaksi  $\text{CuS}$  dengan uap  $\text{Hg}^0$  pada  $0\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$  berlangsung spontan ( $\Delta G < 0$ ). Namun,  $\text{Cu}_2\text{S}$ , tidak bereaksi secara spontan dengan  $\text{Hg}^0$  ( $\Delta G > 0$ ).

Adsorben metal sulfida diklaim memiliki kemampuan lebih baik karena memiliki aktivitas yang lebih tinggi. Keuntungan adsorben metal sulfida dibandingkan adsorben karbon aktif yang diimpregnasi sulfur diantaranya adalah (i) Sulfur elemental memiliki beberapa allotropes, dengan allotropes( $\text{S}_2$ ) sangat mudah bereaksi dengan merkuri dibandingkan allotropes( $\text{S}_8$ ). Impregnasi suhu rendah menghasilkan sulfur rantai Panjang yang kurang aktif bereaksi dengan merkuri (ii) Senyawaan logam sulfida stabil pada suhu tinggi, serta membuatnya lebih aktif dan efektif. (iii) penyumbatan pori mikro karena aglomerasi sulfur diminimalkan. (iv) kondensasi hidrokarbon terjadi di pori mikro. Hal ini dapat menyebabkan masalah dimana sulfur larut ke dalam cairan dan menyebabkan hilangnya sulfur karena cairan hidrokarbon dan kontaminasi hilir dari proses, serta menurunkan kapasitas adsorben yang diimpregnasi dengan sulfur. Pada adsorben logam-sulfida, sulfur terikat secara anorganik, sehingga potensi hilangnya sulfur karena sublimasi atau karena larut dengan air/hidrokarbon dapat diminimalkan. Karena itu, dilakukan pengembangan adsorben tembaga sulfida yang diharapkan lebih stabil dan bebas dari masalah hilangnya sulfur dari adsorben karena terbentuknya cairan hidrokarbon.

Metode untuk impregnasi karbon aktif dilakukan dengan mengimpregnasi karbon aktif dengan larutan Cu dan selanjutnya Cu yang terimpregnasi direaksikan dengan larutan Natrium Sulfida. Karbon aktif kemudian dikeringkan pada suhu  $100^\circ\text{C}$  selama 12 jam.

Metode impregnasi dengan  $\text{CuS}$  memiliki kelemahan dimana sulfur tidak memiliki reaktivitas seperti sulfur sebagai siklik. Karenanya, untuk mempertahankan reaktivitas terhadap merkuri, maka karbon aktif diimpregnasi dengan tembaga sebelum diimpregnasi dengan sulfur pada suhu  $400\text{--}600^\circ\text{C}$ . Dengan impregnasi fase gas diharapkan sulfur lebih terdistribusi ke dalam pori karbon aktif dan mempertahankan reaktivitasnya dalam bereaksi dengan merkuri.

Reddy et al, 2015, dan Reddy et al, 2018 membuat adsorben merkuri dari serbuk karbon aktif yang diimpregnasi Cu dan S dalam larutan. Kapasitas adsorben yang dibuat dapat mencapai 23 mg Hg/g adsorben. Pengukuran kapasitas dilakukan dengan mengalirkan gas mengandung merkuri melewati 0.1 gram adsorben. Merkuri teradsorpsi diukur menggunakan DMA Mercury Analyzer.

#### A.4.1.3 Impregnasi ZnCl<sub>2</sub>

Karbon aktif yang diimpregnasi dengan ZnCl<sub>2</sub> diketahui dapat menurunkan konsentrasi merkuri dari flue gas yang berasal dari pembakaran bahan bakar batubara (Hu, Zhou, He, Luo, & Cen, 2009; Yakub, Mohammad, & Yaakob, 2013; Zeng, Jin, & Guo, 2004). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa impregnasi dengan ZnCl<sub>2</sub> secara signifikan meningkatkan kapasitas adsorpsi merkuri. Namun demikian, impregnasi juga menurunkan luas permukaan dari karbon aktif karena penutupan pori oleh molekul ZnCl<sub>2</sub>. Karena peningkatan ukuran pori rata-rata terjadi seiring dengan peningkatan konsentrasi ZnCl<sub>2</sub>, penutupan pori dapat terjadi karena penutupan pori mikro. Meskipun terjadi pengurangan luas permukaan karbon aktif, metode ini masih berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut.

Metode impregnasi karbon aktif dengan ZnCl<sub>2</sub> (Zeng et al., 2004) adalah dengan cara merendam karbon aktif dalam larutan ZnCl<sub>2</sub> 1% dan 5% (W/V) selama 12 jam dengan perbandingan rasio larutan ZnCl<sub>2</sub> : karbon aktif adalah 0.55 ml larutan/gram karbon aktif. Karbon aktif kemudian dikeringkan pada suhu 90°C, didinginkan pada suhu kamar dan kemudian disimpan dalam desikator.

Berbeda pada penelitian sebelumnya, pada tahun 2011, metode impregnasi menggunakan ZnCl<sub>2</sub> 7% lebih baik dibandingkan dengan konsentrasi 5%. Selain itu, dilakukan pula pencucian dan pemanasan karbon aktif sebelum diimpregnasi untuk memastikan pori tidak tertutup kotoran (Pitaloka & Rosmayati, 2011).

Zeng et al, 2004 melakukan pengembangan adsorben merkuri untuk flue gas menggunakan karbon aktif yang diimpregnasi ZnCl<sub>2</sub> 5%. Dari

penelitian ini, didapatkan adsorben karbon aktif dengan kapasitas adsorpsi 0.9 mg Hg/g.

#### A.4.1.4 Impregnasi HCl dan CS<sub>2</sub>

Hingga saat ini, adsorben yang diimpregnasi dengan sulfur menghasilkan efisiensi adsorpsi terbesar. Namun, masih belum diketahui perbedaan kapasitas adsorpsi adsorben yang diimpregnasi sulfur dan adsorben yang diimpregnasi dengan halogen Cl. Karenanya, Jang et al., 2017, mencoba *Powdered Activated Carbon*(PAC) yang diimpregnasi HCl dan CS<sub>2</sub> untuk membandingkan efisiensi adsorpsi kedua impregnan tersebut. Dari kinetika adsorpsi, diketahui bahwa kapasitas adsorpsi karbon aktif yang diimpregnasi HCl dan CS<sub>2</sub> adalah 333 dan 256.4 µg/g, sehingga karbon aktif yang diimpregnasi HCl memberikan kemampuan adsorpsi yang lebih baik dibandingkan karbon aktif yang diimpregnasi sulfur(H. N. Jang et al., 2017a).

#### A.4.2 Pengaruh Suhu Adsorpsi

Suhu adsorpsi merupakan parameter kritis dan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap adsorpsi unsur merkuri. Kapasitas adsorpsi dari karbon murni dilaporkan menurun secara progresif dengan meningkatnya suhu dari 25 menjadi 140°C, karena sifat eksotermik dari proses adsorpsi. Di sisi lain, karbon berpori yang terimpregnasi sulfur menunjukkan peningkatan kapasitas adsorpsi merkuri dengan meningkatnya suhu adsorpsi. Ini dapat dikaitkan dengan proses adsorpsi kimia yang melibatkan reaksi belerang dengan merkuri. Peningkatan kapasitas adsorpsi merkuri dilaporkan hanya sampai 140°C, di atasnya kapasitas tersebut menurun. Penurunan kapasitas adsorpsi di atas suhu ini telah dikaitkan dengan aglomerasi sulfur yang terimpregnasi di dalam struktur berpori karbon.

Sinha dan Walker dan Krishnan et al. telah melaporkan peningkatan kapasitas adsorpsi karbon yang diimpregnasi sulfur dengan peningkatan suhu adsorpsi, karena semakin tercukupinya energi aktivasi untuk memulai reaksi merkuri-sulfur.



Dapat disimpulkan bahwa kapasitas adsorpsi karbon aktif tanpa impregnasi turun dengan meningkatnya suhu dari 25 menjadi 140°C, sedangkan kapasitas adsorpsi karbon yang diimpregnasi sulfur meningkat dengan peningkatan suhu adsorpsi hingga 140°C. Pada suhu lebih tinggi, kapasitas adsorpsi mengalami penurunan.

#### A.4.3 Pengaruh Karakteristik Pori

Adsorpsi unsur merkuri tidak hanya bergantung pada kondisi adsorpsi tetapi juga pada karakteristik karbon berpori. Dalam literatur telah dikonfirmasi bahwa sifat fisik pori (misalnya luas permukaan BET, distribusi ukuran pori, ukuran partikel, dll.) memiliki pengaruh yang lebih kecil daripada sifat kimianya (misalnya adanya gugus laktonik, karbonil dan fenolik). Hal ini wajar karena adsorpsi fisik hanya bergantung terutama pada sifat fisik karbon berpori, tetapi *chemisorption* bergantung pada gugus fungsi dan sifat kimia permukaan memainkan peran penting.

Isoterm adsorpsi nitrogen memberikan pemahaman rinci tentang struktur dan distribusi pori. Makropori yang ada dalam fungsi karbon sebagai tempat masuk merkuri ke dalam karbon aktif, mesopori berfungsi sebagai saluran transportasi, dan adsorpsi terjadi di dalam pori-pori mikro. Akibatnya, distribusi pori menjadi kunci untuk memahami kinerja karbon berpori. Secara umum proses impregnasi sulfur pada karbon berpori akan mengurangi luas permukaan BET. Pada suhu impregnasi rendah, belerang hadir sebagai alotrop S<sub>8</sub>, dan molekul berstruktur cincin ini hanya dapat memasuki pori-pori besar dan membentuk kelompok. Akibatnya, cluster ini memblokir pintu masuk pori dan mengurangi total luas permukaan, tetapi pada suhu impregnasi tinggi, sulfur terbagi menjadi molekul rantai pendek yang dapat dengan mudah bermigrasi di sepanjang pori-pori karbon, menghasilkan distribusi sulfur yang lebih seragam.

Adsorben komersial telah diuji dan telah ditemukan bahwa penyerap dengan area makro dan mesopori yang besar mungkin penting untuk adsorpsi unsur merkuri yang lebih baik, karena peningkatan akses ke situs aktif yang terletak pada permukaan internal karbon. Sulfur yang tersimpan di dalam pori-pori jauh lebih aktif daripada gumpalan rantai S<sub>8</sub> yang

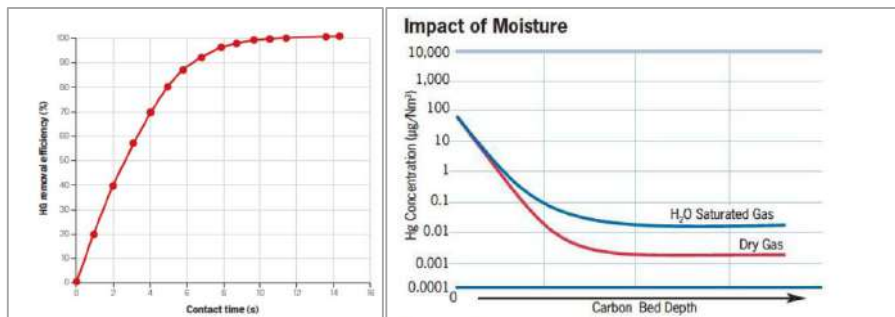
terbentuk di dalam atau di luar pori karbon dan menghalangi akses masuk ke dalam pori.

#### A.4.4 Pengaruh Kelembaban dan Hidrokarbon Berat

Karbon aktif memiliki struktur pori. Adanya pori dalam karbon aktif dapat menyebabkan hidrokarbon berat dan air terkondensasi di dalam pori karbon. Air yang terkondensasi di pori hidrokarbon bergantung pada adanya situs aktif oksigen di permukaan karbon (Brennan, Thomson, & Gubbins, 2002). Adsorpsi air meningkat seiring dengan meningkatnya situs aktif oksigen. Karbon tanpa situs aktif tidak mengadsorpsi air. Adanya air di dalam pori karbon akan mempengaruhi konektivitas yang ada dalam pori. (Morishige, Kawai, & Kittaka, 2014) melaporkan bahwa kondensasi air pada karbon aktif dengan sedikit mikropori dan tidak memiliki gugus fungsi terjadi dengan perlahan pada tekanan jenuhnya.

Sama halnya dengan air, hidrokarbon berat akan terkondensasi dalam pori karbon aktif. Tergantung komposisi gasnya, kondensasi kapiler terjadi terlebih dahulu di mikropori. Karbon aktif yang diimpregnasi sulfur dapat larut dan terbawa aliran gas. Aplikasi pada cairan hidrokarbon dapat menyebabkan larutnya sulfur dalam cairan hidrokarbon.

Aliran gas yang lebih cepat dan waktu kontak yang kecil menyebabkan menyebabkan efisiensi adsorpsi turun dan pemanfaatan adsorben tidak optimal seperti gambar 6 pada grafik dibawah ini. Gas yang lembab juga menyebabkan efisiensi adsorpsi turun karena air terkondensasi di dalam pori dan menghambat difusi gas ke dalam gugus aktif.



Gambar 6. Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Efisiensi Proses Adsorpsi (Kiri), Pengaruh Kelembaban Terhadap Kapasitas Adsorpsi (Kanan)

#### A.4.5 Adsorben Merkuri Komersial (Impor)

Secara umum, adsorben merkuri komersial yang sudah ada dibagi menjadi 4 jenis dengan berbagai kelebihan dan kekurangan, seperti dijelaskan pada tabel 7. Karbon aktif yang diimpregnasi sulfur merupakan adsorben yang paling banyak digunakan karena harga yang relatif murah dibandingkan produk adsorben lain. Namun demikian, adsorben merkuri memiliki permasalahan dimana sulfur terbawa aliran gas yang mengkontaminasi sistem selanjutnya. Adsorben karbon aktif juga memiliki masalah dalam pembuangan, dimana adsorben yang jenuh merkuri harus diekspor Kembali ke produsen untuk diolah.

Tabel 7. Jenis Adsorben Merkuri Komersial(*Chalkidis, Jampaiah, Hartley, Sabri, & Bhargava, 2020*)

Senyawa Aktif	Media	Hasil Reaksi	Paling banyak digunakan,	Kondisi Operasi
Sulfur	Karbon	HgS	Tinggi biaya investasi, dehidrasi bersamaan	T: 0-120°C, P : 0.1-70 bar, waktu kontak 0.2-20 s
Perak	Zeolit	Ag-Hg Amalgam	Kemampuan untuk diregenerasi	T: 16-60°C, P : 1.4-175 bar, GHSV 10.000-100.000, regenerasi 200-350°C
Metal Oksida/Sulfida	Logam Oksida	HgO/HgS	Korosivitas, kontaminasi sistem, masalah regenerasi	T : 20-100°C, P : 10-200 bar, <i>Humidity</i> 10-90%
Thiol/oksidator/ senyawaan pengkomplek	Larutan	Hg <sup>2+</sup>		T : 20-90°C, P : 1-70 bar, Superficial gas Velocity 2-30 cm/s

Jenis karbon aktif komersial yang dibuat dari karbon aktif yang diimpregnasi sulfur dipaparkan pada tabel dibawah ini. Adsorben ini dapat menghilangkan merkuri organik dan anorganik dari gas hingga tercapai konsentrasi 0,01–0,001  $\mu\text{g} / \text{Nm}^3$  dari outlet adsorben.

Tabel 8. Karakteristik Adsorben Karbon Aktif Komersial

No	Merek	S (%w)	Ukuran	Densitas (Kg/m <sup>3</sup> )	Hard ness	Gas	Remark
1	Selexsorb (Pellet)		4x6	550	95	Dry	
2	Calgon (pellet & Granullar)	8-15	4x10, 4 mm diameter	577			Waktu kontak min 20 s, Kons. Outlet gas jenuh 0.01ug/m <sup>3</sup> , Tidak jenuh : 0.001ug/m <sup>3</sup>
3	Norit RBHG	Min 10	4 mm	520	99	Humidity max 70%, max temp 100°C	Waktu kontak min 10 s, <i>Superficial Velocity</i> max 25 cm/s, pressure drop @25cm/s 1.2 kPa/m
4	Mersorb	10-16	3&4 mm	530 -590	97-99	Max temp 150°C,	kapasitas equilibrium adsorbent baru: >20%

Contoh karakteristik adsorben komersial alumina yang diimpregnasi tembaga sulfida Durasorb dipaparkan pada tabel 9.

Tabel 9. Karakteristik Adsorben Durasorb

Bentuk	Spheres, 1/8 in
Komposisi	10% berat Tembaga
Desain Kapasitas	>6% berat Hg pada kondisi Jenuh
<i>Loss on Ignition</i>	6-8% berat
Bulk density	750-800 kg/m <sup>2</sup>
Crush Strength	>15N
N <sub>2</sub>	>200 m <sup>2</sup> /gram(0.35 ml/g)

Dari tabel 9 diketahui adsorben tembaga sulfida memiliki kapasitas lebih kecil dibandingkan adsorben adsorben karbon aktif yang diimpregnasi Sulfur. Selain itu, penanganan adsorben ini harus hati-hati karena jika terkontaminasi udara, maka kapasitas adsorben ini akan berkurang. Meskipun demikian, adsorben ini dapat digunakan dengan baik pada kondisi gas yang memiliki titik embun sama dengan kondisi ambien (jenuh dengan hidrokarbon dan air).

Tabel 10. Contoh Pemanfaatan Adsorben Merkuri di Indonesia

Lokasi	Jenis Adsorben	Produk
LPG Balongan	AC-S	SELEXSORB HG
LPG-Mundu	AC-S	
LPG-Arar	AC-S	
Jambi Merang	Polimer/ resin	Ambersep GT74
LNG Badak	AC-S	
Grissik-Suban	AC-S	
LPG-Ujung Pangkah	Metal oksida	Puraspec 1157

Dari produk komersial yang dijelaskan diatas, karbon aktif yang diimpregnasi sulfur paling banyak diaplikasikan secara komersial. Seperti dijelaskan sebelumnya, karbon aktif yang diimpregnasi sulfur memiliki kekurangan dimana sulfur yang terikat di permukaan karbon aktif terbawa aliran gas atau larut ketika menangani gas basah. Di sisi lain, alumina yang diimpregnasi tembaga sulfida menjadi pilihan untuk mengatasi hal tersebut dengan lebih mahal. CuS yang terikat alumina juga cenderung teroksidasi oleh oksigen sehingga perlu penanganan khusus dengan inert nitrogen selama transfer adsorben ke MRU. Jika karbon aktif bisa diimpregnasi dengan tembaga sulfida, diharapkan sulfur lebih terikat ke adsorben sehingga lebih sedikit terbawa aliran gas.

#### A.4.6 Pertimbangan dalam Pengembangan Adsorben Merkuri untuk Industri Migas

Banyak material yang diuji untuk adsorben merkuri dari gas buang (*Flue gas*) tidak bisa digunakan sebagai adsorben merkuri pada kondisi gas bumi. Seperti kemampuan untuk mengadsorp merkuri pada suhu ambien, konsentrasi merkuri yang relatif tinggi, dan kondisi gas yang reduktif, serta ketahanan terhadap gas asam seperti CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S. Kapasitas penyerapan merkuri yang besar dengan batasan konsentrasi merkuri pada outlet gas yang kecil merupakan sifat yang penting dalam system pengolahan gas bumi. Sebagai tambahan, adsorben sebaiknya memiliki ukuran volume yang besar dan distribusi pori yang dibuat tertentu, fase aktif yang terdistribusi merata di adsorben yang memiliki luas permukaan yang besar, *crushing strength* dan ketahanan terhadap gesekan untuk menjamin penurunan tekanan yang rendah dan stabil, tanpa *channeling*, dan pembentukan sebuk.

#### A.4.7 Penanganan Limbah Adsorben Merkuri

Insinerasi, *stabilisasi/solidifikasi*, penyimpanan permanen, *landfill*, dan injeksi sumur dalam adalah teknologi utama yang digunakan untuk pembuangan merkuri. Kontaminasi sekunder dapat diminimalkan dengan teknologi penyimpanan permanen. Pembuangan limbah yang mengandung merkuri dari fasilitas minyak dan gas harus dilakukan sesuai dengan pedoman Konvensi Basel (Konvensi Basel, 2011). Jika terkubur, sebagian merkuri inorganik di TPA dapat diubah oleh bakteri menjadi bentuk merkuri organik yang lebih toksik, yang kemudian dapat dilepaskan kembali ke atmosfer. Menurut PPLI, jika kandungan merkuri limbah lebih dari 260 mg.kg<sup>-1</sup>, harus diekspor untuk diolah di fasilitas pengolahan luar negeri. Pemangangan dan retorting dapat digunakan untuk mengurangi konsentrasi merkuri hingga kurang dari 0,2 mg.L<sup>-1</sup>. Secara umum, penghilangan merkuri dari campuran kompleks dapat dilakukan terutama melalui metode kimia dan termal. Proses thermal mengubah, menguap, dan memadatkan merkuri. Perlakuan kimia melibatkan mereaksikan senyawa

unsur, anorganik atau organik menjadi ion terlarut, senyawa anorganik tak larut atau kompleks padat.

Yan (1987a) mengklaim proses di mana limbah adsorben merkuri dibuat tidak berbahaya untuk pembuangan TPA. Dalam proses ini, limbah adsorben merkuri dimasukkan ke dalam zona pembakaran terfluidisasi (600–1000 ° C) bersama dengan bahan alkali tanah (misalnya batu kapur) dan air untuk menghasilkan uap. Residu secara substansial berkurang kandungan merkurnya dan gas pembakaran didinginkan sehingga merkuri terkondensasi dan dapat dikumpulkan.

Seperti yang telah disebutkan di atas, salah satu pilihan untuk pembuangan adalah melalui sumur injeksi (Brkic et al., 2003; Yod-in-Lom dan Doyle, 2002) di mana bahan limbah ditempatkan ke lokasi geologi yang aman. Jenis sumur pembuangan ini biasa terjadi di industri minyak dan gas untuk limbah cair tidak beracun. Misalnya, air yang diproduksi bersama seringkali disuntikkan kembali ke formasi awal. Pertimbangan teknis yang paling penting untuk pusat sumur pembuangan adalah identifikasi formasi yang sesuai yang tidak berhubungan dengan formasi air. Formasi geologi yang dipilih harus ditutup dengan batuan kedap air dan batuan penutup tanpa adanya sesar regional vertikal, sehingga mencegah limbah berpindah ke akuifer air. Sebelum injeksi, bahan limbah harus diolah untuk mengubahnya menjadi bentuk yang dapat diinjeksi dan stabil secara kimiawi.

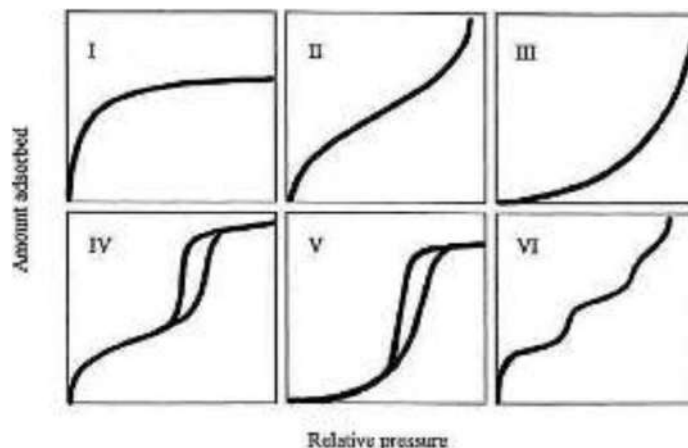
## A.5 Karakterisasi Adsorben

### A.5.1 Brunauer, Emmet, and Teller (BET)

Adsorpsi merupakan peristiwa terakumulasinya partikel pada permukaan padatan, sedangkan desorpsi merupakan proses kembalinya (Atkins dkk., 2010). Istilah adsorpsi dan desorpsi sering digunakan untuk menunjukkan keadaan kesetimbangan yang telah didekati. Terdapat dua tipe pada proses adsorpsi dimana berdasarkan pada kekuatan ikatan antara adsorben dan adsorbat. Pada adsorpsi fisika (fisisorpsi), ikatan-ikatan antara atom atau molekul adsorben dan adsorbat disebabkan oleh

interaksi dipol-dipol dan ikatannya relatif lemah. Adsorpsi kimia (kemisorpsi) partikel melekat pada permukaan dengan membentuk ikatan kimia berupa ikatan ion dan kovalen antara adsorben dan adsorbat, sehingga ikatannya lebih kuat dibandingkan fisisorpsi (Roqueul dkk., 1999).

Fisisorpsi secara termodinamika merupakan reaksi isotermal yang reversibel. Hubungan yang terjadi pada suhu konstan antara jumlah partikel yang teradsorpsi dan tekanan pada kesetimbangan atau konsentrasi dikenal sebagai adsorpsi isoterm. Berdasarkan IUPAC adsorpsi isoterm diklasifikasikan menjadi enam macam tipe (Rouquerol dkk., 1999). Pada grafik tipe I menunjukkan untuk padatan mikropori, sedangkan grafik tipe II dan III menunjukkan padatan non pori atau makropori yang memungkinkan adsorpsi monolayer-multilayer yang tak terbatas pada tinggi  $P/P_0$ . Grafik tipe IV menunjukkan untuk padatan mesopori, dimana terdapat *loop* histeresis yang menggambarkan peningkatan penambahan adsorben dan penghapusan oleh kapiler kondensasi dalam mesopori. Grafik tipe V ini sama seperti tipe IV adanya *loop* histeresis yang disatukan dengan mekanisme pengosongan pori, seperti isoterm tipe III interaksi yang ditunjukkan antara adsorben dan adsorbat lemah. Pada grafik tipe VI menunjukkan grafik untuk padatan tidak berpori yang memiliki permukaan yang seragam. Klasifikasi adsorpsi isoterm oleh IUPAC ditunjukkan oleh Gambar 7 dibawah ini.



Gambar 7. Klasifikasi Isoterm Adsorpsi IUPAC



Analisis menggunakan adsorpsi/desorpsi bertujuan untuk mengetahui porositas dan struktur pori dari suatu material. Untuk menentukan luas permukaan material maka digunakan perhitungan Brunauer, Emmet, dan Teller (BET), sedangkan untuk distribusi ukuran pori maka digunakan perhitungan DFT dan Barret, Joyner, dan Halenda (BJH).

#### A.5.2 SEM-EDX (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy)

*Scanning Electron Microscopy* (SEM) merupakan suatu instrumen mikroskop yang menggunakan elektron berenergi tinggi sebagai pengganti dari cahaya untuk menghasilkan berbagai sinyal pada permukaan spesimen padat. Prinsip kerja dari SEM yaitu ketika elektron dari katoda ditembakkan ke arah sampel maka akan terjadi interaksi antara elektron dan sampel yang mengakibatkan elektron kehilangan sejumlah energinya. Akibatnya terjadi pemantulan dan emisi elektron yang terdeteksi oleh detektor yang divisualisasikan sebagai gambar morfologi dari sampel. Tipe-tipe sinyal yang dihasilkan berupa *Secondary Electron (SE)*, *Backscattered Electron (BSE)*, *Electron Backscattered Distortion (ESBD)*, dan sinar-X. Elektron sekunder dan BSE biasanya digunakan untuk pencitraan sampel. Elektron sekunder menunjukkan morfologi dan topografi dalam sampel, sedangkan BSE untuk mengilustrasikan komposisi dalam sampel

Energi spesifik sinar-X yang dipancarkan oleh setiap atom dalam senyawa dapat dideteksi dengan Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX). EDX adalah suatu teknik analisis yang digunakan untuk menganalisis unsur-unsur atau mengkarakterisasi kandungan unsur kimia dari suatu sampel. EDX menganalisis emisi sinar X oleh unsur dalam partikel. Untuk mengetahui unsur dalam sampel, maka dengan menembakkan sinar-X pada posisi yang ingin diketahui komposisinya. Maka setelah ditembakkan pada posisi yang diinginkan, akan muncul puncak-puncak tertentu yang mewakili suatu unsur yang terkandung. Dengan EDX dapat juga membuat elemental mapping (pemetaan elemen) dengan memberikan warna yang berbeda-beda dari masing-masing elemen pada permukaan bahan. Teknik analisis SEM-EDX ini dapat

digunakan analisis secara kuantitatif dari persentase masing-masing elemen unsur yang terkandung dalam sampel yang diuji.

### A.5.3 Fourier Transform Infrared (FTIR)

Bila radiasi infra merah dilewatkan melalui suatu cuplikan, maka molekul molekulnya dapat menyerap (mengabsorpsi) energi dan terjadilah transisi diantara tingkat vibrasi (*ground state*) dan tingkat vibrasi (tereksitasi). FTIR merupakan instrumen yang digunakan untuk mengidentifikasi senyawa yang didasarkan oleh vibrasi dari atom dalam molekul. Sebuah spektrum infra merah biasanya dihasilkan dengan melewati sinar infra merah melalui sampel sehingga dapat ditentukan fraksi radiasi yang diserap pada energi tertentu. Energi tersebut akan muncul berupa puncak-puncak spektrum sesuai dengan frekuensi getaran molekul. Pada instrumen FTIR beberapa radiasi infra merah yang diserap oleh sampel dan sebagian ditransmisikan. Spektrum-spektrum yang dihasilkan tersebut mewakili penyerapan dan transmisi molekuler yang kemudian menciptakan sidik jari molekuler sampel.

Molekul-molekul poliatom memperlihatkan dua jenis vibrasi molekul, yaitu *stretching* dan *bending*. Vibrasi ikatan yang melibatkan hidrogen sangat berarti, karena atom-atom dengan massa rendah cenderung lebih mudah bergerak daripada atom dengan massa lebih tinggi. Makin rumit struktur molekul, semakin banyak bentuk-bentuk vibrasi yang mungkin terjadi. Akibatnya, kita akan melihat banyak pita-pita absorpsi yang diperoleh pada spektrum infra merah, bahkan lebih rumit lagi bergantung pada molekul dan kepekaan instrumen. Spektroskopi *Fourier-Transform Infrared* (FTIR) pada dasarnya merupakan interferensi radiasi antara dua berkas untuk menghasilkan interferogram. Radiasi yang muncul dari sumber dilewatkan interferometer ke sampel sebelum sampai ke detektor. Setelah amplifikasi sinyal, data dikonversi ke bentuk digital oleh *analog converter* dan dipindahkan ke komputer sehingga muncul spektrum-spektrum senyawa yang dianalisis.

Setelah impregnasi karbon aktif dengan sulfur, terjadi variasi ikatan sulfur yang terjadi di permukaan karbon aktif. Ikatan karbon-Sulfur tergantung pada struktur dari karbon. Oleh karena itu, perlu ditentukan ikatan sulfur yang terbentuk agar dapat diprediksi reaksi yang mungkin terjadi antara sulfur dan merkuri. Ada dua jenis sulfur: Sebagai bulk (Tidak dapat terdeteksi oleh FTIR) dan di permukaan karbon aktif (Teridentifikasi oleh FTIR). Teknik Infra Merah digunakan untuk mempelajari ikatan sulfur di permukaan adsorben. Keunggulan dari FTIR adalah kemampuannya untuk mengidentifikasi vibrasi dipolar antara 2 atom yang berbeda dalam molekul. Karenanya, spektra dapat ditemukan di permukaan karbon aktif pada kelompok S-H, S-O, dan S-C. Disisi lain, Ikatan sulfur elemental S-S tidak dapat teridentifikasi dengan FTIR karena tidak adanya vibrasi di-polar.

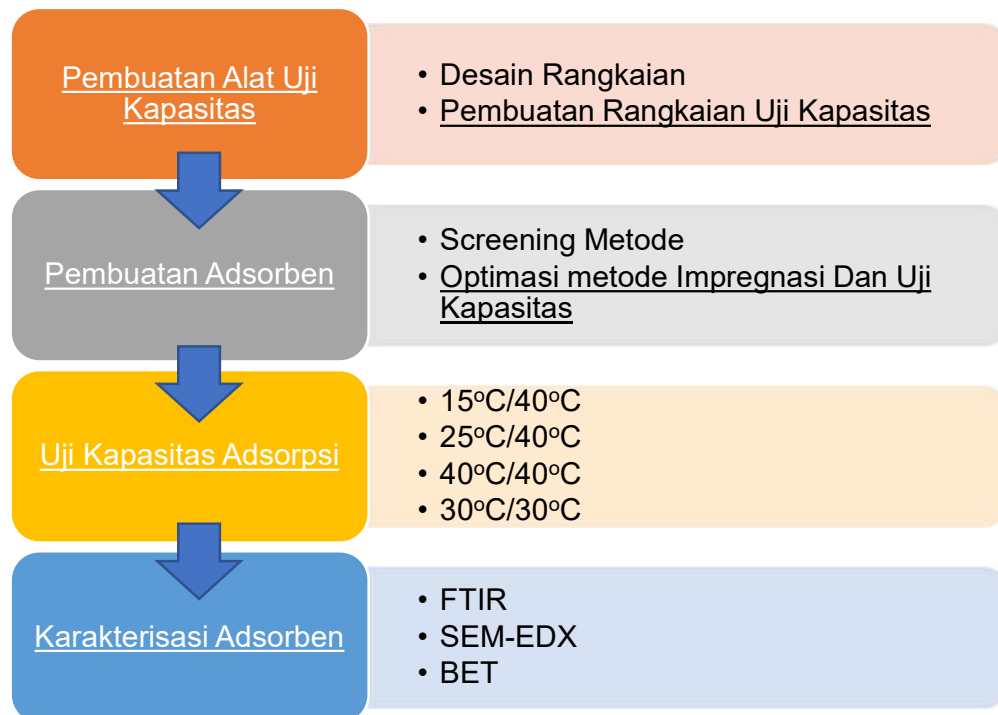
## B Metodologi

### B.1 Overview

Salah satu parameter yang menjadi pertimbangan dalam pembuatan adsorben merkuri adalah kapasitas adsorpsi merkuri. Semakin besar kapasitas adsorpsi tentunya akan semakin baik karena berat adsorben yang dibutuhkan semakin sedikit. Karenanya, kapasitas adsorpsi merkuri menjadi pertimbangan awal dalam pemilihan metode pembuatan adsorben.

Penelitian ini dibagi menjadi 4 tahap, yaitu pembuatan alat uji kapasitas, pembuatan dan optimasi metode pembuatan adsorben, Uji kapasitas adsorpsi adsorben pada beberapa konsentrasi hidrokarbon berat, dan karakterisasi adsorben.

Secara umum, metodologi penelitian dilakukan seperti pada gambar 8 dibawah ini.



Gambar 8 Tahapan Penelitian Adsorben Merkuri Untuk Industri Migas

## B.2 Rancang Bangun Alat Uji Kapasitas Adsorpsi

Tujuan dari kegiatan ini adalah untuk mendesain alat uji adsorben merkuri yang dapat menghasilkan gas yang mengandung merkuri relatif besar. Alat uji ini digunakan pada tahap optimasi metode pembuatan adsorben. Gas dalam alat uji juga dapat ditambahkan air dan hidrokarbon berat dengan suhu saturasi yang terukur sehingga dapat diketahui batasan hidrokarbon berat yang dapat diterima.

## B.3 Pembuatan dan Optimasi Metode Pembuatan Adsorben

### B.3.1 Persiapan Bahan Baku

Bahan baku karbon aktif untuk penelitian ini memiliki ukuran 4x10 mesh atau 2-4.8 mm. Untuk dapat diuji secara laboratorium, ukuran ini relatif besar. Pada penelitian ini, karbon aktif digerus dan diayak hingga ukuran 60-80 mesh. Karbon aktif kemudian dicuci dengan air hangat dan dikeringkan 105°C selama 12 jam untuk menghilangkan debu yang ada di permukaan karbon aktif. Debu di permukaan karbon aktif dapat terbawa gas saat pengujian dan mengotori sistem pengujian.

### B.3.2 AC-ZnCl<sub>2</sub>

Metode pembuatan karbon aktif yang diimpregnasi ZnCl<sub>2</sub> adalah dengan menimbang serbuk karbon ditimbang sebanyak 100 g, kemudian dikeringkan dalam oven dengan suhu 90°C selama ± 1 jam dan dilanjutkan dengan tanur hingga mencapai suhu 600°C dengan dialiri gas N<sub>2</sub> laju aliran sebesar 150 cm<sup>3</sup>/menit STP. Selama proses berlangsung laju panas dan aliran nitrogen dijaga konstan. Suhu tanur dipertahankan pada 600°C selama 1 jam sebelum didinginkan dengan aliran N<sub>2</sub>. Setelah dingin, sampel dicuci dengan larutan HCl 0.5 N, air hangat kemudian air dingin suhu ruang untuk menghilangkan sisa residu organik dan mineral. Pencucian dengan akuades dilanjutkan sampai air pembilas netral (pH sekitar 7). Aktivasi secara kimia dengan merendam serbuk karbon tempurung kelapa dalam larutan ZnCl<sub>2</sub> 5% (w/v) selama ± 24 jam. Pengeringan dilakukan

menggunakan wadah cawan penguap didalam oven selama  $\pm$  8 jam pada suhu 100 °C dan kemudian dimasukkan dalam desikator.

### B.3.3 AC-S

Prosedur pembuatan karbon aktif yang diimpregnasi sulfur adalah dengan menimbang 10 g karbon aktif dengan penambahan sulfur dengan perbandingan karbon: sulfur 3:3. Karbon aktif Dipanaskan dalam tubular furnace dengan kenaikan 5°C/menit dengan aliran N<sub>2</sub> sebesar 500 ml/min hingga suhu 300°C. Setelah 300°C, aliran gas N<sub>2</sub> kemudian dimatikan. Pemanasan kemudian dilanjutkan hingga suhu 500°C dan ditahan selama 1 jam. Suhu diturunkan bertahap hingga suhu ambien.

### B.3.4 AC-CuS (I)

Metode pembuatan adsorben adalah dengan mencuci karbon aktif dengan aquades panas 2-3 kali untuk membersihkan permukaan dan bagian pori karbon aktif. 25 ml CuCl<sub>2</sub> 0.1 M ditambahkan 5 gram karbon aktif. Larutan distirrer 1-2 jam hingga larutan homogen.

Kemudian disiapkan larutan 0.2 M Na<sub>2</sub>S, tambahkan larutan ini kedalam larutan sebelumnya tetes demi tetes. Larutan akhir kemudian distirrer 3-4 jam dengan hotplate pada suhu 100°C. Karbon aktif dicuci 10-15 kali dan dipanaskan pada suhu 100°C selama 12 jam

### B.3.5 AC-CuS (II)

Pembuatan adsorben karbon aktif yang diimpregnasi kering dengan tembaga sulfida dilakukan melalui dua tahap yaitu impregnasi karbon aktif dengan tembaga dan dilanjutkan dengan impregnasi sulfur. Prosedur impregnasi tembaga adalah dengan menimbang 25gram karbon aktif dalam Erlenmeyer dan ditambahkan larutan CuCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O 100 ml. Larutan distirrer dan dipanaskan pada suhu 120°C hingga kering. Karbon aktif yang telah dipanaskan, dibilasi aquades 5-10 kali dan dikeringkan kembali pada suhu 110°C selama 12 jam. Tahap selanjutnya adalah dengan melakukan

impregnasi seperti karbon aktif yang diimpregnasi dengan sulfur dengan perbandingan rasio karbon sulfur 6:3 dan suhu 500°C selama 1 jam.

#### B.3.6 AC-HCl 10%

Metode ini mengacu pada (H. Jang et al., 2017). Dengan metode ini, diharapkan bisa didapat metode pembuatan adsorben alternatif yang baik. Metode pembuatan adsorben adalah dengan melarutkan 10 gram karbon aktif dengan larutan HCl dan CS<sub>2</sub> 5% dan distirer selama 2 jam dengan suhu 75°C. Setelah itu, larutan kemudian dikeringkan selama 6 jam dengan suhu 105°C.

#### B.3.7 AC-CS<sub>2</sub> 1%

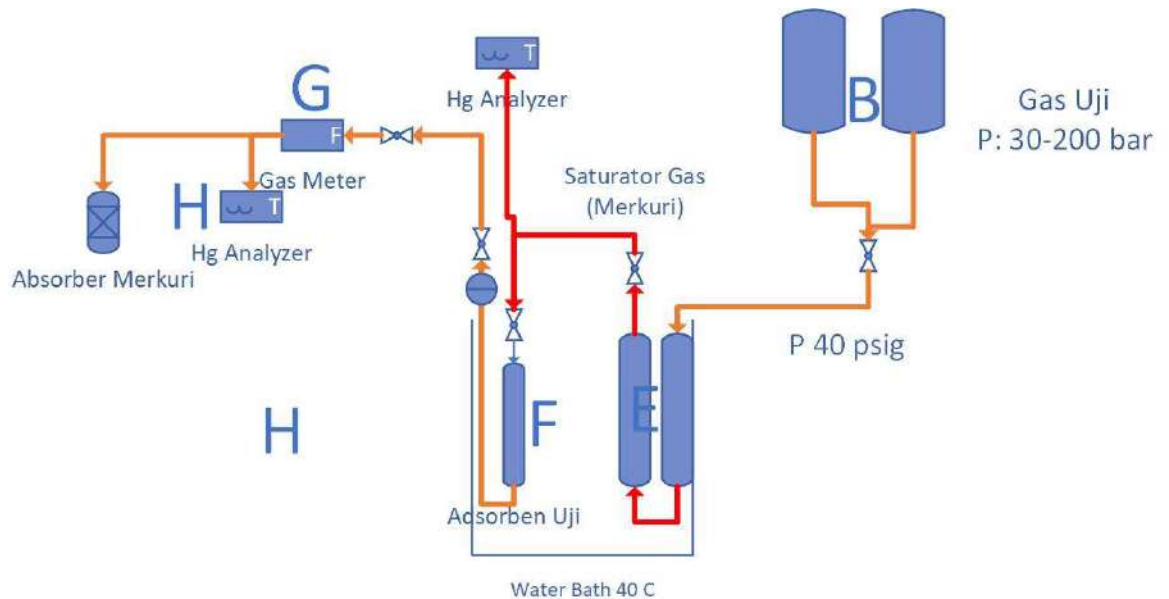
Metode ini mengacu pada (H. Jang et al., 2017). Dengan metode ini, diharapkan bisa didapat metode pembuatan adsorben alternatif yang baik. Metode pembuatan adsorben adalah dengan melarutkan 10 gram karbon aktif dengan larutan HCl dan CS<sub>2</sub> 5% dan distirer selama 2 jam dengan suhu 75°C. Setelah itu, larutan kemudian dikeringkan selama 6 jam dengan suhu 105°C.

### B.4 Uji kapasitas awal

Uji kapasitas awal dilakukan untuk seleksi awal adsorben (*Screening*) yang akan diuji selanjutnya. Pada uji kapasitas awal ini, karbon aktif yang dihasilkan 6 metode pembuatan diuji kapasitas adsorpsi merkuri.

Berdasarkan hasil uji kapasitas awal, diketahui ada 4 metode pembuatan adsorben yang menghasilkan adsorben yang memiliki kapasitas diatas 10 mg Hg/g adsorben, yaitu AC-S, AC-CuS(I), AC-CuS(II), dan AC-ZnCl<sub>2</sub>. Keempat metode tersebut dioptimasi dan diuji kapasitas adsorpsinya sebagai berikut. Variasi metode impregnasi sulfur dilakukan dengan memvariasikan suhu impregnasi 450°C, 475°C, 500°C, 525 °C, 550°C dengan perbandingan karbon aktif:sulfur 3:1, 3:2, dan 3:3. Metode diimpregnasi CuS impregnasi basah memvariasikan berat CuCl 1.2, 2.4, dan 3.6 gram. Sedangkan berat NaS divariasikan 1.5, 3, dan 4.5 gram.

Metode diimpregnasi CuS impregnasi kering berat CuCl 3.4 gram, berat sulfur 0.9, 1.5, dan 3 gram, dan suhu impregnasi 450°C, 500°C, dan 550°C. Metode impregnasi ZnCl<sub>2</sub> memvariasikan konsentrasi impregnasi 6, 7, 8 dan 9% ZnCl<sub>2</sub>.



Gambar 9. Aliran Gas pada Uji Kapasitas Awal Adsorben

Tahap screening dan optimasi metode hanya memerlukan gas kering (tampa penambahan air dan pentana). Pola aliran gas ditampilkan pada gambar 9 dimana gas dari sumber(B) diturunkan tekanannya menjadi 40 psig dan dialirkan ke tabung yang berisi merkuri(E). Dalam tabung tersebut, merkuri yang ada dalam tabung menguap dan terbawa aliran gas yang mengalir ke adsorben yang diuji kapasitasnya(F). Kapasitas adsorben dalam menyerap merkuri merupakan fungsi dari konsentrasi merkuri inlet, outlet, dan volume gas yang mengalir.

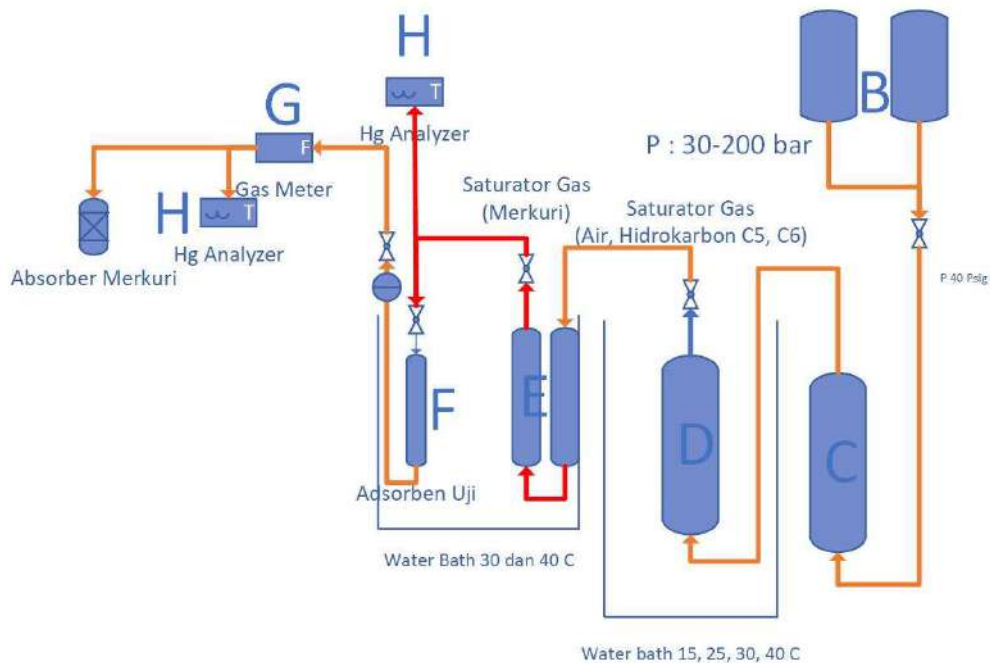
#### B.5 Uji Kapasitas Adsorpsi Hg dengan Gas Dengan Hidrokarbon Berat dan Air

Empat (4) jenis metode pembuatan aktivasi karbon aktif yang dibuat dengan metode yang telah dioptimasi pada tahap sebelumnya, kemudian



diuji kapasitasnya dengan mengalirkan gas dalam saturator air dan pentana/heksana sebelum melewati saturator merkuri. Pentana digunakan untuk saturasi gas 15°C, 25°C, dan 30°C. Heksana digunakan untuk saturasi gas pada suhu 40°C. Temperatur saturasi dan uji pada tahap ini adalah sebagai berikut

- Titik embun gas 25°C, 15°C lebih rendah dibandingkan suhu operasi adsorpsi 40°C
- Titik embun gas 15°C, 25°C lebih rendah dibandingkan suhu operasi adsorpsi 40°C
- Titik embun gas sama dengan suhu operasi adsorpsi 30°C
- Titik embun gas sama dengan suhu operasi adsorpsi 40°C



Gambar 10. Uji Kapasitas Adsorben dengan Gas Basah

## B.6 Karakterisasi Adsorben

Analisis menggunakan adsorpsi/desorpsi bertujuan untuk mengetahui porositas dan struktur pori dari suatu material. Untuk menentukan luas permukaan material maka digunakan perhitungan Brunauer, Emmet, dan Teller (BET), sedangkan untuk distribusi ukuran pori maka digunakan

perhitungan DFT dan Barret, Joyner, dan Halenda (BJH). Pengukuran Luas Permukaan dan distribusi pori menggunakan alat Quantachrome Nova 4200e di Pusat Penelitian Fisika LIPI.

Metoda analisis yang digunakan dalam pekerjaan ini adalah Scanning Electron Microscope (SEM) yang dilengkapi dengan Energy Dispersive by X-Ray Spectrometry (EDX). Preparasi diawali dengan membersihkan perconto menggunakan pelarut organik dan dikeringkan secara ultrasonik, kemudian dipatahkan untuk membuat permukaan rata dan bersih. Perconto selanjutnya dilekatkan diatas Cu stub berukuran 10 mm dan dibersihkan dengan semprotan udara untuk menghilangkan debu-debu dan unsur pengotor lainnya. Tahapan selanjutnya perconto dilapisi secara elektrostatis dengan karbon atau gold-palladium agar bersifat konduktif terhadap elektron. Preparat siap untuk dianalisis dengan alat SEM tipe JSM-6390-LA yang dilengkapi dengan sistem perekaman gambar secara digital.

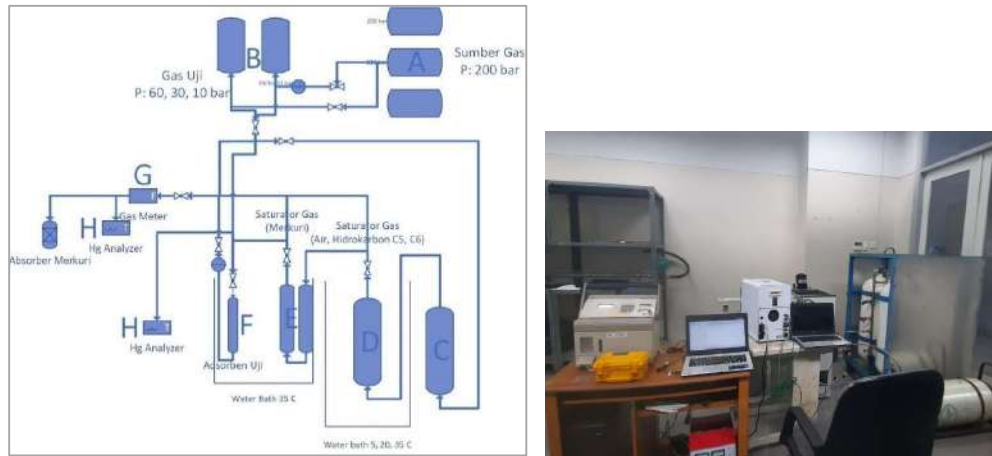
Peralatan SEM tipe JSM-6390-LA dilengkapi dengan piranti EDX yang berfungsi untuk mengidentifikasi jenis mineral. Analisis SEM-EDX difokuskan untuk mengetahui distribusi mineral autijenik, pertumbuhan dan perkembangan sistem pori. Kehadiran mineral autijenik diamati secara detil dengan memperbesar fokus gambar pada saat pengamatan dan dilanjutkan dengan analisis EDX untuk mengetahui unsur/ elemen yang terkandung dalam mineral. Objek mineral yang teramati dilakukan perekaman gambar/ foto SEM serta didukung dengan penjelasan unsur penyusun mineralnya.

Spektrum FTIR karbon aktif dianalisis menggunakan instrument FTIR Thermo Nicolet 380 dengan teknik penanganan sampel menggunakan kompartmen attenuated total reflectance (ATR) yang dilengkapi dengan lempeng kristal ZnSe. Sampel karbon aktif ditempatkan pada kristal ATR dan pengukuran dilakukan pada 32 scan dengan daya pisah (resolusi) 16  $\text{cm}^{-1}$  pada bilangan gelombang 600 – 4000  $\text{cm}^{-1}$ . Spektrum yang dihasilkan dibaca menggunakan perangkat lunak Nicolet Omnic.

## C Data dan Hasil Kegiatan

### C.1 Rancang Bangun Alat Uji Kapasitas Adsorben

Rangkaian uji kapasitas terdiri atas sumber gas, regulator gas, saturator gas, saturator merkuri, gas meter, dan 2 mercury analyzer (NIC WA4 dan WA5 Mercury Analyzer).



Gambar 11. Desain Rangkaian Adsorpsi (kiri), Peralatan Uji Kapasitas yang Telah Dirangkai (kanan)

Sumber gas terdiri atas 4 tabung CNG dengan ukuran 75 L. 4 tabung diisi secara bergantian untuk menjamin bahwa aliran gas selama pengujian terus tersedia. Gas kemudian diturunkan tekanannya dengan menggunakan regulator sehingga didapat tekanan gas 40 psig.

Gas kemudian dijenuhkan dengan mercury saturator. Tujuannya, untuk menambah konsentrasi merkuri dalam gas dari  $5 \text{ ug/m}^3$  menjadi  $3000\text{-}10000 \text{ ug/m}^3$ . Penambahan ini akan mengurangi waktu pengujian kapasitas adsorpsi merkuri secara signifikan.



Gambar 12. Vessel uji adsorben

Gas kemudian dialirkan ke adsorben Hg. Merkuri yang ada dalam gas bumi teradsorpsi. Sebagian kecil Hg akan melewati adsorben. Di awal proses adsorpsi, adsorben di inlet adsorben akan jenuh terlebih dahulu. Semakin lama, adsorben yang jenuh bergeser ke bagian outlet dan sebagian Hg dalam gas tidak sempat teradsorpsi. Pengujian kapasitas adsorpsi dihentikan Ketika konsentrasi gas yang melewati adsorben sudah lebih besar dari  $1000 \text{ ug/m}^3$ .

Karena adanya kondensasi kapiler karena hidrokarbon berat dan mempengaruhi kapasitas adsorpsi adsorben dengan bahan dasar karbon aktif, maka pertimbangan selanjutnya adalah kemampuan adsorpsi merkuri pada kondisi gas dengan hidrokarbon berat yang dinyatakan dalam titik embun hidrokarbon dan air. Titik embun hidrokarbon dan air yang rendah menunjukkan gas tersebut lebih sedikit memiliki fraksi hidrokarbon berat dibandingkan gas dengan titik embun yang tinggi. Hidrokarbon berat yang terkondensasi dapat menyebabkan turunnya kapasitas adsorpsi merkuri karena hidrokarbon berat terkondensasi di pori karbon aktif dan menyebabkan tertutupnya gugus aktif oleh hidrokarbon berat.

Untuk uji kapasitas akhir, dimana metode pembuatan adsorben telah dioptimasi, gas dialirkan ke saturator gas yang berisi air dan pentana yang suhunya divariasikan  $15^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$ , dan  $40^\circ\text{C}$ . Tujuannya, untuk menjenuhkan gas dengan air dan pentana/heksana pada suhu pengembunannya.

Tabel 11. 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	Suhu Uji	40°C
8	Tekanan Uji	40 psig

### C.2 Hasil *Screening* Metode Pembuatan

Hasil *screening* uji adsorpsi merkuri pada karbon aktif yang diimpregnasi dengan berbagai metode pembuatan dan dua jenis karbon aktif (impor dan lokal), dipaparkan pada tabel 12.

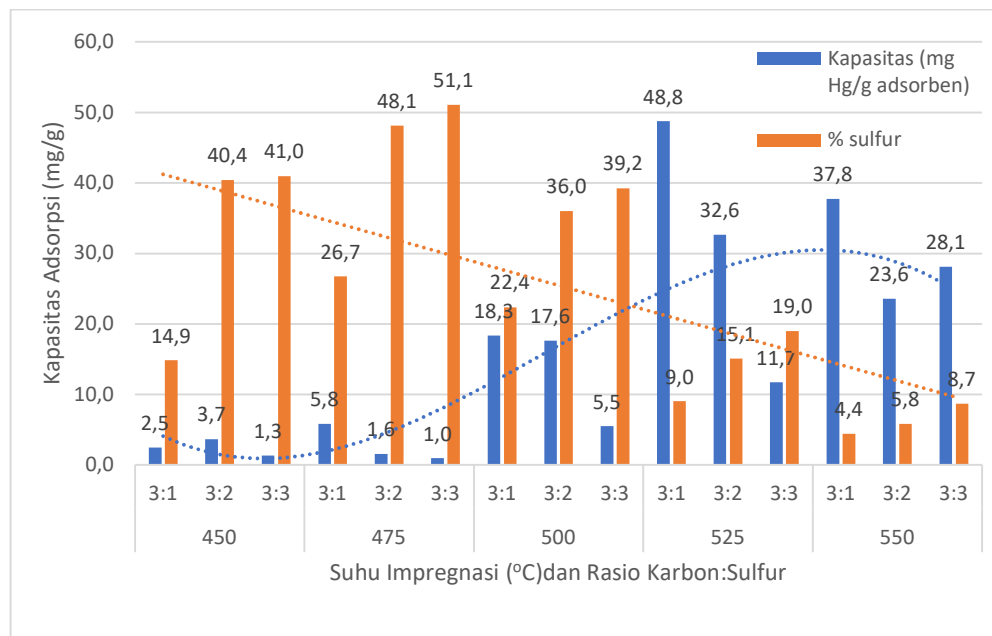
Tabel 12. *Screening* Awal Metode Pembuatan

No	Sumber	Impregnan	Kapasitas (mg/g)
1	AC Impor	CuS	>44.17
2		CuS II	>21.35
3		S	0.23
4		ZnCl <sub>2</sub>	7.28
5		CS <sub>2</sub>	0.13
6		HCl	4.99
7	AC Lokal	CuS	4.17
8		CuS II	0.06
9		S	>45.56
10		ZnCl <sub>2</sub>	17.7
11		CS <sub>2</sub>	0.16
12		HCl	8.21

Dari tabel 12 diketahui bahwa kapasitas adsorpsi Hg terbesar berbeda antara bahan baku karbon aktif impor dan lokal. Kapasitas adsorpsi dengan bahan baku lokal terbesar didapatkan dengan metode impregnasi menggunakan sulfur dan ZnCl<sub>2</sub>. Sedangkan dengan bahan baku karbon aktif impor, kapasitas adsorpsi tertinggi didapatkan untuk karbon aktif yang diimpregnasi dengan CuS dan CuS(II). Perbedaan tersebut dapat disebabkan oleh karakteristik bahan baku yang berbeda antara karbon aktif impor dan lokal. Karena fokus penelitian ini adalah pembuatan adsorben dengan bahan baku lokal, maka metode impregnasi dengan CuS dan CuS(II) akan tetap dilanjutkan pada tahap optimasi. Harapannya, pada saat optimasi dapat terjadi perubahan struktur karbon aktif dan didapatkan kapasitas adsorpsi yang optimal.

### C.3 Variasi Metode AC-S

Gambar 13 menampilkan hasil optimasi metode pembuatan AC-S dengan variable suhu impregnasi dan perbandingan karbon:sulfur.



Gambar 13. Hasil Optimasi Metode Pembuatan AC-S

Seperti dapat terlihat pada grafik diatas, proses impregnasi sulfur pada metode ini merupakan fungsi dari suhu impregnasi dan perbandingan karbon:sulfur. Semakin besar perbandingan rasio Sulfur terhadap karbon aktif pada suhu impregnasi yang sama, semakin banyak sulfur yang terimpregnasi di permukaan karbon aktif. Semakin tinggi suhu impregnasi, semakin sedikit sulfur yang terimpregnasi karena pada suhu tinggi sulfur lebih cepat menguap dan keluar dari wadah impregnasi.

Dari grafik juga dapat terlihat bahwa semakin banyak sulfur terimpregnasi tidak menjamin peningkatan kapasitas adsorpsi Hg. Pada suhu impregnasi 450°C, kapasitas adsorpsi justru paling rendah. Kapasitas adsorpsi juga tidak menunjukkan peningkatan ketika rasio karbon:sulfur naik dari 3:1 menjadi 3:3. Hal ini dapat disebabkan karena sulfur dalam jumlah berlebih justru menutup pori mikro, menurunkan luas permukaan karbon aktif, dan menurunkan area reaksi adsorpsi.

Ketika suhu impregnasi naik dari 450°C hingga 525°C, kapasitas adsorpsi cenderung naik. Hal ini dapat disebabkan karena mikropori yang sebelumnya tertutup oleh sulfur terbuka dan sulfur terdistribusi di seluruh permukaan pori adsorben. Pada kenaikan suhu 525°C menjadi 550°C, penurunan kapasitas dapat disebabkan karena penurunan konsentrasi gugus aktif sulfur di permukaan adsorben. Berdasarkan data pada grafik diatas, maka metode pembuatan adsorben AC-S dengan suhu impregnasi 525°C, waktu pemanasan 1 jam, dan rasio karbon:sulfur 3:1, 3:2, dan 3:3 akan diuji pada tahap selanjutnya.

#### C.4 Variasi Metode AC-ZnCl<sub>2</sub>

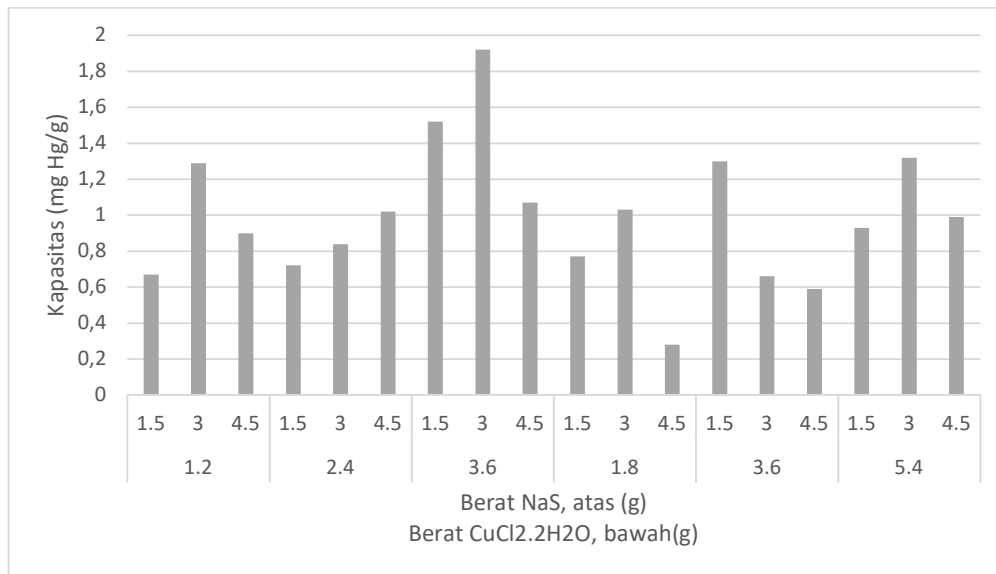
Tabel 13 menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi meningkat seiring meningkatnya impregnasi ZnCl<sub>2</sub> hingga maksimum 7% dan belum mengalami penurunan sehingga dapat disimpulkan bahwa kapasitas adsorpsi Hg belum mencapai titik optimum. Konsentrasi impregnasi akan ditingkatkan pada tahap uji kapasitas adsorpsi lanjutan.

Tabel 13. Hasil Optimasi Metode Pembuatan Karbon Aktif Impregnasi ZnCl<sub>2</sub>

No	% ZnCl <sub>2</sub>	Kapasitas (mg Hg/g)
1	5%	3.54
2	6%	4.55
3	7%	5.17

#### C.5 Variasi Metode AC-CuS Impregnasi dalam Larutan NaS

Dari hasil optimasi metode pembuatan, seperti yang ditampilkan pada Gambar 14, diketahui bahwa jika dibandingkan dengan adsorben AC-S, karbon aktif yang diimpregnasi dengan CuS memiliki kapasitas adsorpsi yang relatif rendah. Kapasitas adsorpsi juga tidak dapat mencapai kapasitas adsorpsi diatas 20 mg/g seperti yang terjadi pada karbon aktif impor yang diimpregnasi dengan CuS pada tahap *screening* atau penelitian lain. Perlu penelitian lanjutan untuk mengetahui penyebab kecilnya kapasitas adsorpsi Hg di adsorben yang dibuat.



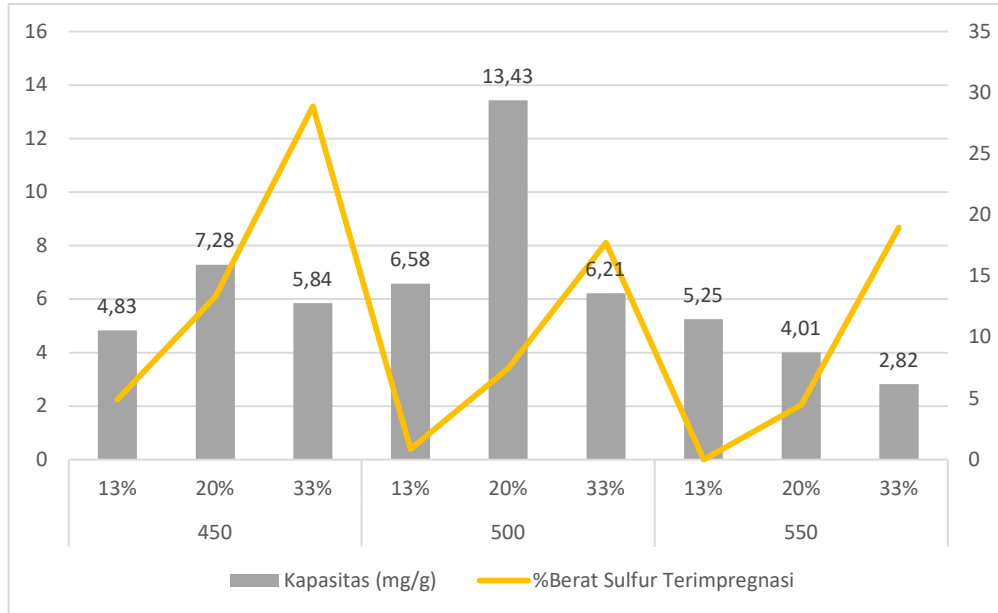
Gambar 14. Kapasitas Adsorpsi AC-CuS dengan variasi NaS dan CuCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O

#### C.6 Variasi Metode AC-CuS Impregnasi dengan Sulfur

Dari hasil optimasi adsorpsi diketahui bahwa adsorben yang diimpregnasi dengan CuS memiliki kapasitas tertinggi pada suhu



impregnasi 500°C. Kapasitas adsorpsi turun seiring meningkatnya suhu impregnasi, seperti yang terlihat pada gambar 15 berikut.



Gambar 15. Kapasitas Adsorpsi AC-CuS(II)

### C.7 Hasil Uji Kapasitas Adsorpsi Merkuri dengan Saturasi Pentana/Heksana

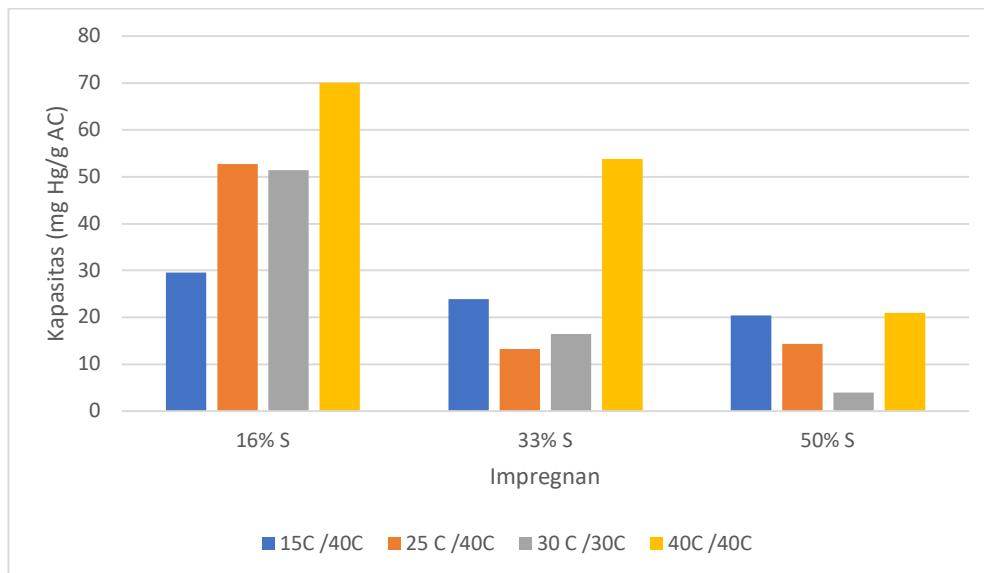
Tabel 14 merupakan hasil uji kapasitas adsorpsi adsorben dengan gas yang telah dijenuhkan air dan pentana untuk Dew Point 15°C, 25°C, dan 30°C. Untuk suhu penjenuhan 40°C, gas dijenuhkan dengan air dan heksana mendidih pada suhu 69°C, sehingga tidak langsung habis ketika diuji pada suhu 40°C.

Tabel 14. Hasil Optimasi Metode Pembuatan Karbon Aktif CuS Impregnasi Kering

No.	Impregnan	%S	Dew Point Hydrocarbon dan Air / Suhu Uji Kapasitas Adsorben				Rata-rata	SSA (m <sup>2</sup> /g)	Pore volume (cc/g)
			15°C /40°C*	25°C /40°C*	40°C /40°C**	30°C /30°C*			
1	16% S	5	29.6	52.7	70.05	51.4	50.9	510,3	0,4648
2	33% S	13.5	23.96	13.3	53.85	16.5	25.0	436,4	0,4796
3	50% S	21.3	20.4	14.4	20.95	4	14.9	308,3	0,3762
4	Cu+13% S	5.7	14.9	10.6	20.21	41.1	21.7	634,2	0,6418
5	Cu+20% S	13.2	29.5	18.6	59.81	13.8	30.4	434,9	0,3097
6	Cu+33%S	30.6	8.71	9.6	9.09	12.7	9.0	260,6	0,3709
7	CuS		2.5	27.1	7.29	11.6	12.1	728,3	0,6874
8	ZnCl <sub>2</sub> 6%		4.7	2.8	10.23	10.61	5.5	456,4	0,2981
9	ZnCl <sub>2</sub> 7%		5	3.2	9.32	4.4	4.9	439,8	0,4238
10	ZnCl <sub>2</sub> 8%		5.8	8	5.81	5.93	5.3	306,8	0,3825
11	ZnCl <sub>2</sub> 9%		5.6	13.3	4.08	1.2	6.0	318,0	0,2350
	Blank							894.2	0,7860
	Konsentrasi Merkuri Inlet Adsorben (ug/m <sup>3</sup> )		4000-10.000	5700-10.000	4500-10.000	1700-3700			
	Kapasitas Adsorpsi >20 mg Hg/g Adsorben								

\*Saturasi menggunakan Pentana dan air

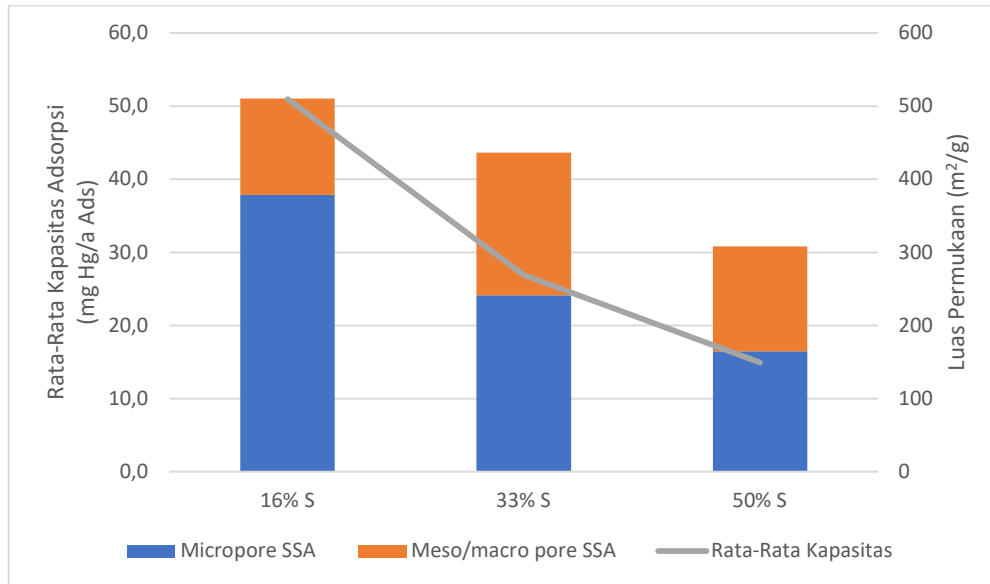
\*\*Saturasi dengan Heksana dan air



Gambar 16. Kapasitas Adsorpsi AC-S dengan Variasi Berat Impregnan dan Suhu Saturasi Gas

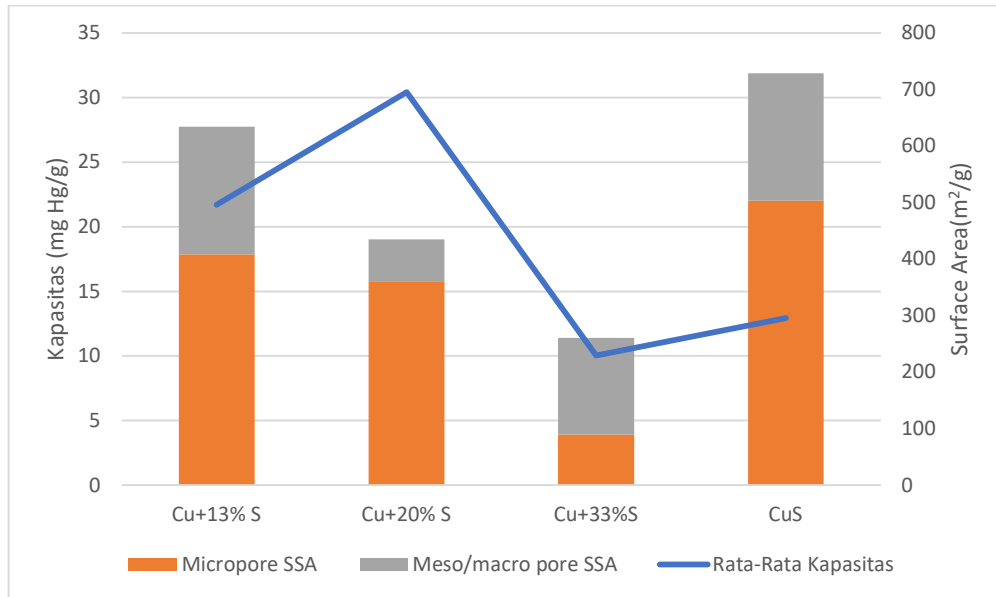
Dari grafik diatas, tidak ada kecenderungan yang konsisten pengaruh kondisi gas terhadap kapasitas adsorpsi merkuri karbon aktif. AC-S 16% menunjukkan peningkatan kapasitas seiring peningkatan suhu saturasi gas. AC-S 33% dan 50% tidak menunjukkan adanya trend yang jelas yang dapat disebabkan karena fluktuasi konsentrasi merkuri yang mencapai 2 kali konsentrasi terendahnya. Adsorben yang melewati gas dengan konsentrasi merkuri besar akan lebih cepat jenuh dibandingkan adsorben yang melewati gas dengan konsentrasi merkuri yang rendah.

Peningkatan kapasitas adsorpsi AC-S 16% saat gas jenuh menunjukkan tidak terjadinya kondensasi kapiler hidrokarbon dan air di dalam pori karbon aktif. Seperti dijelaskan sebelumnya bahwa penggunaan tekanan rendah selama pengujian dilakukan agar untuk meningkatkan konsentrasi merkuri dalam gas sehingga waktu pengujian tiap adsorben dapat dilakukan dengan cepat (maksimum 4 hari tiap adsorben). Tekanan yang relatif rendah (40 psig) dibandingkan tekanan operasi pengolahan gas alam (200-1000 psig) dapat menyebabkan kondensasi kapiler belum terjadi. Karenanya, pada tahun 2021, perlu untuk dilakukan penelitian untuk mencoba pengaruh hidrokarbon berat dan air pada tekanan yang lebih tinggi. Meskipun demikian, hasil pengujian diatas sudah cukup untuk menggambarkan kapasitas adsorpsi adsorben AC-S dibandingkan metode lainnya.



Gambar 17. Kapasitas Adsorpsi AC-S Rata-Rata dengan, Luas Area Mikro dan Meso/Makropori

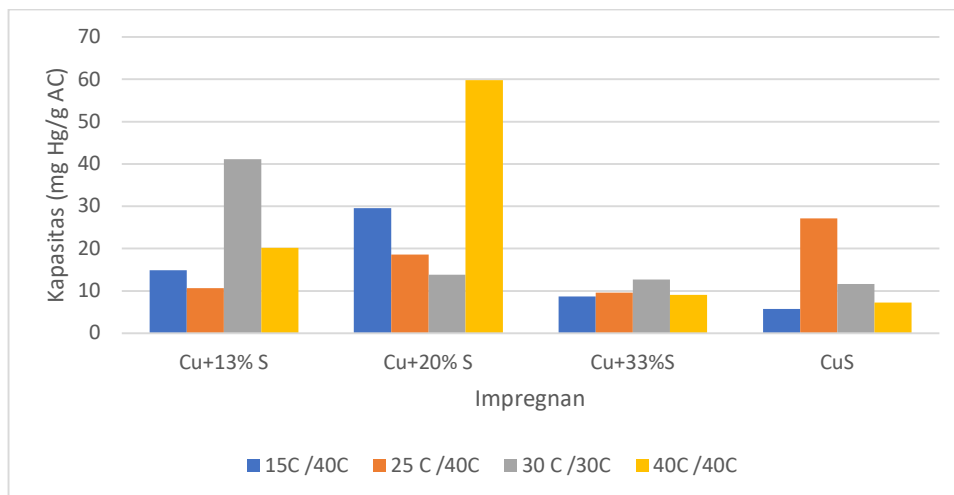
Secara rata-rata, kapasitas adsorpsi karbon aktif yang diimpregnasi sulfur turun seiring dengan meningkatnya sulfur yang diimpregnasikan. Penurunan disebabkan tertutupnya pori mikro karbon aktif dengan sulfur sehingga luas permukaan kontak adsorben turun seperti terlihat pada gambar 17. Secara visual, luas permukaan pori meso dan makro tetap sama. Dari data diatas juga dapat terlihat bahwa belum didapat kapasitas optimum kapasitas karbon aktif. Jika berat impregnan diturunkan, kapasitas mungkin saja naik hingga tercapai tahap dimana konsentrasi sulfur tidak dapat menutupi seluruh area permukaan karbon aktif. Pada tahap ini, kapasitas adsorpsi merkuri akan mengalami penurunan.



Gambar 18. Kapasitas Adsorpsi AC-CuS Rata-Rata dengan, Luas Area Mikro dan Meso/Makropori

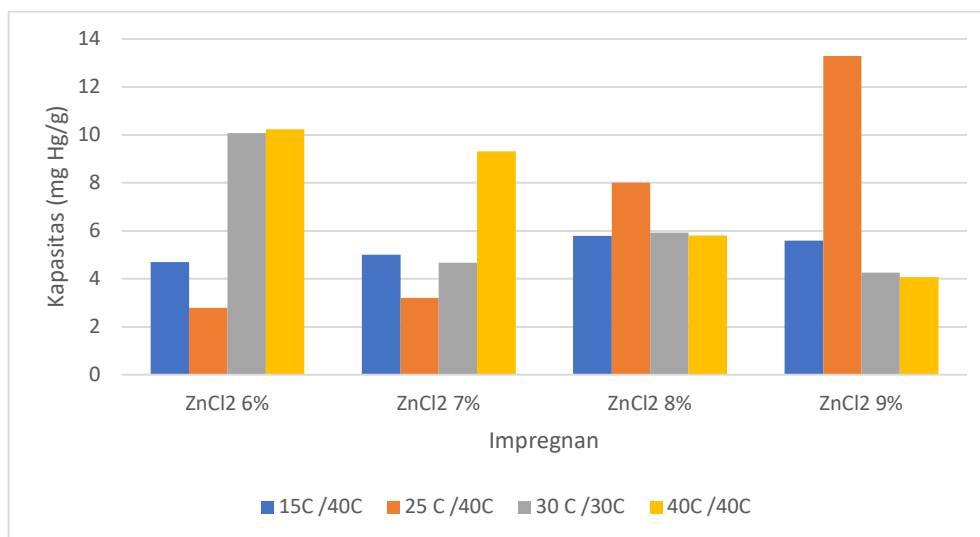
Berbeda dengan adsorben AC-S, Adsorben AC-Cu%S menunjukkan adanya peningkatan kapasitas pada kenaikan impregnan dari 13%S menjadi 20% S. Kapasitas adsorpsi mengalami penurunan saat impregnan dinaikkan menjadi 33%. Hal ini sudah menunjukkan kapasitas adsorpsi optimal adalah dengan impregnasi CuS 20%.

Sama dengan AC-S, luas permukaan pori AC- Cu%S juga dipengaruhi oleh jumlah impregnan. Jika dibandingkan dengan adsorben AC-CuS yang diimpregnasi di larutan, maka adsorben AC-CuS masih memiliki luas permukaan yang relatif besar dibandingkan AC-Cu%S atau AC-S. Rendahnya kapasitas adsorben AC-CuS dapat disebabkan jumlah impregnan yang rendah selama tahap optimasi dan pengujian. Peningkatan jumlah impregnan diharapkan dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi merkuri adsorben AC-CuS.



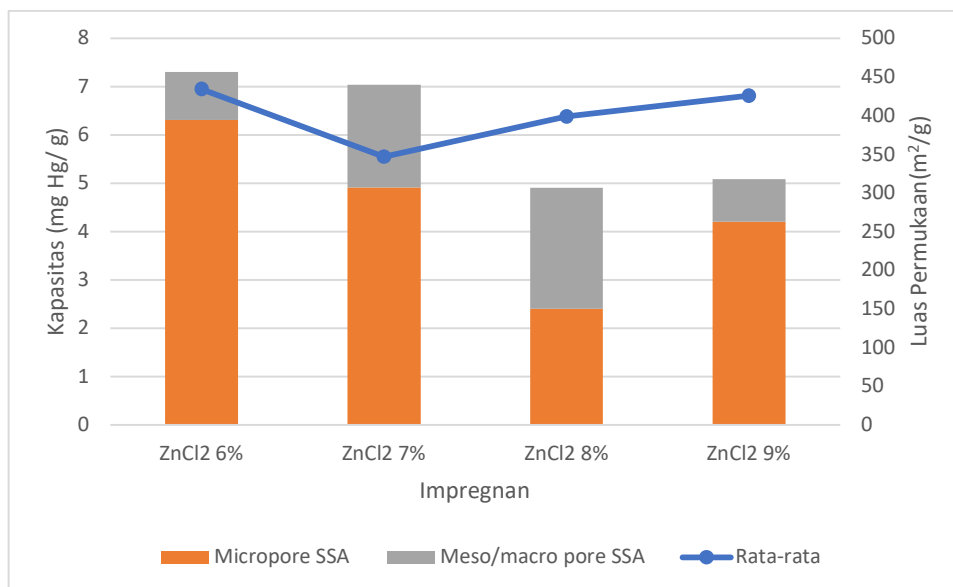
Gambar 19. Kapasitas Adsorpsi AC-CuS dengan Variasi Berat Impregnan dan Suhu Saturasi Gas

Sama dengan AC-S, pada adsorben AC-Cu+%S dan CuS tidak bisa ditemukan kecenderungan pengaruh dari hidrokarbon berat dan air dalam gas terhadap kapasitas adsorpsi. Konsentrasi Hg pada inlet adsorben yang bervariasi dapat menyebabkan perbedaan hasil kapasitas adsorben. Karena variasi konsentrasi inlet sifatnya random, maka hasil uji kapasitas rata-rata sudah bisa menggambarkan kapasitas adsorpsi adsorben secara keseluruhan.



Gambar 20. Kapasitas Adsorpsi AC-ZnCl<sub>2</sub> dengan variasi berat impregnan dan suhu saturasi gas

Kondisi yang bervariasi terjadi pada adsorben yang diimpregnasi  $ZnCl_2$ . Tidak ada trend yang jelas ketika adsorben karbon aktif kontak dengan gas yang mengalami kenaikan konsentrasi hidrokarbon berat dan air. Pada impregnasi  $ZnCl_2$  6% dan 7%, kapasitas adsorpsi turun ketika gas makin jenuh dengan air dan hidrokarbon berat (suhu saturasi  $15^\circ C$  ke  $25^\circ C$ ). Namun, ketika suhu saturasi dinaikkan  $40^\circ C$ , kapasitas adsorpsi justru meningkat. Hal sebaliknya terjadi pada karbon aktif yang diimpregnasi  $ZnCl_2$ , dimana kapasitas adsorpsi naik pada suhu saturasi  $25^\circ C$  dan turun pada suhu saturasi  $40^\circ C$ . Inkonsistensi dapat terjadi karena fluktuasi konsentrasi merkuri pada gas yang masuk ke karbon aktif cukup besar (rentang 100-200%) dan kapasitas adsorpsi Hg adsorben AC- $ZnCl_2$  yang relatif kecil menyebabkan variasi kecepatan jenuh adsorben yang terukur.



Gambar 21. Kapasitas Adsorpsi AC- $ZnCl_2$  Rata-Rata dengan, Luas Area Mikro dan Meso/Makropori

Luas permukaan adsorben juga menunjukkan kecenderungan yang sama dengan 2 jenis adsorben sebelumnya. Kapasitas adsorben rata-rata menunjukkan trend naik seiring kenaikan impregnan. Kapasitas mungkin dapat mencapai 13.4 mg/g saat impregnan dinaikkan menjadi 20% dan

dilakukan pengeringan 600°C pada tahap pengeringan (Duan, Yuan, Jing, & Yuan, 2019). Prosedur 2 kali pemanasan pada suhu tinggi menyebabkan metode ini akan sulit untuk diterapkan karena nantinya akan memerlukan biaya yang besar untuk 2 kali pemanasan (sebelum impregnasi dan pada tahap pengeringan). Impregnasi konsentrasi tinggi dengan  $ZnCl_2$  juga beresiko untuk gas alam yang jenuh dengan air karena sifat  $ZnCl_2$  yang higroskopis akan menyerap air dari gas dan membuat adsorben menjadi lembab.

## C.8 Karakterisasi Adsorben

### C.8.1 BET

Data luas permukaan dan ukuran pori menggambarkan luas permukaan yang ada di karbon aktif secara total, sebagai mikropori dan meso/mikropori. Data tersebut menjadi penting karena impregnan yang bereaksi dengan merkuri berada di permukaan karbon aktif. Karbon aktif yang memiliki luas permukaan yang tinggi dapat menyimpan lebih banyak impregnan di permukaan yang secara langsung meningkatkan kapasitas karbon aktif dalam menyerap merkuri.

Selain luas permukaan, distribusi pori karbon aktif juga memainkan peranan dalam kinetika reaksi dan kondensasi cairan di dalam pori. Adsorben dengan struktur mikro yang besar umumnya memiliki luas permukaan yang besar dan kapasitas yang besar. Namun, waktu yang diperlukan agar merkuri dapat terdifusi ke struktur mikro menjadi lebih panjang. Selain itu, gas cenderung terkondensasi dalam struktur mikro dan menyebabkan gugus aktif tertutup cairan. Jika pori adsorben lebih banyak sebagai makro/meso, adsorben akan memiliki kinetika reaksi yang tinggi dengan penurunan kapasitas adsorpsi. Karenanya, perlu dicari titik optimum distribusi pori di permukaan adsorben.

Dari tabel 15, terlihat bahwa Adsorben AC-S33% memiliki distribusi ukuran pori lebih besar dibandingkan AC-S16% dan AC-S50%. Pori AC-S33% didominasi oleh meso/makropori menyebabkan luas permukaan kontak dengan gas lebih besar dan efek penurunan kapasitas adsorpsi



yang disebabkan karena kondensasi kapiler lebih kecil. Pada penelitian ini, tidak terjadi penurunan kapasitas saat pengujian dengan gas jenuh yang dapat disebabkan karena tekanan gas yang relatif rendah tidak memungkinkan terjadinya kondensasi kapiler.

Luas area permukaan menunjukkan hubungan yang jelas dengan kapasitas adsorpsi dan konsentrasi sulfur yang terimpregnasi di permukaan karbon aktif. Sulfur yang diimpregnasi mempengaruhi luas permukaan karbon aktif. Semakin banyak sulfur yang diimpregnasikan, semakin berkurang luas permukaan karbon aktif karena pori yang tertutup oleh sulfur. Semakin banyak sulfur diimpregnasikan, semakin banyak mikropori yang tertutup oleh sulfur.

Tabel 15. Karakteristik Pori Karbon Aktif AC-S

	SSA (m <sup>2</sup> /g)	Micropore SSA	Meso/macro pore SSA	Pore Volume (cc/g)	t-Method Micropore Volume (cc/g)	Meso Macro Volume (cc/g)	Pore Radius (A)	Kapasitas Rata-Rata
AC-S 16%	510.3	378.4	131.9	0.4648	0.2398	0.2250	9.660	50.9
AC-S 33%	436.4	241.2	195.2	0.4796	0.1528	0.3268	15.850	25.0
AC-S 50%	308.3	164.5	143.8	0.3762	0.1265	0.2497	9.660	14.9

Hal yang berbeda terjadi pada karbon aktif yang diimpregnasi CuS. Kapasitas adsorpsi Hg meningkat saat luas permukaan turun dari 644 m<sup>2</sup>/g menjadi 435 m<sup>2</sup>/g. Seiring dengan penambahan konsentrasi sulfur yang diimpregnasi, kapasitas adsorpsi Hg kembali turun. Hal ini menunjukkan metode pembuatan AC-Cu S 20% merupakan metode yang optimum dalam pembuatan adsorben dengan ini. Metode pembuatan adsorben AC-CuS(I) juga memiliki luas permukaan yang lebih besar dari metode AC-Cu S 13% dan kapasitas adsorpsi rata-rata yang lebih kecil dapat menunjukkan bahwa konsentrasi impregnan yang digunakan untuk membuat adsorben tersebut belum cukup.

Tabel 16. Karakteristik Pori Karbon Aktif AC-CuS

	Rata-Rata Kapasitas	SSA (m <sup>2</sup> /g)	Micro-pore SSA	Meso/macro pore SSA	Pore Volume (cc/g)	T-Method Micropore Volume (cc/g)	Meso Macro Volume	Pore Radius (A)
AC-Cu S 13%	21.7	634.2	407.9	226.3	0.6418	0.2612	0.3806	13,85
AC-Cu S 20%	30.4	434.9	359.9	75.0	0.3097	0.2050	0.1047	8,440
AC-Cu S 33%	9.0	260.6	89.4	171.2	0.3709	0.0805	0.2904	13,24
AC-CuS	12.1	728.3	503.2	225.1	0.6874	0.3172	0.3702	8,44

Meskipun metode AC-Cu S 20% menunjukkan kapasitas adsorpsi terbesar, volume pori meso/makro dan luas permukaan pori meso/makro metode ini lebih kecil dibandingkan metode lainnya. Kecilnya ukuran mesopore dapat menyebabkan aliran Hg dari makropori ke mesopore dan mikropori terhambat dan laju reaksi adsorpsi relatif rendah. Kapasitas adsorpsi dan laju reaksi adsorben ini dapat ditingkatkan dengan meningkatkan ukuran meso/makroporinya.

Sama dengan dua metode sebelumnya, luas permukaan karbon aktif turun seiring peningkatan konsentrasi ZnCl<sub>2</sub>. Secara rata-rata, pada impregnasi ZnCl<sub>2</sub> diatas 5% kapasitas adsorpsi Hg tidak menunjukkan trend kenaikan kapasitas adsorpsi yang signifikan.

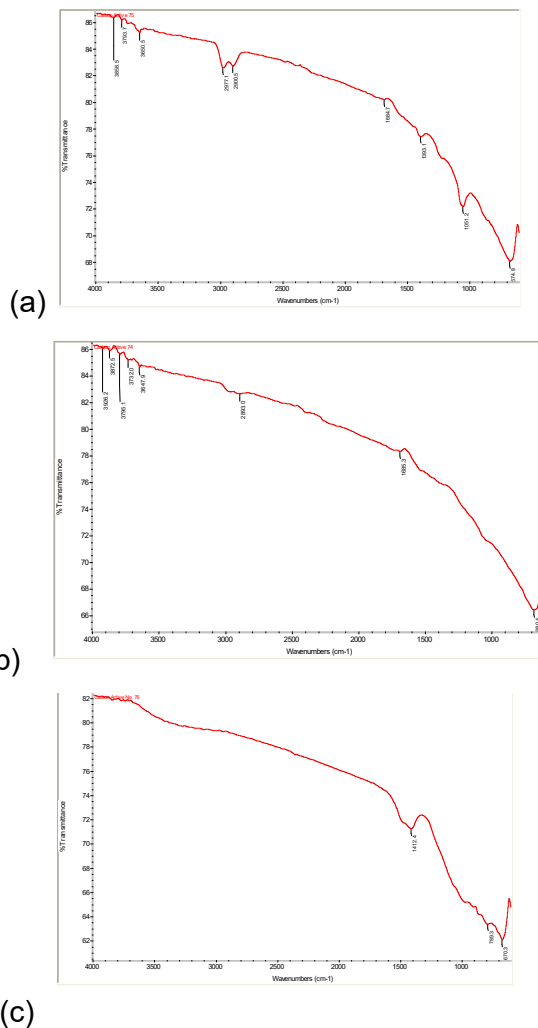
Tabel 17. Karakteristik Pori Karbon Aktif AC-ZnCl<sub>2</sub>

Imprengan	Rata-Rata Kapasitas	SSA (m <sup>2</sup> /g)	Micro-pore SSA (m <sup>2</sup> /g)	Meso/macro pore SSA (m <sup>2</sup> /g)	Pore Volume (cc/g)	T-Method Micropore Volume (cc/g)	Meso Macro Volume	Pore Radius (A)
ZnCl <sub>2</sub> 6%	5.5	456.4	394.7	61.7	0.2981	0.2167	0.0814	8,440
ZnCl <sub>2</sub> 7%	4.9	439.8	307.1	132.7	0.4238	0.1995	0.2243	9,660
ZnCl <sub>2</sub> 8%	5.3	306.8	150.2	156.6	0.3825	0.1012	0.2813	16,580
ZnCl <sub>2</sub> 9%	6.0	318.0	262.6	55.4	0.2350	0.1524	0.0826	9,234

### C.8.2 Fourier Transform Infrared (FTIR)

Spektrum FTIR dihasilkan dari analisis sampel pada bilangan gelombang 650 – 4000  $\text{cm}^{-1}$ . Karbon aktif yang telah dimodifikasi dianalisis menggunakan FTIR untuk mengetahui gugus fungsi yang terkandung didalamnya. Gugus fungsi yang dihasilkan dapat digunakan sebagai penciri dari karbon aktif dan modifikasinya. Gugus fungsi karakteristik yang menunjukkan adanya gugus C=O pada karbon aktif dari tempurung kelapa adalah pada bilangan 1600 – 1800  $\text{cm}^{-1}$ .

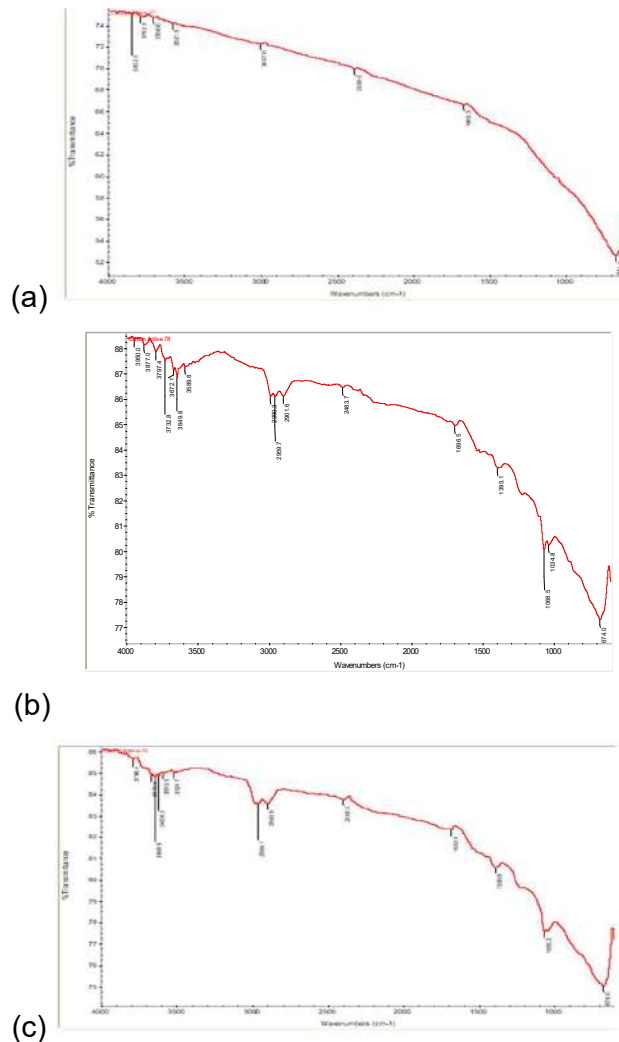
Gambar 23 (a), (b), dan (c) menunjukkan spektrum FTIR dari karbon aktif yang dimodifikasi dengan penambahan sulfur dengan perbandingan 16% S (Gambar 22 (a)), 32% S (Gambar 22 (b)) dan 50% S (Gambar 22 (c)). Bilangan gelombang yang spesifik untuk sulfur adalah pada 2600-2540  $\text{cm}^{-1}$  (S-H *Stretch*), 710-570  $\text{cm}^{-1}$  (C-S *stretch*), dan 1275-1030  $\text{cm}^{-1}$  (C=S *stretch*) (Hampton, Demoin, & Glaser, 2010). Puncak bilangan gelombang pada Gambar 1, Gambar 2 dan Gambar 3 relatif sama pada gugus fungsi C-S hasil modifikasi Sulfur pada bilangan gelombang 680,4  $\text{cm}^{-1}$ . Selain itu, pada Gambar 22 (a) juga terdapat puncak adsorpsi pada bilangan gelombang 1051,2  $\text{cm}^{-1}$  yang mengindikasikan adanya gugus fungsi C=S atau C-O pada karbon aktif. Puncak pada bilangan 2980 – 2900  $\text{cm}^{-1}$  pada gambar 22(a) muncul dari stretching gugus fungsi C-H (Saka, 2012) sedangkan gugus di atas 3500 dapat menunjukkan regangan gugus C-H atau O-H. Peak pada 1450-1350  $\text{cm}^{-1}$  dapat menunjukkan adanya gugus sulfat di permukaan karbon aktif.



Gambar 22. Spektrum FTIR AC-S 16%(a), 33%(b), 50% (c)

Spektrum FTIR pada Gambar 23 (a), (b), dan (c) adalah spektrum karbon aktif yang telah dimodifikasi dengan penambahan  $\text{CuCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  dan Sulfur. Dibandingkan karbon aktif yang hanya diimpregnasi sulfur, jumlah peak yang dihasilkan pada pengujian ini relatif lebih bervariasi. Spektrum FTIR pada Gambar 23 (b), dan (c) memiliki variasi gugus yang lebih beragam dibandingkan spektrum pada gambar 23.(a). Puncak adsorben pada bilangan gelombang  $3007 \text{ cm}^{-1}$  dan  $1668,3 \text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya gugus fungsi C-H dan C=O dan puncak karakteristik adsorpsi  $671,4 \text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya gugus C-S atau Cu-S hasil modifikasi. Gugus fungsi aldehyd C-H pada karbon aktif (b) dan (c) juga ditunjukkan dengan adanya bilangan gelombang  $2900 - 3000 \text{ cm}^{-1}$ .

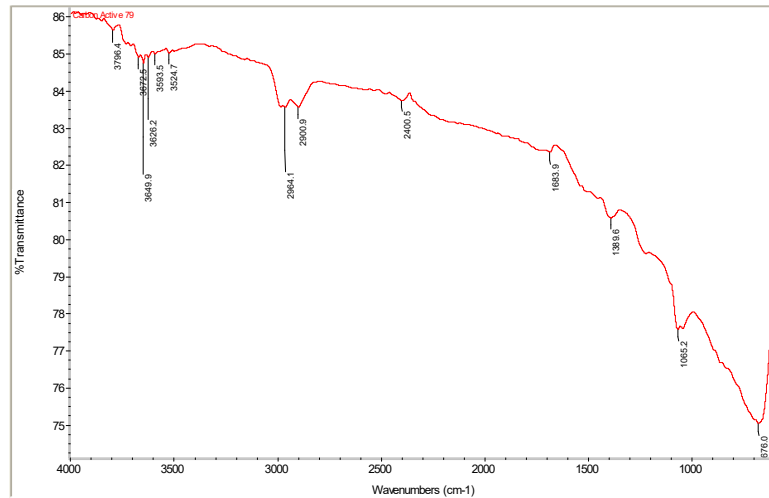
Pada Gambar 23 (b) dan Gambar 23 (c), terdapat puncak adsorpsi dengan intensitas yang lebih tinggi muncul pada bilangan gelombang 1068,5 cm<sup>-1</sup> dan 1034,8 cm<sup>-1</sup> yang mengindikasikan adanya gugus fungsi alkoxy C-O atau gugus thiocarbonyl(C=S) dan adanya senyawa halogen seperti Cl atau sulfat pada bilangan gelombang 1389,6 - 1395,1 cm<sup>-1</sup>.



Gambar 23. Spektrum FTIR Karbon Aktif AC-Cu 13%S (a), 20%S(b), 33 %S (c)

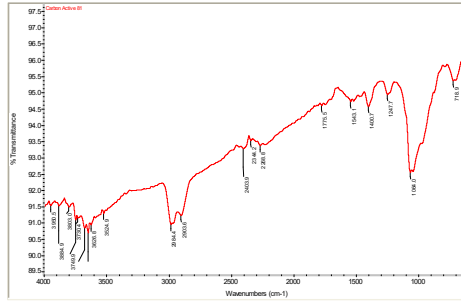
Berbeda dengan Gambar 23 (a), (b), dan (c), spektrum FTIR pada Gambar 24 merupakan modifikasi karbon aktif dengan penambahan larutan CuCl<sub>2</sub>. Hampir sama dengan hasil modifikasi sebelumnya, puncak yang muncul pada Gambar 24 mengindikasikan adanya gugus C=S atau S=O

pada bilangan gelombang 1064,9  $\text{cm}^{-1}$  dan gugus fungsi C-S pada bilangan gelombang 676  $\text{cm}^{-1}$ . Gugus fungsi C-H juga diketahui dari puncak pada Panjang gelombang 2800-3000  $\text{cm}^{-1}$ . Gugus pada bilangan gelombang 1691  $\text{cm}^{-1}$  menunjukkan adanya gugus C=O

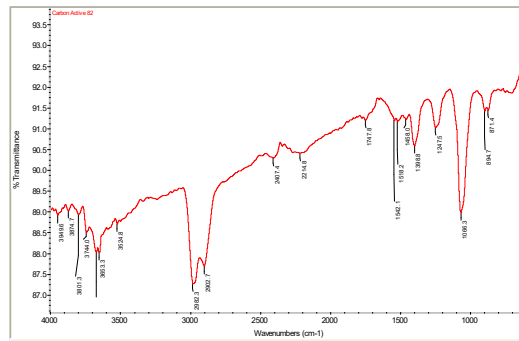


Gambar 24. Spektrum FTIR Karbon Aktif yang Dimodifikasi dengan Impregnasi Larutan  $\text{CuCl}_2$  dan NaS.

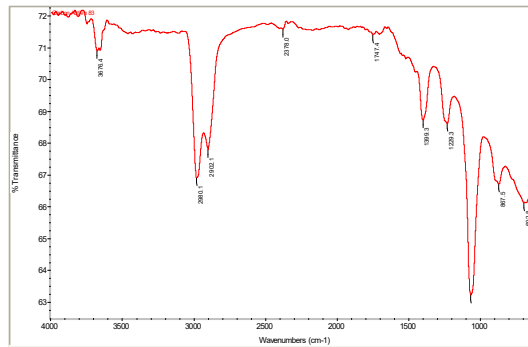
Gambar 25 (a), (b), (c) dan (d) menggambarkan spektrum FTIR dari sampel karbon aktif yang dimodifikasi dengan penambahan  $\text{ZnCl}_2$ . Puncak pada bilangan gelombang sekitar 718,9  $\text{cm}^{-1}$  mengindikasikan adanya ikatan Zn-Cl dalam karbon aktif. Puncak pada bilangan 2980 – 3000  $\text{cm}^{-1}$  muncul dari stretching gugus fungsi C-H(Saka, 2012). Puncak absorpsi 2300-2400 dan 1600-1500 $\text{cm}^{-1}$  menunjukkan vibrasi ikatan  $\text{C}\equiv\text{C}$ . Puncak absorpsi pada bilangan gelombang 1710-1850 menunjukkan gugus Karboksil/karbonil. Sedangkan puncak adsorpsi yang muncul pada bilangan gelombang 1247,7  $\text{cm}^{-1}$ , 1247m5  $\text{cm}^{-1}$  dan 1230,2  $\text{cm}^{-1}$  mengindikasikan adanya gugus fungsi alkoxy C-O.



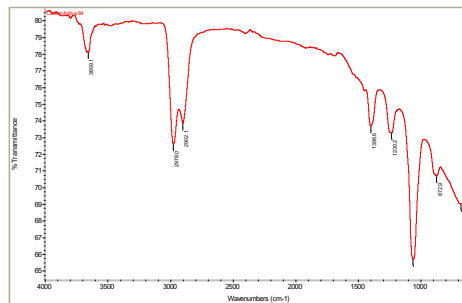
(a)



(b)



(c)



(d)

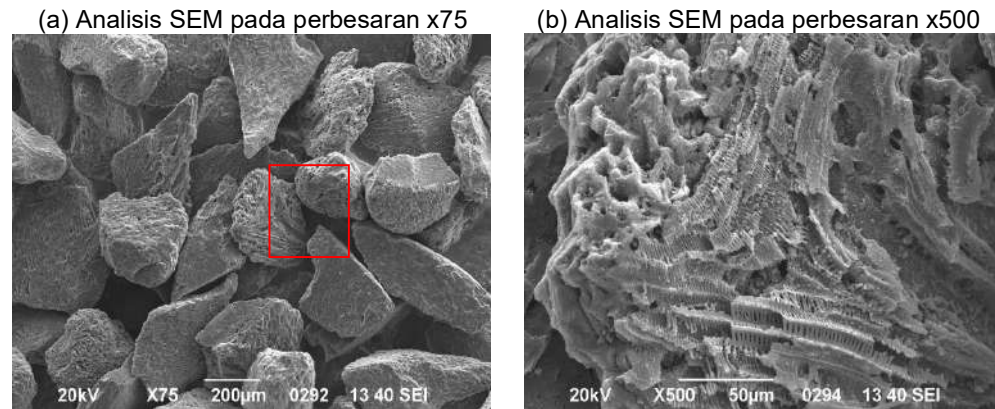
Gambar 25. Spektrum FTIR Karbon Aktif yang Dimodifikasi dengan Penambahan  $ZnCl_2$  6% (a), 7% (b), 8% (c), 9% (d)

### C.8.3 SEM-EDX

Analisis morfologi pori dari karbon aktif dan karbon aktif termodifikasi dilakukan menggunakan SEM-EDX. Karakterisasi ini dilakukan menggunakan SEM tipe JSM-6390-LA

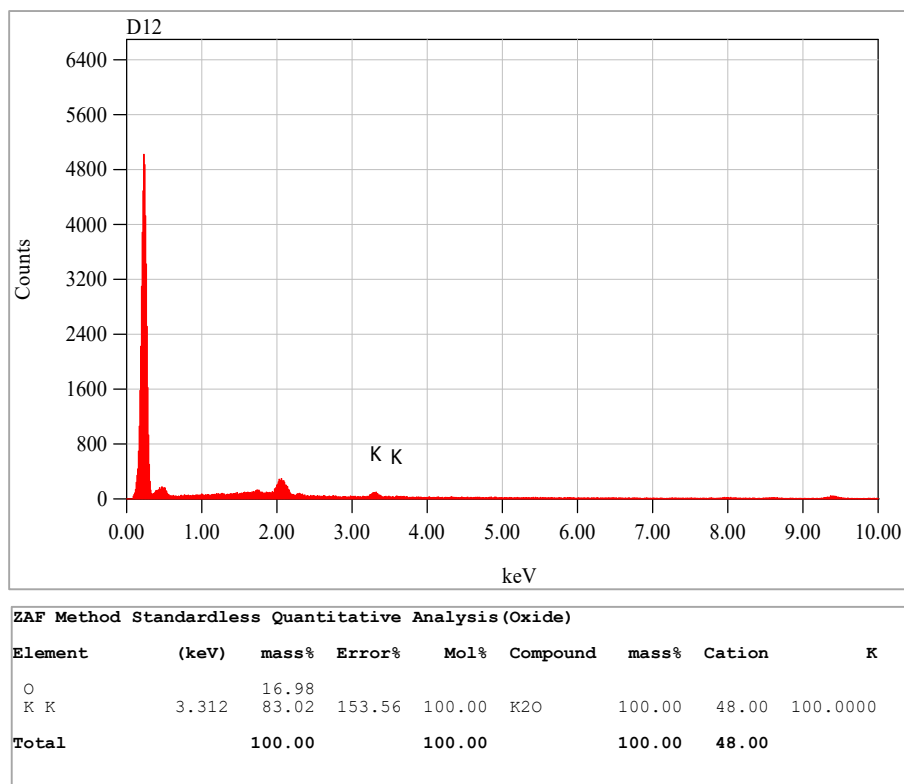
#### C.8.3.1 Karbon Aktif

Gambar 26 menunjukkan hasil analisis SEM terhadap sampel karbon aktif yang belum dimodifikasi dengan perbesaran x75 dan x500. Kenampakan SEM secara umum menunjukkan butiran-butiran pada perconto serbuk dengan rentang ukuran butir 270 - 570  $\mu\text{m}$ , tingkat kebundaran butiran menyudut hingga membundar tanggung dengan pemilahan sedang - baik. Sedangkan gambar SEM dengan perbesaran x500 menunjukkan bentuk yang menyudut tanggung serta morfologi dalam beberapa tekstur seperti ruas-ruas bambu dan bergelombang. Terdapat pori dengan bentuk dan ukuran bervariasi dari 1  $\mu\text{m}$  sampai 15  $\mu\text{m}$ . Komposisi yang menyusun butiran sampel karbon aktif ini (selain karbon) adalah Kalium (K) dengan kenampakan peak yang relatif kecil pada spektrum EDX pada gambar 26.



Gambar 26. Hasil Analisis SEM pada Sampel Karbon Aktif Sebelum Modifikasi





Gambar 27. Hasil Analisis EDX pada Sampel Karbon Aktif Sebelum Modifikasi

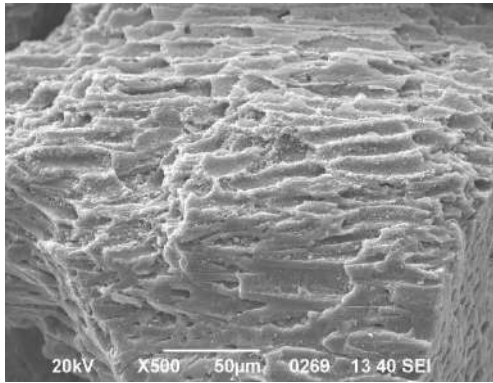
### C.8.3.2 Karbon Aktif termodifikasi dengan Sulfur

Gambar 28 menunjukkan hasil analisis SEM pada perbesaran x500 terhadap sampel karbon aktif dengan variasi penambahan sulfur. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kandungan sulfur menyebabkan peningkatan ukuran butir dan kerapatan pori-pori rongga, seperti yang dirinci pada Tabel 18. Penambahan sulfur:karbon aktif sebanyak 3,3:10 menghasilkan bentuk butir menyudut tanggung dan morfologi berupa serat kayu dengan pori-pori rongga yang cukup rapat. Penambahan Sulfur:karbon aktif sebanyak 6,6:10 menghasilkan butiran dengan bentuk menyudut tanggung dan morfologi tidak teratur, permukaan butiran juga cenderung banyak pengotor dan beberapa menutupi pori. Sedangkan penambahan Sulfur: karbon aktif sebanyak 10:10 menghasilkan butiran dengan bentuk menyudut tanggung dan morfologi seperti serat kayu

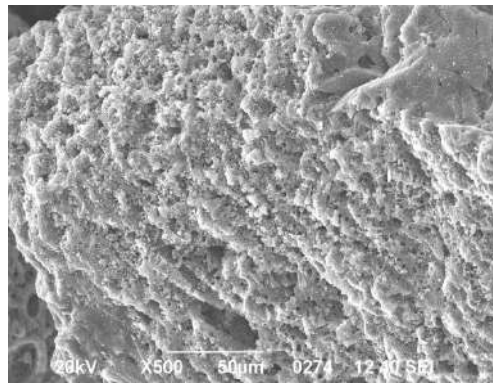
dengan jarak antar pori memiliki kerapatan yang cukup tinggi dan merata (relatif sama besar).

Hasil analisis EDX ditunjukkan pada Gambar 29. Elemen yang terdeteksi dalam sampel adalah elemen O dan S. Jumlah elemen Sulfur yang terdeteksi dalam 3 sampel karbon aktif tersebut adalah sama, yaitu sebanyak 40,05%.

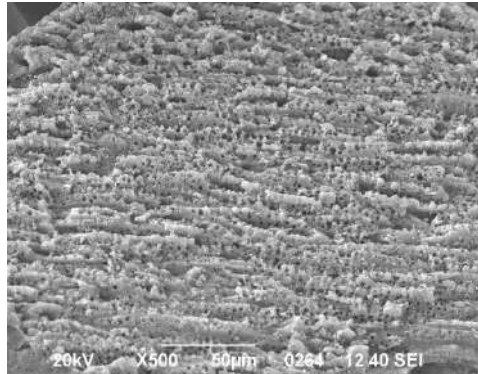
(a) Penambahan S : Karbon Aktif 16%



(b) Penambahan S : Karbon Aktif 33%

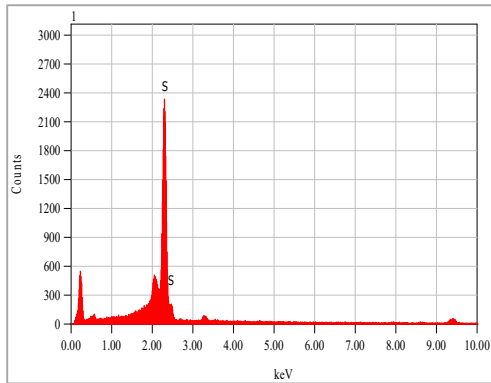


(c) Penambahan S : Karbon Aktif 50%



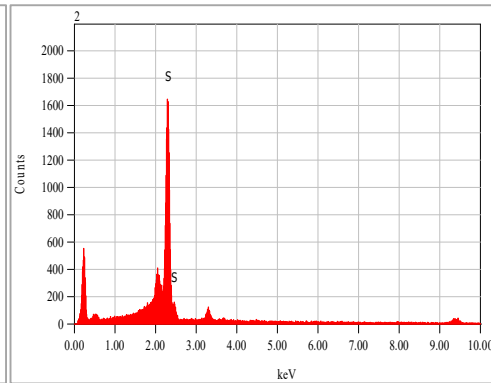
Gambar 28. Hasil Analisis SEM terhadap Sampel Karbon Aktif dengan Penambahan Sulfur

(a) Penambahan S : Karbon Aktif16%



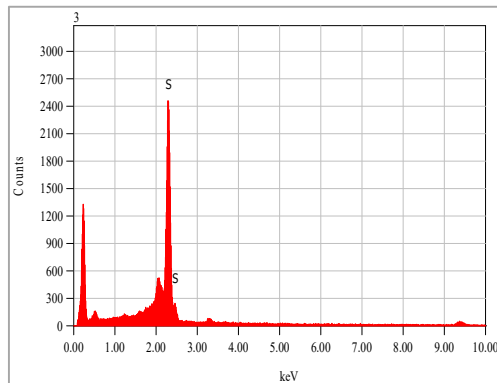
ZAF Method Standardless Quantitative Analysis(Oxide)								
Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		59.95						
S K	2.307	40.05	0.88	100.00	SO3	100.00	8.00	100.0000
Total		100.00		100.00		100.00	8.00	

(b) Penambahan S : Karbon Aktif 33%



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis(Oxide)								
Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		59.95						
S K	2.307	40.05	1.03	100.00	SO3	100.00	8.00	100.0000
Total		100.00		100.00		100.00	8.00	

(c) Penambahan S : Karbon Aktif 50%



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis(Oxide)								
Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		59.95						
S K	2.307	40.05	1.22	100.00	SO3	100.00	8.00	100.0000
Total		100.00		100.00		100.00	8.00	

Gambar 29. Hasil Analisis EDX terhadap Sampel Karbon Aktif dengan penambahan Sulfur

Tabel 18. Rincian Hasil Analisis SEM-EDX pada sampel karbon aktif yang dimodifikasi dengan penambahan Sulfur

No.	Perbandingan jumlah S terhadap Karbon Aktif	Rentang Ukuran Butir	Kerapatan pori-pori rongga	Persentase Sulfur dalam butiran
1.	16% S	250 - 550 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$ - 6.5 $\mu\text{m}$	40,05 %
2.	33%S	220 - 610 $\mu\text{m}$	0.5 $\mu\text{m}$ - 8 $\mu\text{m}$	40,05%
3.	50% S	270 - 550 $\mu\text{m}$	0.5 $\mu\text{m}$ - 13 $\mu\text{m}$	40,05%

Dari tabel 18, diketahui bahwa seluruh adsorben AC-S yang dibuat memiliki persentase sulfur di permukaan yang sama, meskipun terjadi penambahan berat adsorben karena sulfur. Karena luas permukaan struktur mikro karbon aktif turun seiring peningkatan impregnasi sulfur, maka bisa disimpulkan bahwa sulfur terimpregnasi pada struktur pori mikro karbon aktif menyebabkan turunnya luas permukaan pori mikro karbon aktif.

#### C.8.3.3 Karbon Aktif termodifikasi dengan S dan Cu (II)

Gambar 30 menunjukkan hasil analisis morfologi menggunakan SEM terhadap sampel karbon aktif yang dimodifikasi dengan penambahan  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  dan variasi jumlah Sulfur dalam 25 gr Karbon Aktif, yaitu 0,9 gr Sulfur, 1,5 gr Sulfur dan 3,0 gr Sulfur. Hasil analisis morfologi SEM tersebut diperoleh pada perbesaran x500. Sedangkan hasil analisis EDX terhadap sampel tersebut ditunjukkan pada Gambar 31 dengan rincian seperti yang ditunjukkan pada Tabel 19.

Bentuk pori sampel dengan penambahan sulfur 0,9 gr adalah menyudut tanggung dan morfologi seperti batang berpori dengan permukaan yang rata. Penambahan Sulfur menjadi 1,5 gr menghasilkan pori dengan bentuk menyudut dan morfologi tidak teratur (bergelombang) dengan jumlah relatif kecil berukuran 0.5  $\mu\text{m}$  sampai 5  $\mu\text{m}$ . Ditemukan banyak agregat halus (seperti pengotor) pada permukaan butiran sampel ini bahkan sebagian pengotor menutupi pori. Penambahan Sulfur sebanyak

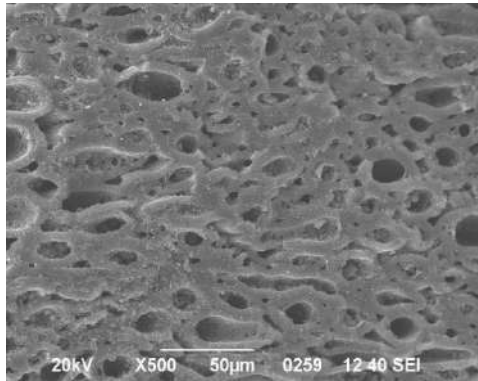
3 gram menghasilkan morfologi dengan bentuk pori menyudut dan morfologi tidak merata (bergelombang) dengan pori-pori didalamnya berukuran bervariasi dari 1 µm sampai 15 µm. Peningkatan jumlah sulfur yang ditambahkan dalam sampel mengakibatkan rentang ukuran butir yang semakin lebar dan rentang ukuran rongga pori yang semakin kecil dan kerapatan pori yang lebih tinggi.

Berdasarkan hasil analisis EDX, persentasi jumlah Cu dan S dalam setiap butiran bervariasi. Penambahan Sulfur 0,9 gr menyebabkan adanya Sulfur yang terikat dalam sampel sebanyak 30,95% - 36,87% dan Cu sebanyak 6,34% - 18,14%. Penambahan jumlah sulfur yang ditambahkan menjadi 1,5 gr tidak menyebabkan peningkatan jumlah S dalam sampel, namun ditemukan adanya peningkatan jumlah Cu menjadi 8,94% - 44,38%. Penambahan jumlah S selanjutnya menjadi 3 gr juga tidak menyebabkan adanya peningkatan jumlah S secara signifikan, namun ditemukan adanya penurunan jumlah Cu yang cukup signifikan menjadi 3.16% – 11.24%.

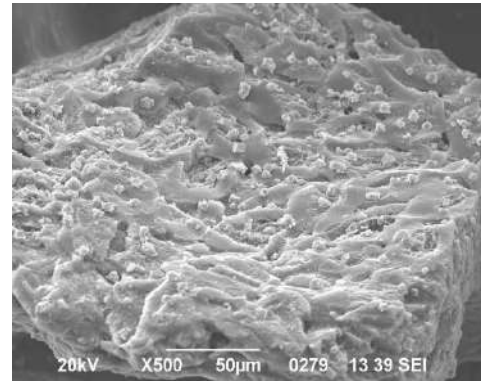
Tabel 19. Rincian Hasil Analisis SEM-EDX pada Sampel Karbon Aktif yang Dimodifikasi dengan Penambahan  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  dan Sulfur

No.	Penambahan Jumlah S dalam 25 gr Karbon Aktif dan 3,4 gr $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Rentang Ukuran Butir	Ukuran rongga pori	Persentase Sulfur dan Cu dalam butiran
1.	0,9 Sulfur	280-470 µm	1 µm - 37 µm	Tembaga (Cu) : 6.34% – 18.14% Sulfur (S) : 30.95% - 36.87%
2.	1,5 Sulfur	240 - 520 µm	0.5 µm - 5 µm	Tembaga (Cu) : 8.94% – 44.38% Sulfur (S) : 17.80% - 35.57%
3.	3,0 Sulfur	240 - 540 µm	1 µm - 15 µm	Tembaga (Cu) : 3.16% – 11.24% Sulfur (S) : 34.41% - 38.47%

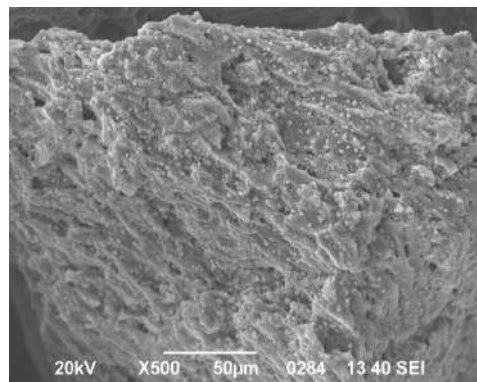
(a) Penambahan Sulfur 0,9 gr



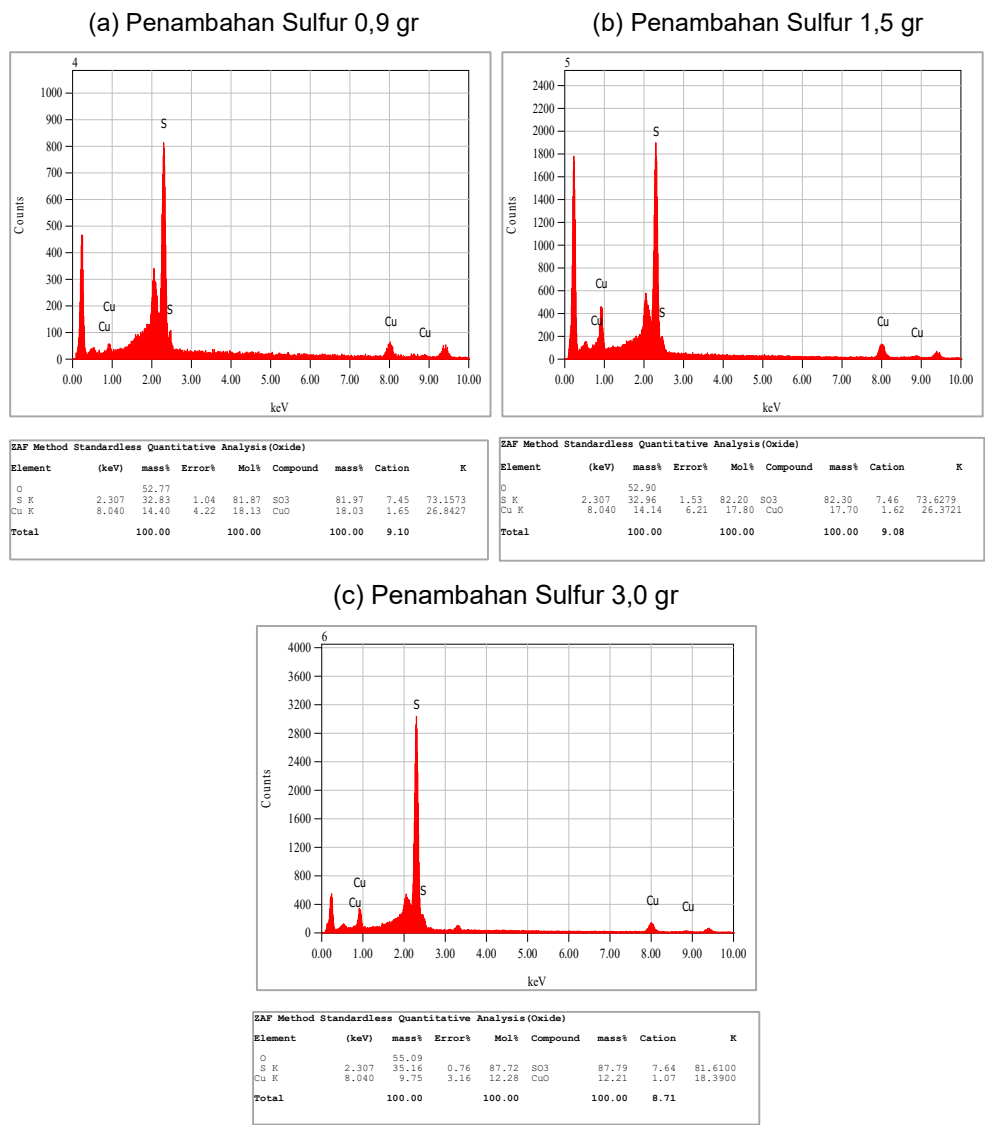
(b) Penambahan Sulfur 1,5 gr



(c) Penambahan Sulfur 3,0 gr



Gambar 30. Hasil Analisis SEM terhadap Sampel Karbon Aktif dengan Penambahan  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  dan Sulfur



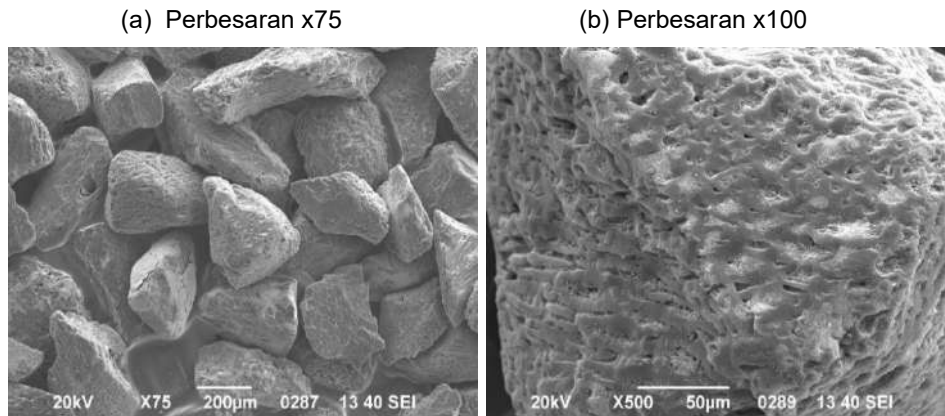
Gambar 31. Hasil Analisis EDX terhadap Sampel Karbon Aktif dengan Penambahan  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  dan Sulfur

#### C.8.4 Karbon Aktif termodifikasi dengan S dan Cu (I)

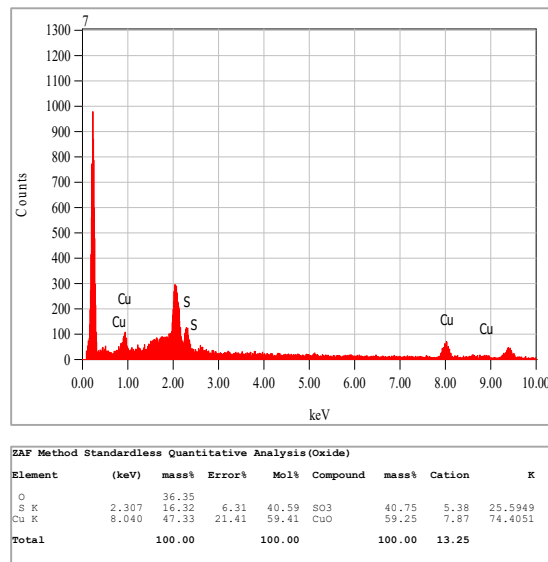
Analisis SEM dan EDX sampel karbon aktif yang dimodifikasi dengan penambahan  $\text{CuCl}_2$  dan  $\text{Na}_2\text{S}$  ditunjukkan pada Gambar 32 (a) dan (b). Morfologi sampel pada perbesaran x75 yang ditunjukkan pada Gambar 32(a) secara umum menunjukkan butiran-butiran pada perconto serbuk dengan rentang ukuran butir 260 - 700  $\mu\text{m}$ , tingkat kebundaran butiran menyudut hingga membundar tanggung dengan pemilahan sedang - baik. Sedangkan morfologi sampel pada perbesaran x500 menunjukkan bentuk

menyudut tanggung dan morfologi seperti serat kayu berpori. dengan berukuran 0.5  $\mu\text{m}$  - 13  $\mu\text{m}$ . Hampir sebagian pori ditutupi oleh agregat halus.

Berdasarkan hasil analisis EDX yang ditunjukkan pada Gambar 33 (b), komposisi utama butiran tersebut adalah Tembaga (Cu) dengan persentase 46.65% – 50.88% dan Sulfur (S) dengan persentase 14.54% - 16.66%.



Gambar 32. Hasil analisis SEM pada sampel karbon aktif dengan Penambahan  $\text{CuCl}_2$  dan  $\text{Na}_2\text{S}$

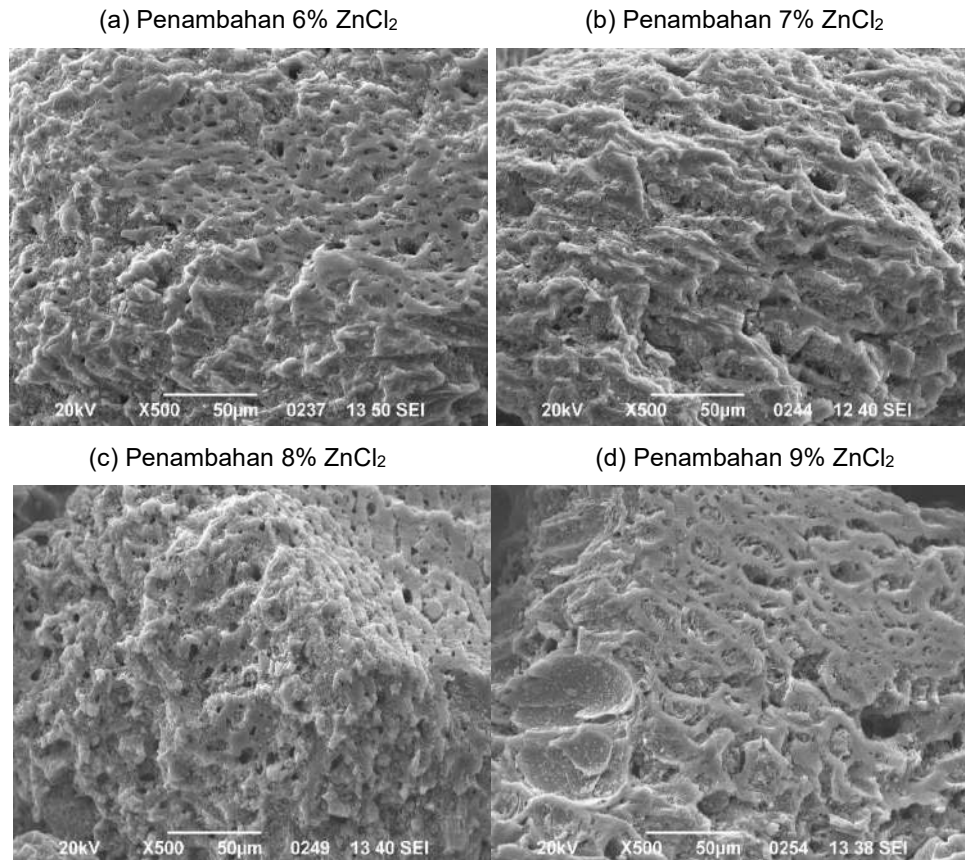


Gambar 33 Hasil Analisis EDX terhadap sampel karbon aktif dengan penambahan  $\text{CuCl}_2$  dan  $\text{Na}_2\text{S}$



### C.8.5 Karbon Aktif termodifikasi dengan $ZnCl_2$

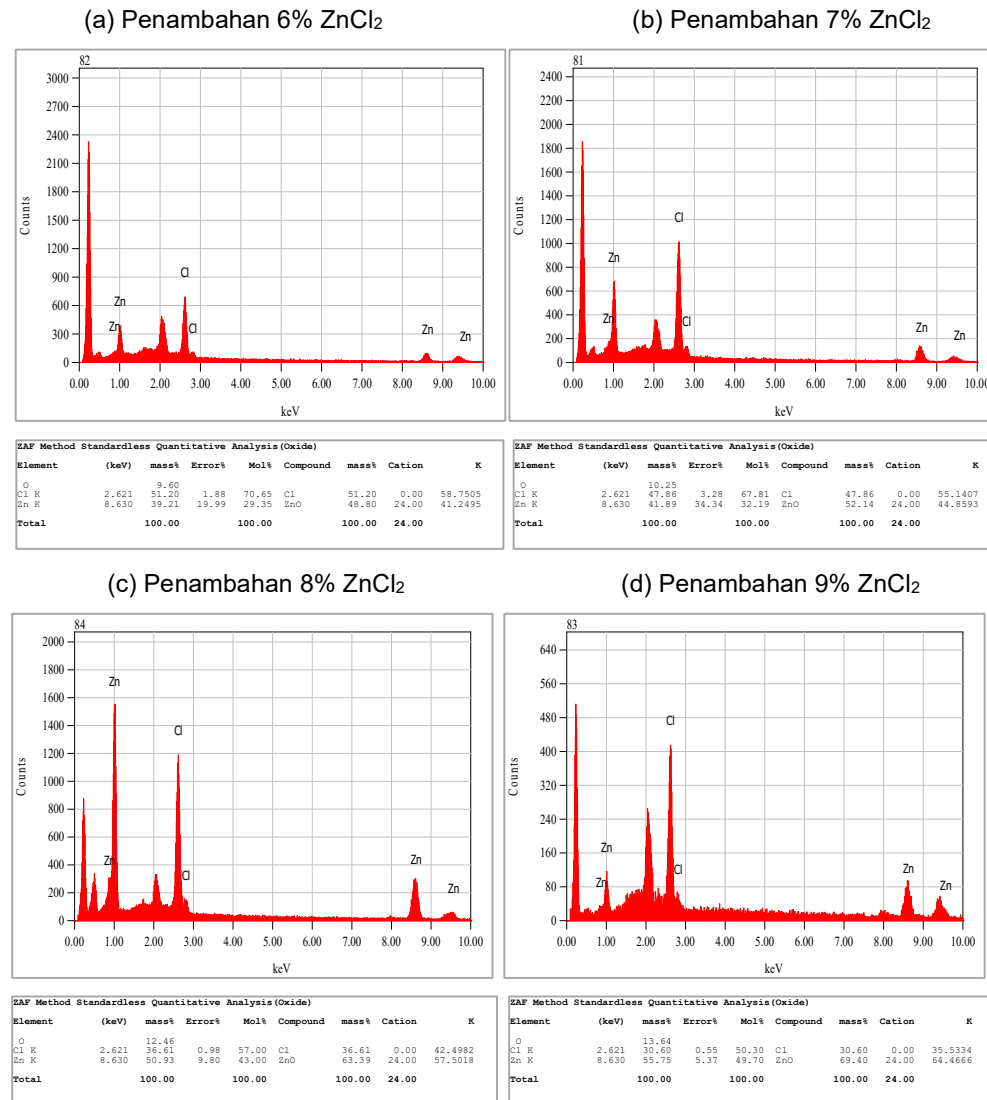
Hasil analisis SEM dan EDX terhadap sampel karbon aktif yang dimodifikasi dengan  $ZnCl_2$  pada perbesaran x500 ditunjukkan pada Gambar 34 dan Gambar 35 dengan rincian seperti yang tertera pada Tabel 20.



Gambar 34. Hasil Analisis SEM terhadap sampel karbon aktif dengan penambahan  $ZnCl_2$

Berdasarkan hasil analisis morfologi menggunakan SEM, penambahan  $ZnCl_2$  dalam jumlah yang lebih banyak menghasilkan rentang ukuran butir dalam sampel semakin besar. Penambahan 6%  $ZnCl_2$  menghasilkan ukuran butiran dengan rentang 250 – 550  $\mu m$  dan penambahan 9%  $ZnCl_2$  menghasilkan ukuran butiran dengan rentang 220 – 525  $\mu m$ . Begitu juga dengan ukuran rongga pori dalam butiran pada perbesaran x500, semakin banyak  $ZnCl_2$  yang ditambahkan, semakin besar ukuran rongga porinya. Secara umum, penambahan  $ZnCl_2$  dengan jumlah

yang berbeda menghasilkan bentuk pori yang serupa, yaitu membuldar tanggung dan morfologi yang tidak merata atau bergelombang. Banyak ditemukan material halus pada permukaan butiran, dimana pada beberapa tempat terlihat seperti menutupi pori. Pori butiran dengan penambahan  $ZnCl_2$  8% terlihat sedikit rapuh.



Gambar 35. Hasil Analisis EDX terhadap sampel karbon aktif dengan penambahan  $ZnCl_2$

Berdasarkan hasil analisis EDX, ditemukan adanya variasi jumlah Zn dan Cl dalam sampel. Semakin besar penambahan  $ZnCl_2$ , semakin besar

persentase elemen Zn dan semakin kecil persentase elemen Cl yang ditemukan dalam sampel, namun perubahannya tidak signifikan.

Tabel 20. Rincian Hasil Analisis SEM-EDX pada sampel karbon aktif yang dimodifikasi dengan penambahan  $ZnCl_2$

Penambahan Jumlah $ZnCl_2$	Rentang Ukuran Butir	Ukuran rongga pori	Persentase Zn dan Cl dalam butiran
6%	250 - 550 $\mu m$	0.7 $\mu m$ sampai 7.5 $\mu m$	Seng (Zn) : 39.21% – 44.20% Klorin (Cl) : 44.98% - 51.20%
7%	250 - 470 $\mu m$	0.5 $\mu m$ sampai 20 $\mu m$	Seng (Zn) : 40.43% – 46.84% Klorin (Cl) : 41.70% - 49.68%
8%	300 - 550 $\mu m$	1 $\mu m$ sampai 10 $\mu m$	Seng (Zn) : 43.07% – 50.93% Klorin (Cl) : 36.61% - 46.39%
9%	220 - 525 $\mu m$	1 $\mu m$ sampai 23 $\mu m$	Seng (Zn) : 41.28% – 55.75% Klorin (Cl) : 30.60% - 48.62%

## D Analisis dan Evaluasi

### D.1 Rancang Bangun Alat Uji Kapasitas Adsorben

Alat uji kapasitas adsorpsi Hg yang dibuat dapat menjenuhkan gas dengan merkuri dan fraksi berat. Konsentrasi merkuri yang dihasilkan bervariasi. Pada suhu saturasi merkuri 40°C, konsentrasi merkuri yang dihasilkan bervariasi dari 4 -10 mg Hg/m<sup>3</sup>. Seharusnya, pada suhu saturasi 40°C, konsentrasi merkuri dalam gas bumi adalah 23 mg/m<sup>3</sup> pada tekanan 40 psig dan suhu 40°C. Konsentrasi merkuri yang bervariasi juga mempengaruhi pengujian kapasitas yang dihasilkan, terutama pada pengujian adsorben yang kapasitas adsorpsinya rendah. Adsorben dengan kapasitas rendah akan langsung jenuh bila dialirkan gas dengan konsentrasi Hg mencapai 10 mg/m<sup>3</sup>. Pengaruh konsentrasi gas tidak terlalu besar untuk adsorben yang memiliki kapasitas yang besar. Karena fluktuasi terjadi di semua pengujian kapasitas adsorpsi, maka pengaruh ini diabaikan pada saat perhitungan kapasitas adsorpsi.

Dapat disimpulkan bahwa gas yang dihasilkan belum jenuh merkuri dan kurang stabil konsentrasinya. Kondisi tersebut dapat disebabkan oleh :

- a. Suhu ambien yang bervariasi selama 24 jam pengujian sehingga gas yang mengalir ke saturator merkuri menguapkan merkuri dengan laju yang berbeda-beda. Suhu ambien pada gas menyebabkan gas tidak memiliki energi dan waktu yang cukup untuk menguapkan merkuri ke konsentrasi jenuhnya.
- b. Ketika penggantian adsorben, aliran gas yang berada dalam vessel yang mengandung merkuri terhenti, menyebabkan merkuri menguap dan menaikkan konsentrasinya.
- c. Cairan merkuri sangat mudah bergerak. Ketika penggantian adsorben, terjadi perubahan luas permukaan merkuri yang kontak dengan gas menyebabkan laju penguapan merkuri akan berbeda.

Kedepannya, Rancang bangun uji kapasitas adsorpsi dapat diperbaiki dengan cara :

- a. Meningkatkan suhu inlet gas ke saturator sehingga merkuri memiliki energi lebih besar untuk menguap lebih cepat
- b. Membuat beberapa tahap saturasi merkuri dari sebelumnya hanya tahap
- c. Menggunakan pressure gauge yang lebih kecil untuk akurasi pengaturan tekanan lebih baik. Sebelumnya digunakan pressure gauge 250 psig untuk menset tekanan uji  $40 \pm 2$  psig. Untuk selanjutnya, dapat digunakan pressure gauge dengan tekanan 50 psig dengan set tekanan  $40 \pm 0.4$  psig.

## D.2 Hasil Uji Kapasitas Adsorpsi Merkuri dengan Saturasi Pentana/Heksana

Telah dilakukan penelitian kapasitas adsorpsi adsorben merkuri komersial yang dibuat dari impregnasi karbon aktif dengan sulfur. Pada tabel 21, kapasitas adsorpsi maksimum karbon aktif komersial yang telah diuji pada penelitian lain adalah 18mg Hg/g. Meskipun hasil penelitian tersebut tidak menjelaskan secara detail bagaimana proses uji kapasitas dilakukan, namun sebagian kecil data yang disampaikan cukup dapat menggambarkan bahwa penelitian yang dilakukan saat ini memiliki

kapasitas yang setara dibandingkan karbon aktif komersial seperti dijelaskan pada lampiran 9. Pada penelitian ini, kapasitas karbon aktif rata-rata mencapai 50 mg Hg/g adsorben. Dibandingkan uji coba kapasitas yang dilakukan penelitian lain, adsorben yang dibuat dan diuji pada penelitian ini memiliki keunggulan sebagai berikut:

- a. Diuji dengan gas alam yang ditambahkan hidrkarbon berat dan air yang sesuai dengan kondisi lapangan sehingga kaapsitas lebih menggambarkan kondisi lapangan. Pada penelitian lain, pengujian kapasitas adsorpsi menggunakan gas Nitrogen.
- b. kadar sulfur yang lebih kecil, 5-10% lebih rendah dibandingkan karbon aktif komersial meminimalkan kontaminasi sulfur ke bagian hilir unit adsorpsi merkuri

Tabel 21. Kapasitas Adsorpsi Karbon Aktif Komersial yang Diuji Skala Laboratorium

Parameter Uji	AC-S	UOP Carbon	HGR- S	HGR (10-15% S)	BPL-S-4/1-600
Kapasitas (mg Hg/g)	50.9	2.31	2.41	18	2.3
BET (m <sup>2</sup> /g)	510.3		868	573	820
%S	5%	1.7%	12.3%	10-15%	10-10.2%
Particle size(mm)	0.177-0.25	Powder	0.5-1.6 mm	powder	0.177-0.25
Berat Uji Kapasitas(gram)	0.1	0.1	1	0.05	0.1
Laju Alir (L/h)	55 (Gas Alam + Air + C <sub>5</sub> /C <sub>6</sub> )	N <sub>2</sub>	300 (Gas Alam)	90 (N <sub>2</sub> )	60( N <sub>2</sub> )
C in(ug/m <sup>3</sup> )	4000-10000		36	160	55
Waktu kontak	0.11s			0.035 s	
Kecepatan alir	6.9 cm/s				
<i>Breakthrough</i>	1000 ug/m <sup>3</sup>		100%	100%	100%

Parameter Uji	AC-S	UOP Carbon	HGR- S	HGR (10-15% S)	BPL-S-4/1-600
	Penelitian ini	(Reddy, Shoaibi, & Srinivasakannan, 2018)	(Chemrache, Benderdouche, Bestani, Benallou, & Cagnon, 2018)	(S. H. Lee & Park, 2003)	(Liu, Vidic, & Brown, 2000)

Hasil dari penelitian adsorben karbon aktif diimpregnasi sulfur lainnya yang diuji skala lab dipaparkan pada lampiran 8. Dari penelitian tersebut, kapasitas adsorpsi terbesar adalah 25 mg Hg/g Adsorben(S. H. Lee & Park, 2003) . Dibandingkan penelitian ini, penelitian yang dilakukan oleh Lee & Park(2003) menggunakan jumlah adsorben lebih sedikit, laju alir lebih besar, dan konsentrasi merkuri yang lebih rendah sehingga jika diuji dengan kondisi pengujian saat ini, kapasitas adsorpsi tidak berbeda signifikan.

Sano et al.(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, karbon aktif yang diuji lebih banyak 20 kali. Karena tidak ada informasi mengenai ukuran partikel adsorben yang diuji, luas permukaan karbon aktif mencapai 1444 m<sup>2</sup>/g umumnya didapat dengan ukuran partikel dengan mesh yang lebih besar dari 80. Mempertimbangkan hal tersebut, maka dapat karbon aktif yang diimpregnasi sulfur 16% memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih baik dibandingkan karbon aktif yang dikembangkan oleh Sano et al.(2003).

Dari hasil uji kapasitas adsorpsi, karbon aktif AC-CuS yang diimpregnasi dalam larutan CuS dan NaS memiliki kapasitas adsorpsi 2.5-27.1 mg Hg/ g adsorben(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, Shoaibi, & Srinivasakannan, 2018; Suresh Kumar Reddy, Alshoaibi, & Srinivasakannan, 2015). Detail data pengujian dipaparkan pada lampiran 9. Kedua penelitian tersebut diatas menggunakan karbon aktif dengan surface

area lebih besar dari 1000 m<sup>2</sup>/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.

Penelitian lain yang melakukan impregnasi dengan larutan ZnCl<sub>2</sub> 5% hanya mendapatkan kapasitas 0.9 mg Hg/g Adsorben(Zeng, Jin, & Guo, 2004). Prosedur pembuatan karbon aktif pada penelitian Zeng et al, 2004, sama dengan yang dilakukan saat ini, sehingga kapasitas adsorpsi karbon aktif yang dihasilkan pada penelitian ini masih lebih baik dibandingkan penelitian sebelumnya.

## BAB III PENUTUP

### A Kesimpulan

Telah dilakukan penelitian untuk membuat adsorben karbon aktif merkuri dalam gas bumi dengan tahapan :

- a. Desain dan pembuatan alat uji kinerja adsorben yang dapat menghasilkan gas dengan konsentrasi merkuri hingga  $10 \text{ mg Hg/m}^3$  dan suhu saturasi air dan hidrokarbon  $15^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$ , dan  $40^\circ\text{C}$  serta mengukur volume gas yang mengalir, konsentrasi merkuri inlet dan outlet adsorben
- b. Screening, pembuatan dan optimasi metode pembuatan adsorben karbon aktif AC-S, AC-CuS, dan AC-ZnCl<sub>2</sub>
- c. Uji kinerja adsorben dengan gas yang dijenuhkan hidrokarbon berat dan air pada suhu  $15^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$ , dan  $40^\circ\text{C}$ , tekanan gas 40 psig, dan laju alir 55 L/jam.
- d. Uji Karakterisasi SEM-EDX, BET, dan FTIR

Dari tahapan diatas, didapatkan bahwa 2 metode impregnasi adsorben yang menghasilkan kapasitas adsorpsi terbaik adalah dengan impregnasi karbon aktif lokal menggunakan:

- a. Sulfur pada suhu  $525^\circ\text{C}$  selama 1 jam dengan rasio Karbon:sulfur 1:3 dengan kapasitas adsorpsi rata-rata  $50.9 \text{ mg Hg/g Adsorben}$
- b. Larutan 100 ml larutan CuCl<sub>2</sub> 34 g/L dilanjutkan dengan impregnasi sulfur 1:4 dengan kapasitas adsorpsi rata-rata  $30.4 \text{ mg/g Adsorben}$

### B Saran

- a. Pada saat *scale up*, sebaiknya dilakukan uji untuk memastikan sulfur tidak terbawa aliran gas dan mengkontaminasi sistem setelah adsorben merkuri
- b. Perlu peningkatan kemampuan alat uji kinerja sebagai berikut:



- 1) Perbaikan sistem saturasi gas dengan merkuri, air, dan hidrokarbon berat yang relatif stabil sehingga meningkatkan akurasi pengujian
- 2) Peningkatan tekanan uji kinerja adsorben dari 40 menjadi 500-1000 psig agar didapatkan kondisi uji yang lebih representative
- 3) *Upscale* sistem uji kinerja agar dapat mengakomodir peningkatan skala pengujian dari 0.1 gram menjadi 50-200 gram adsorben

## DAFTAR PUSTAKA

- Axens. (2015). Axens Blog | How to remove Mercury from extracted natural gas? - Axens Blog. Retrieved October 31, 2020, from <https://www.axens.net/blog/business-news/how-to-remove-mercury-from-extracted-natural-gas/>
- Boschee, P. (2013). Advancements in the Removal of Mercury From Crude Oil. *Applied Energy*, 55(3–4), 271–284. [https://doi.org/10.1016/s0306-2619\(96\)90042-2](https://doi.org/10.1016/s0306-2619(96)90042-2)
- Brennan, J. K., Thomson, K. T., & Gubbins, K. E. (2002). Adsorption of water in activated carbons: Effects of pore blocking and connectivity. *Langmuir*, 18(14), 5438–5447. <https://doi.org/10.1021/la0118560>
- Chalkidis, A., Jampaiah, D., Hartley, P. G., Sabri, Y. M., & Bhargava, S. K. (2020, January 15). Mercury in natural gas streams: A review of materials and processes for abatement and remediation. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 382. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121036>
- 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 Journal of Chemical Engineering*, 96(1), 241–249. <https://doi.org/10.1002/cjce.22944>
- Duan, X. L., Yuan, C. G., Jing, T. T., & Yuan, X. D. (2019). Removal of elemental mercury using large surface area micro-porous corn cob activated carbon by zinc chloride activation. *Fuel*, 239(August 2018), 830–840. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.017>
- Feng, W., Borguet, E., & Vidic, R. D. (2006a). Sulfurization of a carbon surface for vapor phase mercury removal - II: Sulfur forms and mercury uptake. *Carbon*, 44(14), 2998–3004. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.05.053>
- Feng, W., Borguet, E., & Vidic, R. D. (2006b). Sulfurization of a carbon surface for vapor phase mercury removal - II: Sulfur forms and mercury uptake. *Carbon*, 44(14), 2998–3004. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.05.053>
- Gas Processors Suppliers Association. (2012). *GPSA Databook 13th Edition* (13th ed.).
- Granite, E. J., Pennline, H. W., & Hargis, R. A. (2000). Novel sorbents for mercury removal from flue gas. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 39(4), 1020–1029. <https://doi.org/10.1021/ie990758v>
- Hampton, C., Demoin, D., & Glaser, R. E. (2010). *VIBRATIONAL SPECTROSCOPY TUTORIAL: SULFUR AND PHOSPHORUS Organic Spectroscopy*.
- Hsi, Hsing Cheng, 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 and Technology*, 35(13), 2785–2791. <https://doi.org/10.1021/es001794k>
- Hsi, Hsing Chengi, Tsai, C. Y., Kuo, T. H., & Chiang, C. S. (2011). Development of low-concentration mercury adsorbents from biohydrogen-generation agricultural residues using sulfur impregnation. *Bioresource Technology*, 102(16), 7470–7477. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.05.036>
- Hsi, N. C., Rood, M. J., Rostam-Abadi, M., Chen, S., & Chang, R. (2002). Mercury adsorption properties of sulfur-impregnated adsorbents. *Journal of Environmental Engineering*, 128(11), 1080–1089. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2002\)128:11\(1080\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2002)128:11(1080))
- Jang, H., Back, S., Sung, J., Jeong, B., Kang, Y., Lee, C., ... Seo, Y. (2017). Adsorption and kinetics of elemental mercury vapor on activated carbons impregnated with potassium iodide, hydrogen chloride, and sulfur. 34(3), 806–813. <https://doi.org/10.1007/s11814-016-0305-1>
- Jang, H. N., Back, S. K., Sung, J. H., Jeong, B. M., Kang, Y. S., Lee, C. K., ... Seo, Y. C. (2017a). Adsorption and kinetics of elemental mercury vapor on activated carbons impregnated with potassium iodide, hydrogen chloride, and sulfur. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 34(3), 806–813. <https://doi.org/10.1007/s11814-016-0305-1>
- Jang, H. N., Back, S. K., Sung, J. H., Jeong, B. M., Kang, Y. S., Lee, C. K., ... Seo, Y. C. (2017b). Adsorption and kinetics of elemental mercury vapor on activated carbons impregnated with potassium iodide, hydrogen chloride, and sulfur. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 34(3), 806–813. <https://doi.org/10.1007/s11814-016-0305-1>
- Korpiel, J. A., & Vidic, R. D. (1997). Effect of sulfur impregnation method on activated carbon uptake of gas-phase mercury. *Environmental Science and Technology*, 31(8), 2319–2325. <https://doi.org/10.1021/es9609260>
- Kwon, S., & Vidic, R. D. (2000). Evaluation of two sulfur impregnation methods on activated carbon and bentonite for the production of elemental mercury sorbents. In *Environmental Engineering Science* (Vol. 17). <https://doi.org/10.1089/ees.2000.17.303>
- Lee, S. H., & Park, Y. O. (2003). Gas-phase mercury removal by carbon-based sorbents. *Fuel Processing Technology*, 84(1–3), 197–206. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(03\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(03)00055-9)
- Lee, S. J., Seo, Y. C., Jung, J., & Lee, T. G. (2004). Removal of gas-phase elemental mercury by iodine- and chlorine-impregnated activated carbons. *Atmospheric Environment*, 38(29), 4887–4893. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.05.043>

- 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 and Technology*, 34(3), 483–488. <https://doi.org/10.1021/es9813008>
- Liu, W., Vidić, R. D., & Brown, T. D. (1998). Optimization of sulfur impregnation protocol for fixed-bed application of activated carbon-based sorbents for gas-phase mercury removal. *Environmental Science and Technology*, 32(4), 531–538. <https://doi.org/10.1021/es970630+>
- Morishige, K., Kawai, T., & Kittaka, S. (2014). Capillary condensation of water in mesoporous carbon. *Journal of Physical Chemistry C*, 118(9), 4664–4669. <https://doi.org/10.1021/jp4103564>
- Mukamurara, D., Liu, X., Chen, S., Ren, S., Munyemana, J. C., & Zou, J. (2019). Optimization of Fixed-Bed Design for Natural Gas Mercury Removal by Sulfur Doped into Porous Activated Carbon. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, Vol. 07, pp. 13–25. <https://doi.org/10.4236/msce.2019.72002>
- Pitaloka, A., & Rosmayati, L. (2011). Optimalisasi Aktivasi Karbon Aktif Tempurung Kelapa Dengan Ragam Suhu Dan Konsentrasi Aktivator ZnCl<sub>2</sub>. *Laporan Skripsi*.
- Reddy, K. S. K., Shoaibi, A. Al, & Srinivasakannan, C. (2018). Mercury removal using metal sulfide porous carbon complex. *Process Safety and Environmental Protection*, 114, 153–158. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.12.022>
- Rios, J. A., Coyle, D. A., Durr, C. A., & Frankie, B. M. (1998). Removal of trace mercury contaminants from gas and liquid streams in the LNG and gas processing industry. *Proceedings, Annual Convention - Gas Processors Association*, 191–196.
- Saka, C. (2012). BET, TG-DTG, FT-IR, SEM, iodine number analysis and preparation of activated carbon from acorn shell by chemical activation with ZnCl<sub>2</sub>. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 95(May 2012), 21–24. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.12.020>
- Sano, A., Takaoka, M., & Shiota, K. (2017). Vapor-phase elemental mercury adsorption by activated carbon co-impregnated with sulfur and chlorine. *Chemical Engineering Journal*, 315, 598–607. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.035>
- Skodras, G., Diamantopoulou, I., Natas, P., Palladas, A., & Sakellaropoulos, G. P. (2005). Postcombustion measures for cleaner solid fuels combustion: Activated carbons for toxic pollutants removal from flue gases. *Energy and Fuels*, 19(6), 2317–2327. <https://doi.org/10.1021/ef050112h>
- Skodras, G., Orfanoudaki, T., Kakaras, E., & Sakellaropoulos, G. P. (2002). Production of special activated carbon from lignite for environmental purposes. *Fuel Processing Technology*, 77–78, 75–87.

[https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(02\)00062-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(02)00062-0)

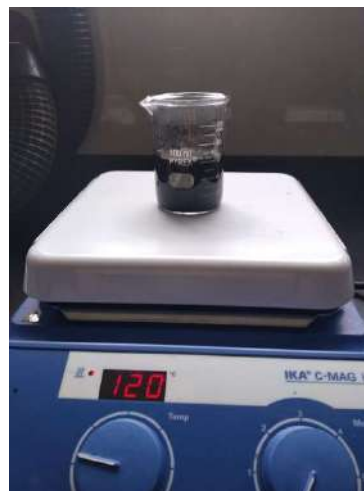
- Suresh Kumar Reddy, K., Alshoaibi, A., & Srinivasakannan, C. (2015). High efficient metal sulphide based porous carbon matrix for mercury removal. *Society of Petroleum Engineers - Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, ADIPEC 2015*.
- Vidic, R. D., Chang, M. T., & Thurnau, R. C. (1998). Kinetics of vapor-phase mercury uptake by virgin and sulfur-impregnated activated carbons. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 48(3), 247–255. <https://doi.org/10.1080/10473289.1998.10463674>
- Wang, F., Tan, S., Cao, Y., Wang, D., Wu, J., Luo, F., ... Zhou, M. (2020). Experimental Study on the Influence of Surface Characteristics of Activated Carbon on Mercury Removal in Flue Gas. *Energy & Fuels*, 34(5), 6168–6177. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c00611>
- Zeng, H., Jin, F., & Guo, J. (2004). Removal of elemental mercury from coal combustion flue gas by chloride-impregnated activated carbon. *Fuel*, 83(1), 143–146. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00235-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00235-7)

## LAMPIRAN

### Lampiran 1 Foto Pembuatan Karbon Aktif yang Diimpregnasi Sulfur



Lampiran 2 Foto Pembuatan Karbon Aktif yang Diimpregnasi Tembaga-Sulfur, Metode Impregnasi dalam Larutan

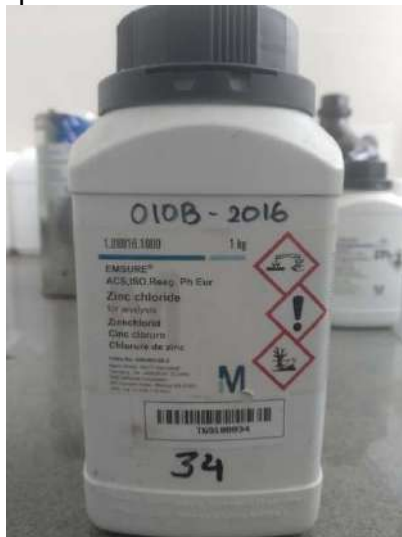


Lampiran 3 Pembuatan Karbon Aktif yang Diimpregnasi Tembaga-Sulfur  
(Metode Impregnasi Suhu 500oC)

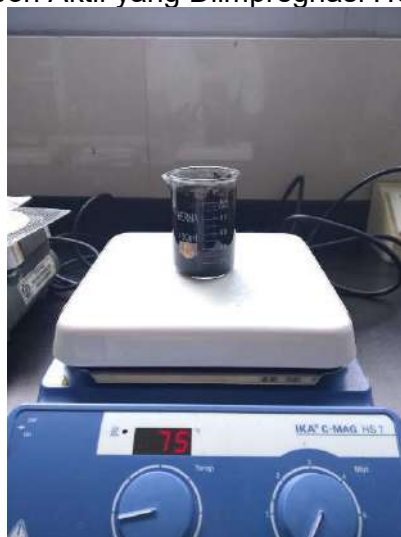




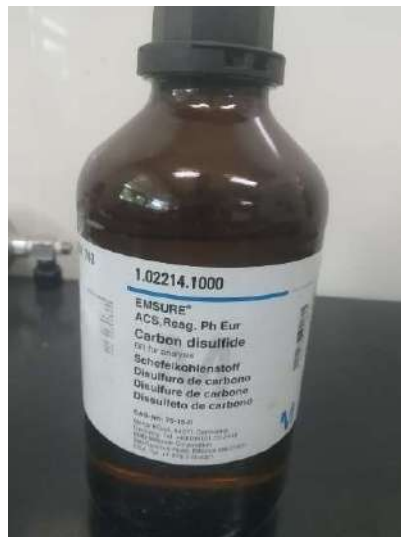
Lampiran 4 Foto Pembuatan Karbon Aktif yang Diimpregnasi ZnCl<sub>2</sub>



Lampiran 5 Foto Pembuatan Karbon Aktif yang Diimpregnasi HCl



Lampiran 6 Foto Pembuatan Karbon Aktif yang Diimpregnasi CS<sub>2</sub>



Lampiran 7 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Berbagai Metode Pembuatan Adsorben Merkuri

No	Adsorben	Kapasitas (ug Hg/g)	Kondisi	Properties	Prep	Particle size	Reff	Uji Kapasitas
1	WAC-1000			BET 766			(Wang et al., 2020)	
	DAC-50 (Benzoic acid impregnated carbon)	917	100°C	BET 473		150-200 mesh		60ug Hg/m <sup>3</sup> , 60 mgAC, +1 g Quartz sand, 72 L/h, , Saturated breakthrough time, N <sub>2</sub> , 100°C, adsorption time 360 min
	DAC-100	1311.8		BET 445				
	DAC-150	1133		BET 137				
2	S-AC-350	<b>21000</b>	60C	%S17.53 %.	30-40 mesh washed, mix sulfur:AC(1:10) in ceramic bowl, put in tubular furnace 350°C with N <sub>2</sub> flow 60 ml/min.	20x40 mesh	(Mukamura et al., 2019)	100 mg, <b>Saturated breakthrough</b> time, N <sub>2</sub> , no information desired concentration & flow rate, <b>the Hg<sub>0</sub> removal efficiency has been calculated considering the same obtained Hg outlet concentration 40 µg/m<sup>3</sup></b>
3	Virgin carbon	1039 - 528	50- >100 °C	surface area 2355 m <sup>2</sup> /g			(Reddy et al., 2018)	100 mg Adsorbent, N <sub>2</sub> gas, permeation tube, Hg dalam adsorben dianalisa untuk menghitung kapasitasnya, tidak ada info hingga C out berapa uji kapasitas dihentikan
	Sulfur impregnated AC	598-2450	50- >100 °C	S content 12.3%				

No	Adsorben	Kapasitas (ug Hg/g)	Kondisi	Properties	Prep	Particle size	Reff	Uji Kapasitas
	<b>UOP Carbon</b>	<b>532-2315</b>	50- >100 °C	S content 1.7%				
	AC-CuS	6604- 23015	50- >100 °C	S content 4.9%, surface area 2244 m <sup>2</sup> /g	1 g powdered carbon+0.2g MS (25 ml ammonium)- >Sonication 3 h, filtered & dried overnight			
	AC-ZnS	4423- 18893	50- >100 °C	S content 4.8%, surface area 2215 m <sup>2</sup> /g				
	AC-FeS	3718- 13989	50- >100 °C	S content 5.0%, surface area 1064 m <sup>2</sup> /g, gas matrix N2				
3	AC-KI 5%	333.3	80-120 °C	BET 317.9				
	AC-CS2 1%	256.4	80-120 °C	BET 664.5			(H. N. Jang et al., 2017b)	420 ug/m <sup>3</sup> , 1 g AC, 1 m <sup>3</sup> /h
	AC-HCl 1%	333.3	80-120 °C	BET 585.5				

No	Adsorben	Kapasitas (ug Hg/g)	Kondisi	Properties	Prep	Particle size	Reff	Uji Kapasitas
4	AC	1200	140°C	BET 1673	K2S solution in AC		(Sano et al., 2017)	36 ml/h air, 8 mg/m <sup>3</sup> Hg, 2 gram sample, So the space velocity and residence time were $7.96 \times 10^{-3}$ m·s <sup>-1</sup> and 2.51 s. Breakthrough time 0.08 mg/m <sup>3</sup>
	AC-S	21000		BET 1444, 6.7% S				
	AC-Cl	38000		BET 1356				
	AC-Cl-S	77000		BET 919				
	AC-S-Cl	96000		BET 832				
4A	GAC-Olive stone AC	151	Room suhu	881		0.5-1.6 mm	(Chemrak et al., 2018)	<b>Natural gas</b> , 36 ug/m <sup>3</sup> , 1 g, 5 L/min, Cout/Cin=1, 10 days test for S impregnated carbon
	<b>HGR-Commerci al Sulfur impregnated AC</b>	<b>2414</b>	Room suhu	868, 12.3% S				
	GACS-Sulphur impregnated Olive stone AC	2864	Room suhu	1029, 11.7% S	SCR 1:4, 600 C, 60ml/min N2 2 h, cooling, wash with 6 mol/L HNO3, 5 h			
4	AC-MS	15000	140°C		100 mg AC	AC+CuCl2 solution, +drop wise Na2S solution,	(Suresh Kumar Reddy et al., 2015)	100 mg Adsorbent, N2 gas, permeation tube, Hg dalam adsorben dianalisa untuk menghitung kapasitasnya, tidak ada info hingga C out berapa uji kapasitas dihentikan

No	Adsorben	Kapasitas (ug Hg/g)	Kondisi	Properties	Prep	Particle size	Reff	Uji Kapasitas
						washed, dried		
4	CAC	119	25 °C	BET 915	Mixed 1:1 SCR in a ceramic boat, heated in tubular furnace(300, 400, 650C,3), UHP N2 <50 mL/min, ground to obtain 140- 270 mesh	140-270	(Hsing Chengi Hsi et al., 2011)	10 mg sample+5 g sand, 60 L/h N2, 10-15ug Hg/m3, residence time 0.3s, Uji kapasitas stop Ketika adsorben sudah hampir jenuh
	CAC-300S	161		BET 11.6				
	CAC-400S	171		BET 328				
	CAC-600S	105		BET 797				
5	AC-H-S-C(Heating stabel, cooling)	1100	140°C	BET 900-2000	AC with H2S flow 3000 ppm H2S stream during heating, stabel 600C , cooling	16-50	(Feng, Borguet, & Vidic, 2006b)	350ug/m <sup>3</sup> , 33 L/h, N <sub>2</sub> , the mercury adsorption capacity was calculated by integrating the area above the breakthrough curve
5	Calgon F400-Sulfur impregnated	655	50°C, 360 min	BET 310, particle size 20 mg+1 g sand	Mixed sulfur & carbon, 2 h, 600°C.(Skodras, Orfanoudaki, Kakaras, & Sakellaropoulos, 2002)	150-250 um,	(Skodras et al., 2005)	350 ug Hg/m <sup>3</sup> Sulfur, matrix N <sub>2</sub> , 20 mg Adsorbent+1 g sand
	RWE active coke	1158	50°C, 360 min	BET 779, 20 mg+1 g sand				
6	AC-ZnCl 5%	900	50°C	BET 277	impregnation with 1 or 5% (w/v) ZnCl <sub>2</sub>	0.28 mm	(Zeng et al., 2004)	Flue gas from coal combustion, 140-200°C

No	Adsorben	Kapasitas (ug Hg/g)	Kondisi	Properties	Prep	Particle size	Reff	Uji Kapasitas
					solution for 12 h. The solution to activated carbon ratio of 0.55 ml/g was used.			
7	AC-KI	680.2-847.5	80-140°C	BET 244-488		14-16 mesh	(S. J. Lee et al., 2004)	300 ug/m <sup>3</sup> inlet, 4 jam pengujian, breakthrough 30-84 ug/m <sup>3</sup>
	AC-HCI	645.9-537.4	80-140°C	BET 398-434				
7a	BPL			BET 1008, average pore 19.5A		4x12 (Bituminous coal)	(S. H. Lee & Park, 2003)	Inlet 160 ug/m <sup>3</sup> , 30°C, contact time 0.035 s, nitrogen flow (10–500 cm <sup>3</sup> /min) and diluted with nitrogen flow (1 l/min). 6-mm column with 50 mg AC, Adsorption time was varied (3–50 h)
	Kuraray-GW			BET 1237, average pore 17		16x30 (Coconut)		
	DY			BET 1179, average pore 16.8		Pellet(Bituminous coal)		
	SH			BET 1017, average pore 23.7		4x8(Bituminous coal)		
	BPL-S	1000						



No	Adsorben	Kapasitas (ug Hg/g)	Kondisi	Properties	Prep	Particle size	Reff	Uji Kapasitas
	CB-II (10-15% S)	11000		BET 462, average pore 24		4x10(Bituminous coal)		
	HGR(10-15% S)	18000		BET 573, average pore 24.8		4x8(Bituminous coal)		
	SH-S(8-13% S)	24000		BET -, average pore -		4x8(Bituminous coal)		
8	ACF-20-S400	2211-11343	135°C	BET 94, 20 mg sample+10 g sand, Sulfur content 44%	1:1 sulfur to adsorbent in a ceramic boat and heated in the tubular furnace (400°C, 6 h, UHP N2 <50 mL/min)		(Hsing Cheng Hsi et al., 2001)	20 mg samples+10 g sand, flue gas, 50 ug/m3, 135°C
9	Coal 5-S400 (Sulfur impregnation AC)	1444	163°C	BET 160, S content 21.3%, 20 mg sample, 10 g sand	1:1 sulfur to adsorbent in a ceramic boat and heated in the tubular furnace (400°C, 6 h, UHP N2 <50 mL/min)		(N. C. Hsi et al., 2002)	20 mg samples+10 g sand, flue gas, 50 ug/m3, 163°C
	Coal FGD3-S400	1062		BET 787, S content 22.4%				

No	Adsorben	Kapasitas (ug Hg/g)	Kondisi	Properties	Prep	Particle size	Reff	Uji Kapasitas
	Biomass PAC-S400	908		BET 452, S content 17.3%				
	Polymer ACF-20-S400	3260		BET 94, S content 44%				
9	BPL-S-4/1-600	2300		BET -820-870	3:2 S:C, 2h, 600C, other H <sub>2</sub> S +O <sub>2</sub> impregnation @150C	60-80 mesh	(Liu et al., 2000)	55 ug/m <sup>3</sup> , 1 L/min, 140°C, N <sub>2</sub>
10	I-AC (Iodine 3.5%)	3100	350 F	BET 750	10 mg sample +50 mg quartz woll, 30 ml/min Ar,	200-235 mesh	(Granite, Pennline, & Hargis, 2000)	Ar, 30 ml/min, breaking point 10% inlet conc, 5200 ug Hg/m <sup>3</sup>
	I-AC(Breaking point 330 min)	4800	350 F	BET 750		200-235 mesh		
	S-AC(Breaking point 4 min)(7.6% C)	400	350F	BET 690				
	S-AC (Breaking point 7)	3500	280 F	BET 690				

No	Adsorben	Kapasitas (ug Hg/g)	Kondisi	Properties	Prep	Particle size	Reff	Uji Kapasitas
	min)(7.6% C)							
	S-BPL-AC (5.9% AC)	1900	280 F	BET 690				
	CI-AC-1 (6% CI)	4000 (breaking point 70 min)	280 F	BET 550				
	CI-BPL- AC (6.7% CI)	2600	280 F	BET 1000				
	HNO3- AC-1	1200	280 F	BET 575				

Lampiran 8 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Penelitian Pembuatan Adsorben Merkuri dengan Impregnasi Sulfur

No	Adsorben	Kapasitas	Properties	Particle size	Berat	Flow rate	C in	Waktu kontak	Superficial velocity	D	Break-through	Reff
		(ug Hg/g)			(g)							
1	S-AC 525,	29.6-70 (50.9) mg Hg/g	S content 5%	60-80 mesh	0.1 gram	55 L/h N2	4-10 mg/m <sup>3</sup>	0.11	6.9 cm/s	6	1000 ug/m <sup>3</sup>	
2	S-AC-350	23.615	%S 10%.	20x40 mesh(A C-S) 180-200 mesh(sieved for capacity test)	0.1 gram							(Mukamurara et al., 2019)
3	Sulfur impregnated AC	598-2450	S content 12.3%	Powdered AC	0.1 gram							(Reddy, Shoaiibi, & Srinivasakannan, 2018)
	UOP Carbon	532-2315	S content 1.7%									
4	AC-S	21000	BET 1444, 6.7% S		2 gram	N2	8 mg/m <sup>3</sup>	2.51	0.796 cm/s			(Sano, Takaoka, & Shiota, 2017)
5	HGR-Commercial Sulfur impregnated AC	2414	868, 12.3% S	0.5-1.6 mm	1 gram	300 L/h Nat gas	36 ug/m <sup>3</sup>				100%	(Chemrak, Benderdouche, Bestani, Benallou, & Cagnon, 2018)

No	Adsorben	Kapasitas	Properties	Particle size	Berat	Flow rate	C in	Waktu kontak	Superficial velocity	D	Break-through	Reff
		(ug Hg/g)			(g)							
6	Norit 3	90	19.08%S, sa 612 m <sup>2</sup> /g, average pore D: 23.9A		0.1 gram	60 L/H, N2						Suresh Kumar Reddy, K. Al Shoaibi, Ahmed Srinivasakannan, C. 2014
	HGR-Commercial Sulfur impregnated AC	105	5.21%S, sa 573 m <sup>2</sup> /g, average pore D: 24.8A									
	UOP Carbon	150	1.7%S, sa - m <sup>2</sup> /g, average pore D: -A									
7	CAC-400S	171	BET 328	140-270	0.01 + 5 gram sand	60 L/h, N2	10-15 ug/m <sup>3</sup>	0.3 S			100%	(Hsing Chengi Hsi, Tsai, Kuo, & Chiang, 2011)
8	AC-H-S-C(Heating stabel, cooling)	1100	BET 900-2000	16-50		33 L/h, N2	350 ug/m <sup>3</sup>					(Feng, Borguet, & Vidic, 2006)
9	Calgon F400-Sulfur impregnated	655	BET 310, particle size 20 mg+1 g sand	150-250 um,	0.02 g+ 1 g sand		350 ug/m <sup>3</sup>					(Skodras, Diamantopoulou, Natas, Palladas, & Sakellaropoulos, 2005)
10	AC-SHS	25000			0.05 g	90 L/h, N2		0.035 s				
	BPL-S	2000				60					100%	

No	Adsorben	Kapasitas	Properties	Particle size	Berat	Flow rate	C in	Waktu kontak	Superficial velocity	D	Break-through	Reff
		(ug Hg/g)			(g)							
	CB-II (10-15% S)	11000	BET 462, average pore 24	4x10(Bituminous coal)			ug/m <sub>3</sub>					(S. H. Lee & Park, 2003) (deff meso)
	HGR(10-15% S)	18000	BET 573, average pore 24.8	4x8(Bituminous coal)								
11	ACF-20-S400	2211-11343	BET 94, 20 mg sample+10 g sang, Sulfur content 44%		0.02 g+10 g sand		50 ug/m <sub>3</sub>					(Hsing Cheng Hsi, Rood, Rostam-Abadi, Chen, & Chang, 2001)
12	Coal 5-S400 (Sulfur impregnation AC)	1444	BET 160, S content 21.3%		0.02 g+10 g sand		50 ug/g					(N. C. Hsi, Rood, Rostam-Abadi, Chen, & Chang, 2002)
	Coal FGD3-S400	1062	BET 787, S content 22.4%									
13	BPL-S-4/1-600	2300	BET -820-870	60-80 mesh	0.1 gram	60 L/h, N2	55 ug/m <sub>3</sub>			6 mm		(Liu, Vidic, & Brown, 2000)
14	S-AC(7.6% C)	400	BET 690			1.8 L/h Ar	5.2 mg/m <sub>3</sub>					(Granite, Pennline, & Hargis, 2000)
	S-AC (7.6% C)	3500	BET 690									
	S-BPL-AC (5.9% AC)	1900	BET 690									

Lampiran 9 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Penelitian Pembuatan Adsorben Merkuri dengan Impregnasi Logam Sulfida

No	Adsorben	Kapasitas (ug Hg/g)	Kondisi	Properties	Particle size	Uji Kapasitas	Reff
Current	Cu+20%S	13.8-59.81 (30.4) mg Hg/g	30-40°C	13.2% S, SA 434.9 m <sup>2</sup> /g	60-80	Inlet 2000 - 7000 ug/m <sup>3</sup> , P : 40 psig, flow rate 55 L/h, suhu 40°C.  Berat adsorben 0. 1 gram, diameter kolom 6 mm(1/4 in OD). densitas karbon aktif 0.56, maka tinggi kolom 0.75 cm, superficial velocity 6.9 cm/s, waktu kontak 0.11 s.	
	CuS	2.5-27.1 (rata-rata 12.1 mg Hg/g)					
2	AC-CuS	6604-23015	50->100 °C	S content 4.9%, surface area 2244 m <sup>2</sup> /g	powdered AC	Analisa Hg dalam adsorben	(Reddy, Shoaibi, & Srinivasakannan, 2018)
	AC-ZnS	4423-18893	50->100 °C	S content 4.8%, surface area 2215 m <sup>2</sup> /g			
	AC-FeS	3718-13989	50->100 °C	S content 5.0%, surface area 1064 m <sup>2</sup> /g, gas matrix N2			
3	AC-MS	15000	140°C		powdered AC	Analisa Hg dalam Adsorben	(Suresh Kumar Reddy, Alshoaibi, & Srinivasakannan, 2015)

Lampiran 10 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Penelitian Pembuatan Adsorben Merkuri dengan Impregnasi ZnCl<sub>2</sub>

No	Adsorben	Kapasitas (ug Hg/g)	Kondisi	Properties	Particle size	Reff
1	AC-ZnCl 6%	7000	30-40°C	456,4	60-80 mesh	
	AC-ZnCl 7%	5600	30-40°C	439,8	60-80 mesh	
	AC-ZnCl 8%	6400	30-40°C	306,8	60-80 mesh	
	AC-ZnCl 9%	6800	30-40°C	318,0	60-80 mesh	
2	AC-ZnCl 5%	900	50°C, flue gas	BET 277	0.28 mm	(Zeng, Jin, & Guo, 2004)
3	AC-ZnCl 5%	13.400 mg/g	150 C, N2		>40 mesh	Xue-Lei Duan 2019



Lampiran 11 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Penelitian Pembuatan Adsorben Merkuri Komersial

No	Adsorben	Kapasitas (ug Hg/g)	Properties	Particle size	Berat (g)	Flow rate	C in	Waktu kontak	Superficial velocity	D	Break- through	Reff
1	S-AC 525,	50900	S content 5%	60-80 mesh	0.1 gram	55 L/h N2	4-10 mg/ m3	0.11	6.9 cm/s	6	1000 ug/m3	
2	Sulfur impregnated AC	598-2450	S content 12.3%	Powder ed AC	0.1 gram							(Reddy, Shoaibi, & Srinivas akanna n, 2018)
	UOP Carbon	532-2315	S content 1.7%									
3	HGR- Commercial Sulfur impregnated AC	2414	868, 12.3% S	0.5-1.6 mm	1 gram	300 L/h Nat gas	36 ug/ m3				100%	(Chemr ak, Benderd ouche, Bestani, Benallo u, & Cagnon, 2018)
4	Norit 3	90	19.08%S, sa 612 m2/g, average		0.1 gram	60 L/H, He						Suresh Kumar Reddy, K.

No	Adsorben	Kapasitas	Properties	Particle size	Berat	Flow rate	C in	Waktu kontak	Superficial velocity	D	Break-through	Reff
		(ug Hg/g)			(g)							
			pore D: 23.9A									Al Shoaibi, Ahmed Srinivasakannan, C. 2014
	HGR-Commercial Sulfur impregnated AC	105	5.21%S, sa 573 m <sup>2</sup> /g, average pore D: 24.8A									
	UOP Carbon	150	1.7%S, sa - m <sup>2</sup> /g, average pore D: -A									
5	Calgon F400-Sulfur impregnated	655	BET 310, particle size 20 mg+1 g sand	150-250 um,	0.02 g+ 1 g sand		350 ug/ m <sup>3</sup>					(Skodras, Diamantopoulou, Natas, Palladas, & Sakellariopoulos, 2005)
6	BPL-S	2000									100%	

No	Adsorben	Kapasitas	Properties	Particle size	Berat	Flow rate	C in	Waktu kontak	Superficial velocity	D	Break-through	Reff
		(ug Hg/g)			(g)							
	CB-II (10-15% S)	11000	BET 462, average pore 24	4x10(Bituminous coal)	0.05 g	90 L/h, N2	160 ug/m3	0.035 s				(S. H. Lee & Park, 2003) (deff meso)
	HGR(10-15% S)	18000	BET 573, average pore 24.8	4x8(Bituminous coal)								
7	BPL-S-4/1-600	2300	BET -820-870	60-80 mesh	0.1 gram	60 L/h, N2	55 ug/m3			6 mm		(Liu, Vidic, & Brown, 2000)
8	S-AC(7.6% C)	400	BET 690			1.8 L/h Ar	5.2 mg/m3					(Granite, Pennline, & Hargis, 2000)
	S-AC (7.6% C)	3500	BET 690									
	S-BPL-AC (5.9% AC)	1900	BET 690									

Lampiran 12 Komposisi Gas Feed Gas Kilang LPG PT. BBWM

**PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN TEKNOLOGI MINYAK DAN GAS BUMI "LEMIGAS"**  
**LEMIGAS**  
**LABORATORIUM PPPTMGB "LEMIGAS"**  
 JL. CILEDUG RAYA-CIPULIR-KEBAYORAN LAMA-JAKARTA SELATAN 12230-INDONESIA  
 PD. BOX 1089/JKT, JAKARTA 10610, INDONESIA PHONE: 7394332 (direct line), 7394422 ext. 1981, 1980, 1939 TELEX: 47190, 47171 FAX: 021-7248150

**HASIL UJI**  
**TEST RESULT**

Nomor Percobaan / :                      Nomor Laporan / :  
 Sample Number                              Report Number (LHU)

**ANALISIS KOMPOSISI GAS BUMI**

Hasil laporan ini hanya berlaku untuk percobaan yang diuji dan tidak dapat digunakan sebagai ilian

Komposisi	Satuan	Hasil	Metode
• Nitrogen	% Mol	0.18	GPA 2261:2019
• Karbondioksida		2.76	
• Metana		67.67	
• Etana		12.26	
• Propana		11.52	
• Iso Butana		2.32	
• N- Butana		2.41	
• Iso Pentana		0.35	
• N- Pentana		0.26	
• Heksana plus		0.28	
Relative Density		0.8401	
Gross Heating Value (GHV)	BTU/FT <sup>3</sup>	1382,9697	GPA 2172:2019
Net Heating Value (NHV)	BTU/FT <sup>3</sup>	1258,4146	
Faktor Kompresibilitas, Z		0,9952	

**Keterangan:**  
Feed gas

Ketua Kelompok Pemurnian dan Analisis Gas

Eko Handoyo, ST  
NIP 19821209 200604 1 001

Laporan ini hanya berdasarkan percobaan yang diuji, tidak untuk diklaimkan dan tidak boleh digunakan.  
 This report relates only to the sample tested, may not be used for advertising purpose and not to be copied.

No. Form : F. 10. TEK. 05-A  
 No. Revisi : II 1  
 Halaman : 3 dari 4

PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN TEKNOLOGI MINYAK DAN GAS BUMI "LEMIGAS"

## LEMIGAS

LABORATORIUM PPPTMGB "LEMIGAS"

JL. CILEDUG RAYA-CIPULIR-KEBAYORAN LAMA-JAKARTA SELATAN 12230-INDONESIA

PO. BOX 1089/JKT, JAKARTA 10010, INDONESIA PHONE: 7394332 (direct line), 7394422 ext. 1961, 1960, 1689 TELEK: 47150, 47171 FAX: 021-7246150



### HASIL UJI TEST RESULT

Nomor Percontoh/ :  
Sample Number

Nomor Laporan / :  
Report Number (LHU)

### ANALISIS GAS BUMI

Hasil laporan ini hanya berlaku untuk percontoh yang diuji dan tidak dapat digunakan sebagai iklan

Komposisi	Satuan	Hasil	Metode
* Hidrogen sulfida	ppmv	224	ASTM D 2385
* Merkuri	ug/m3	0,08	
* Kadar air	lb/mmscf	70,0	ASTM D 1141

Keterangan:  
Feed Gas

Ketua Kelompok Pemurnian dan  
Analisis Gas



Eko Handoyo, ST  
NIP 19821209 200604 1 001

Laporan ini hanya berdasarkan percontoh yang diuji, tidak untuk diikhtisarkan dan tidak boleh digandakan.  
This report relates only to the sample tested, may not be used for advertising purpose and not to be copied.

No. Form	:	F. 10. BKG. 05-A
No. Revisi	:	II.1
Halaman	:	4 dari 4

Lampiran 13 Komposisi Gas Lean Gas Kilang LPG PT. BBWM

**PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN TEKNOLOGI MINYAK DAN GAS BUMI "LEMIGAS"**  
**LEMIGAS**  
**LABORATORIUM PPPTMGB "LEMIGAS"**  
JL. CILEDUG RAYA-CIPULIR-KEBAYORAN LAMA-JAKARTA SELATAN 12230-INDONESIA  
PO. BOX 1089/JKT, JAKARTA 10010, INDONESIA PHONE: 7394332 (Direct line), 7394422 ext. 1991, 1990, 1999 TELEK: 47150, 47171 FAX: 021-7246150



**HASIL UJI**  
**TEST RESULT**

Nomor Percontoh/ : \_\_\_\_\_ Nomor Laporan / : \_\_\_\_\_  
Sample Number \_\_\_\_\_ Report Number (LHU) \_\_\_\_\_

**ANALISIS KOMPOSISI GAS BUMI**

Hasil laporan ini hanya berlaku untuk percontoh yang diuji dan tidak dapat digunakan sebagai iklan

Komposisi	Satuan	Hasil	Metode
→ Nitrogen	% Mol	0.22	GPA 2261:2019
→ Karbondioksida		3.08	
→ Metana		76.88	
→ Etana		12.78	
→ Propana		6.13	
→ Iso Butana		0.51	
→ N- Butana		0.37	
→ Iso Pentana		0.02	
→ N- Pentana		0.00	
→ Heksana plus		0.00	
Relative Density		0,7191	
Gross Heating Value (GHV)	BTU/FT <sup>3</sup>	1186,4635	GPA 2172:2019
Net Heating Value (NHV)	BTU/FT <sup>3</sup>	1075,2074	
Faktor Kompresibilitas, Z		0,9967	

**Keterangan:**  
Lean gas

Ketua Kelompok Pemurnian dan Analisis Gas

Eko Handoyo, ST  
NIP 19821209 200604 1 001

Laporan ini hanya berdasarkan percontoh yang diuji, tidak untuk diklonen dan tidak boleh digunakan.  
This report relates only to the sample tested, may not be used for advertising purpose and not to be copied.

No. Form	:	F. 10. BKJ. 05-A
No. Revisi	:	II.1
Halaman	:	1 dari 4

PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN TEKNOLOGI MINYAK DAN GAS BUMI "LEMIGAS"

**LEMIGAS**

LABORATORIUM PPPTMGB "LEMIGAS"

JL. CILEDUG RAYA-CIPULIR-KEBAYORAN LAMA-JAKARTA SELATAN 12230-INDONESIA

PO. BOX 1086/JKT, JAKARTA 10610, INDONESIA PHONE: 7304332 (dirind 8ln), 7304422 ext. 1661, 1860, 1659 TELEX: 47150, 47171 FAX: 021-7246190



**HASIL UJI**  
**TEST RESULT**

Nomor Percontoh/ :  
Sample Number

Nomor Laporan / :  
Report Number (LHU)

**ANALISIS KOMPOSISI GAS BUMI**

Hasil laporan ini hanya berlaku untuk percontoh yang diuji dan tidak dapat digunakan sebagai iklan

Komposisi	Satuan	Hasil	Metode
* Hidrogen sulfida	ppmv	215,17	
* Merkuri	ug/m3	0,02	
* Kadar air	lb/mmscf	33,2	

**Keterangan:**  
Lean Gas

Ketua Kelompok Pemurnian dan Analisis Gas

Eko Handoyo, ST  
NIP 19821209 200604 1 001

Laporan ini hanya berdasarkan percontoh yang diuji, tidak untuk diiklankan dan tidak boleh digandakan.  
This report relates only to the sample tested, may not be used for advertising purpose and not to be copied

No. Form	:	F. 10. BKK. 05-A
No. Revisi	:	II 1
Halaman	:	2 dari 4

Lampiran 14 Hasil Optimasi Metode Pembuatan AC-S

No	Waktu (min)	Suhu (C)	% Sulfur	Kapasitas (mg Hg/g Adsorben)
1	60	450	14.9	2.47
2			40.4	3.66
3			41.0	1.32
4	60	475	26.7	5.81
5			48.1	1.58
6			51.1	0.96
7	60	500	22.4	18.33
8			36.0	17.62
9			39.2	5.47
10	60	525	9.0	48.75
11			15.1	32.63
12			19.0	11.7
13	60	550	4.4	37.75
14			5.8	23.58
15			8.7	28.09



Lampiran 15 Hasil Optimasi Metode Pembuatan AC-CuS (Impregnasi dalam Larutan)

No	Berat Cu (g)	Berat NaS (g)	Kapasitas (mg/g)
1	1.2	1.5	0.67
2		3	1.29
3		4.5	0.9
4	2.4	1.5	0.72
5		3	0.84
6		4.5	1.02
7	3.6	1.5	1.52
8		3	1.92
9		4.5	1.07
10	1.8	1	0.77
11		2	1.03
12		3	0.28
13	3.6	1	1.3
14		2	0.66
15		3	0.59
16	5.4	1	0.93
17		2	1.32
18		3	0.99

Lampiran 16 Hasil Optimasi Metode Pembuatan AC-CuS (Impregnasi pada Suhu Tinggi)

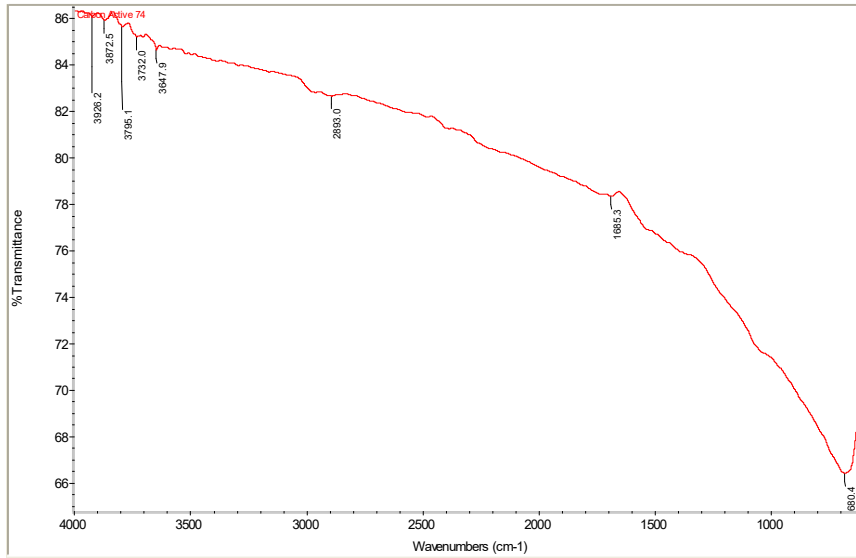
No.	Suhu	%S	Kapasitas (mg/g)
1	450	4.9	4.83
2		13.3	7.28
3		28.9	5.84
4	500	0.9	6.58
5		7.4	13.43
6		17.7	6.21
7	550	0	5.25
8		4.5	4.01
9		19.0	2.82

## Lampiran 17 Hasil Uji FTIR

PPPTMGB "LEMIGAS"  
KP3 Teknologi Gas

*Carbon Active 74*

Fri Nov 06 14:13:59 2020 (GMT+07:00)

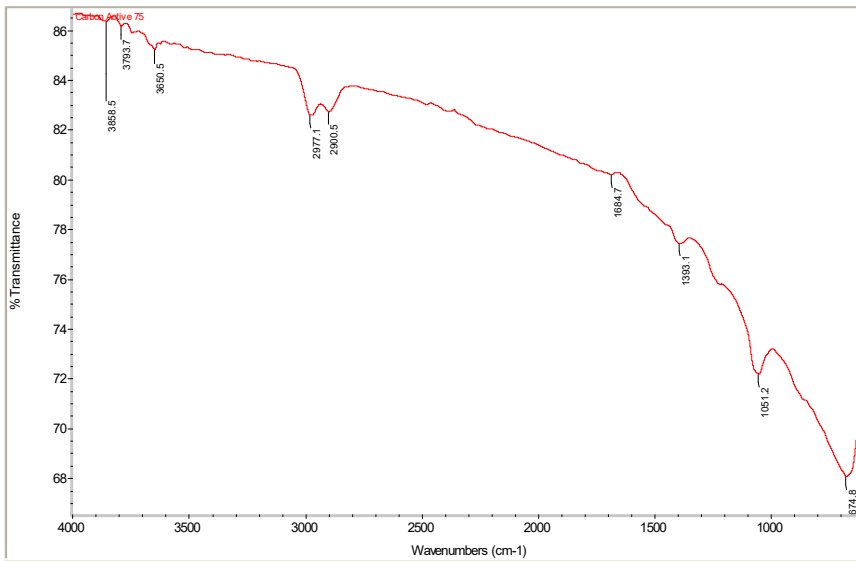


AC 74 33% S

PPPTMGB "LEMIGAS"  
KP3 Teknologi Gas

*Carbon Active 75*

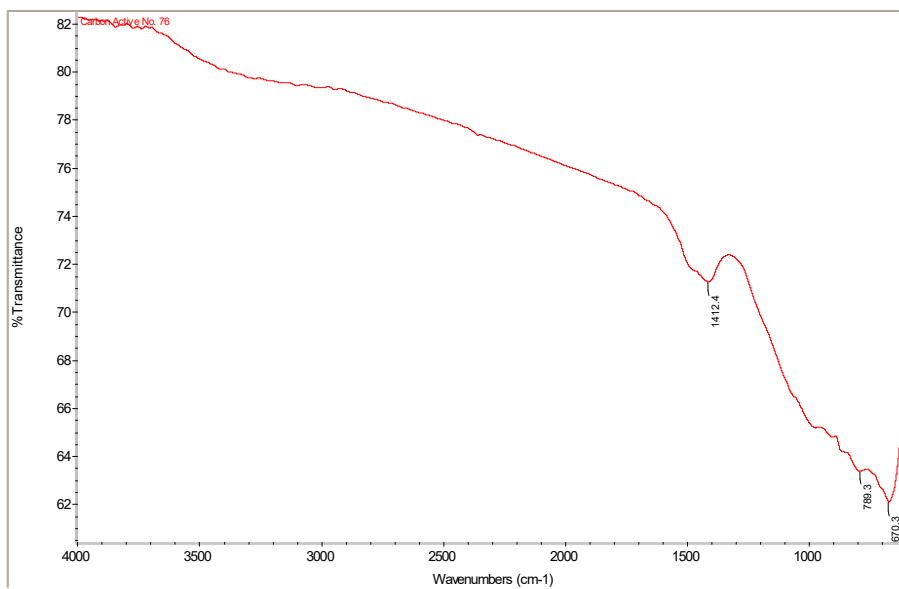
Fri Nov 06 14:17:20 2020 (GMT+07:00)



AC 74 75 16% S

PPPTMGB "LEMIGAS"  
KP3 Teknologi Gas

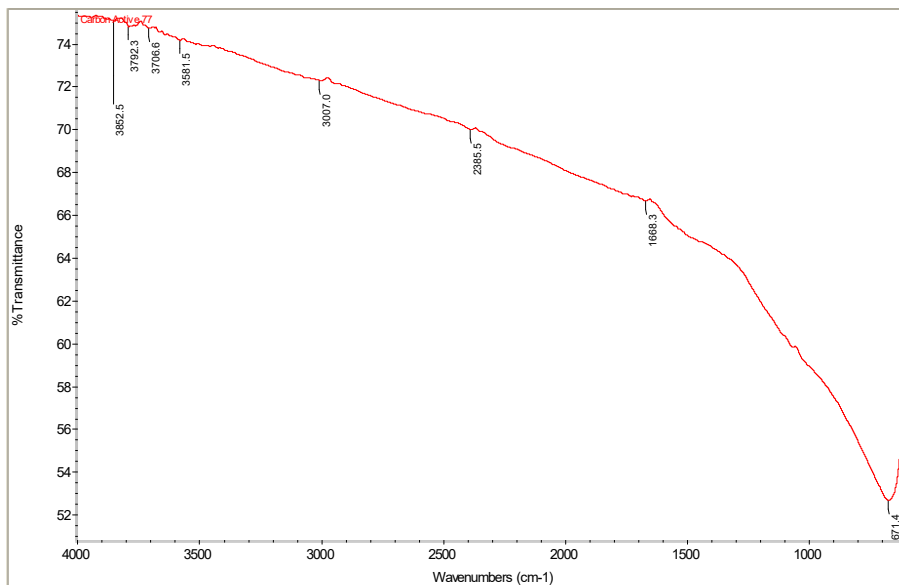
Carbon Active No. 76  
Fri Nov 06 14:09:37 2020 (GMT+07:00)



AC 76 50%S

PPPTMGB "LEMIGAS"  
KP3 Teknologi Gas

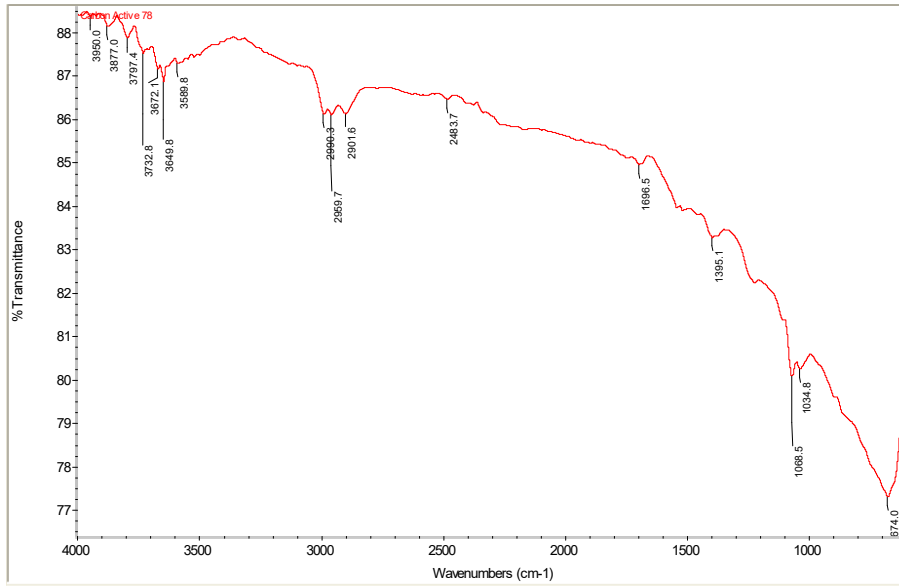
Carbon Active 77  
Fri Nov 06 14:09:54 2020 (GMT+07:00)



AC-CuS 77 13% S

PPPTMGB "LEMIGAS"  
KP3 Teknologi Gas

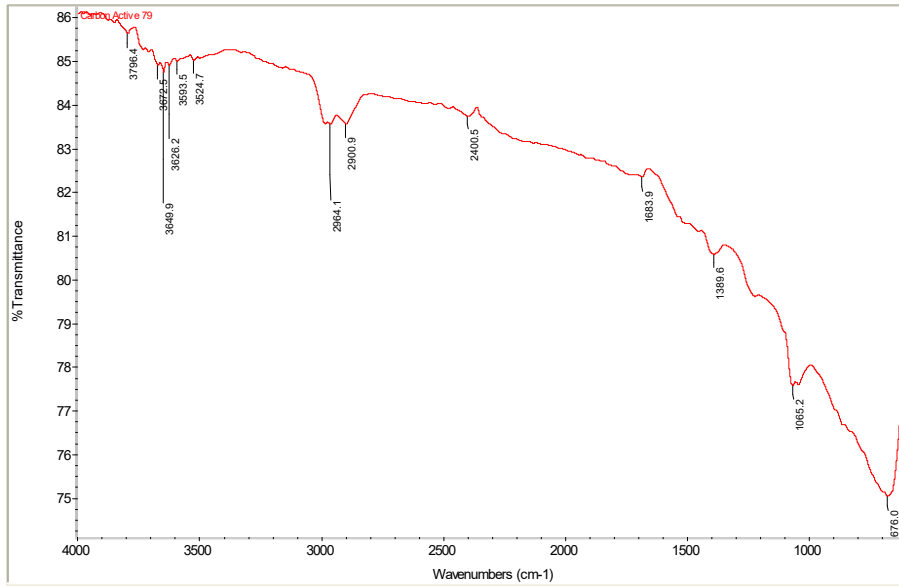
Carbon Active 78  
Fri Nov 06 14:30:34 2020 (GMT+07:00)



AC-CuS 78 20% S

PPPTMGB "LEMIGAS"  
KP3 Teknologi Gas

Carbon Active 79  
Fri Nov 06 14:33:23 2020 (GMT+07:00)

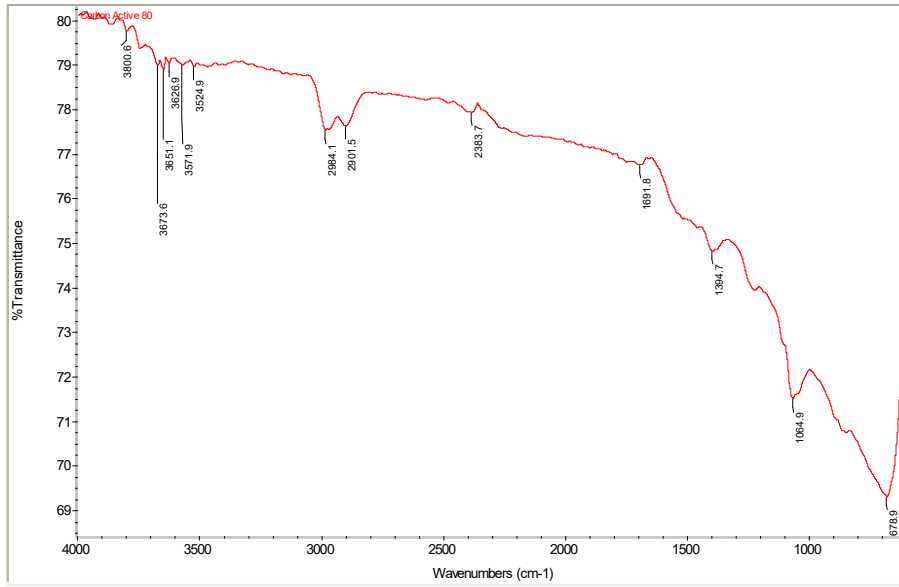


AC-CuS 79 33% S

PPPTMGB "LEMIGAS"  
KP3 Teknologi Gas

Carbon Active 80

Fri Nov 06 14:36:26 2020 (GMT+07:00)

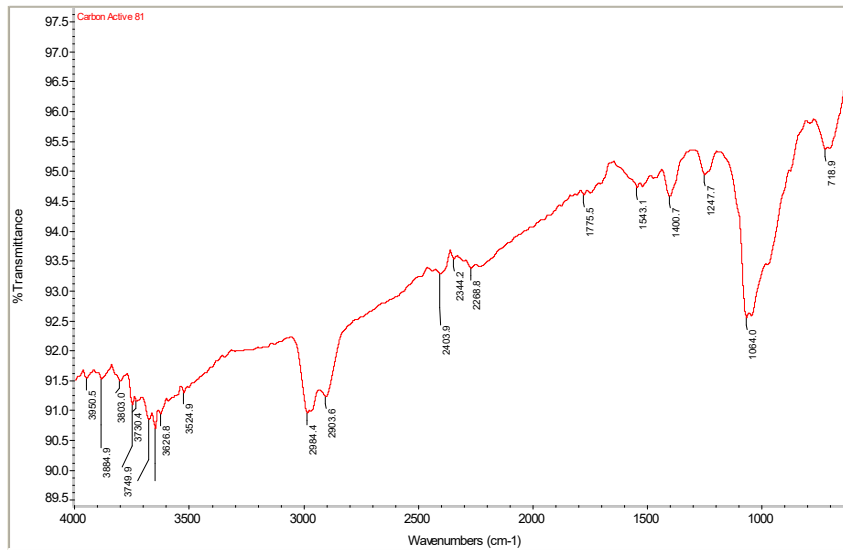


AC-CuS impregnasi dengan Larutan  $\text{CuCl}_2$  dan NaS

PPPTMGB "LEMIGAS"  
KP3 Teknologi Gas

Carbon Active 81

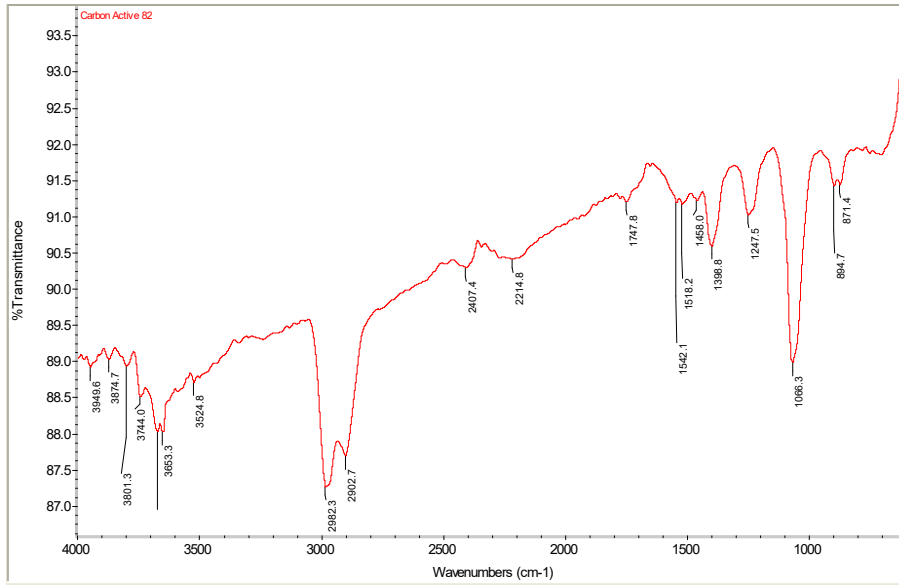
Fri Nov 06 14:39:46 2020 (GMT+07:00)



AC- $\text{ZnCl}_2$  6%

PPPTMGB "LEMIGAS"  
KP3 Teknologi Gas

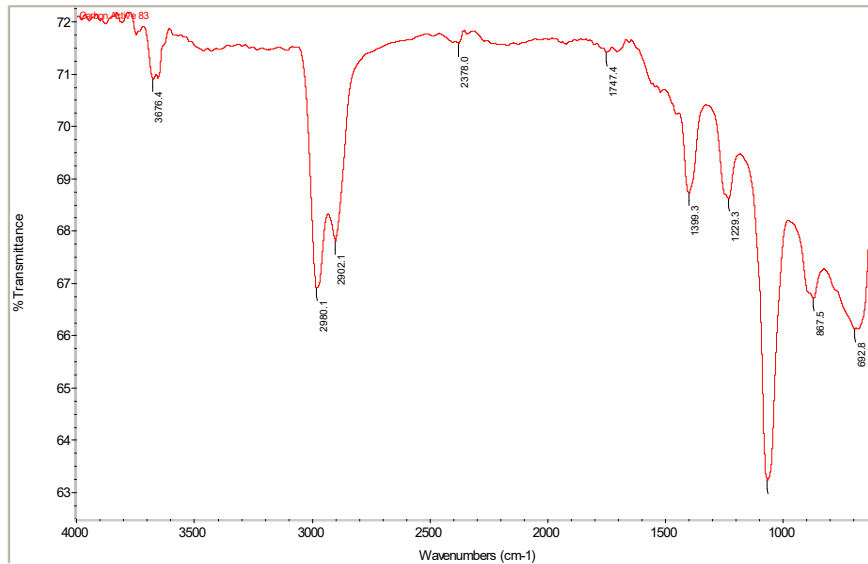
Carbon Active 82  
Fri Nov 06 14:42:28 2020 (GMT+07:00)



AC-ZnCl<sub>2</sub> 7%

PPPTMGB "LEMIGAS"  
KP3 Teknologi Gas

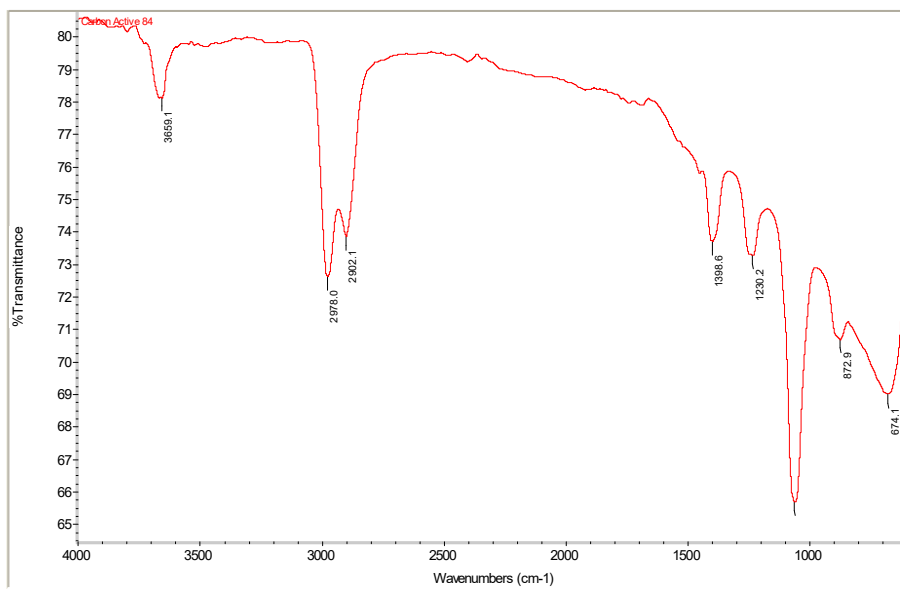
Carbon Active 83  
Fri Nov 06 14:45:10 2020 (GMT+07:00)



AC-ZnCl<sub>2</sub> 8%

PPPTMGB "LEMIGAS"  
KP3 Teknologi Gas

Carbon Active 84  
Fri Nov 06 14:48:23 2020 (GMT+07:00)

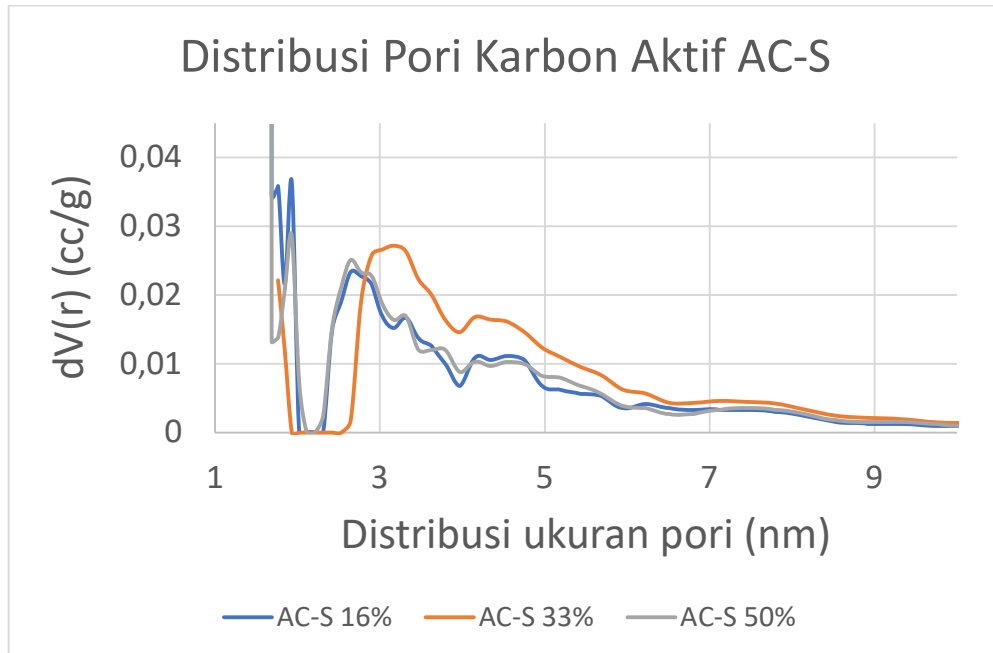


AC-ZnCl<sub>2</sub> 9%

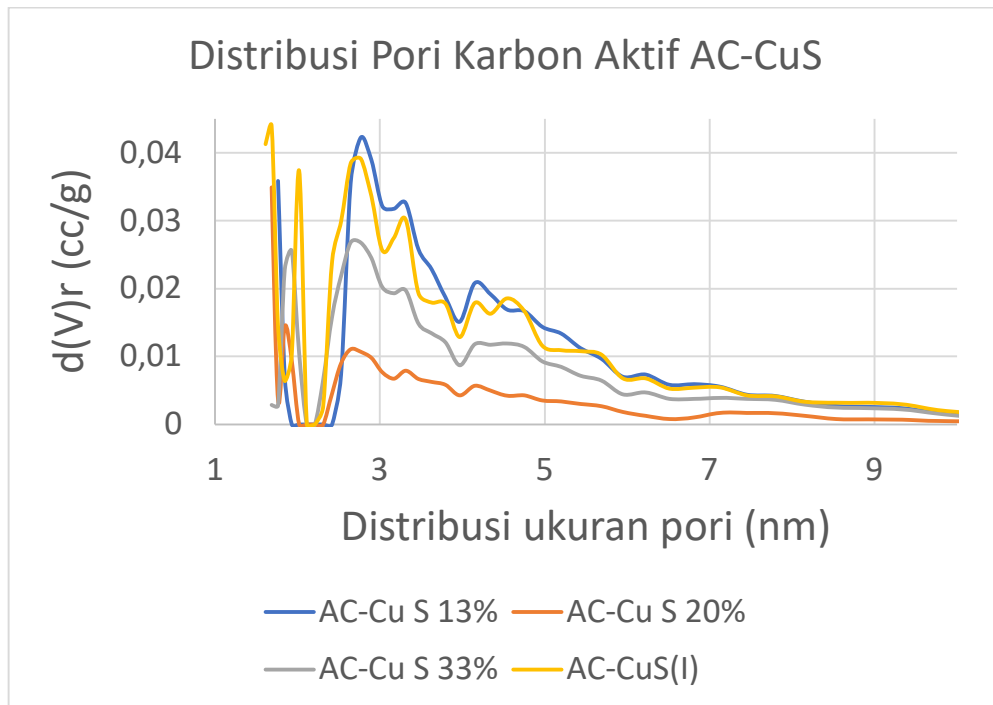


Lampiran 18 Hasil Uji BET

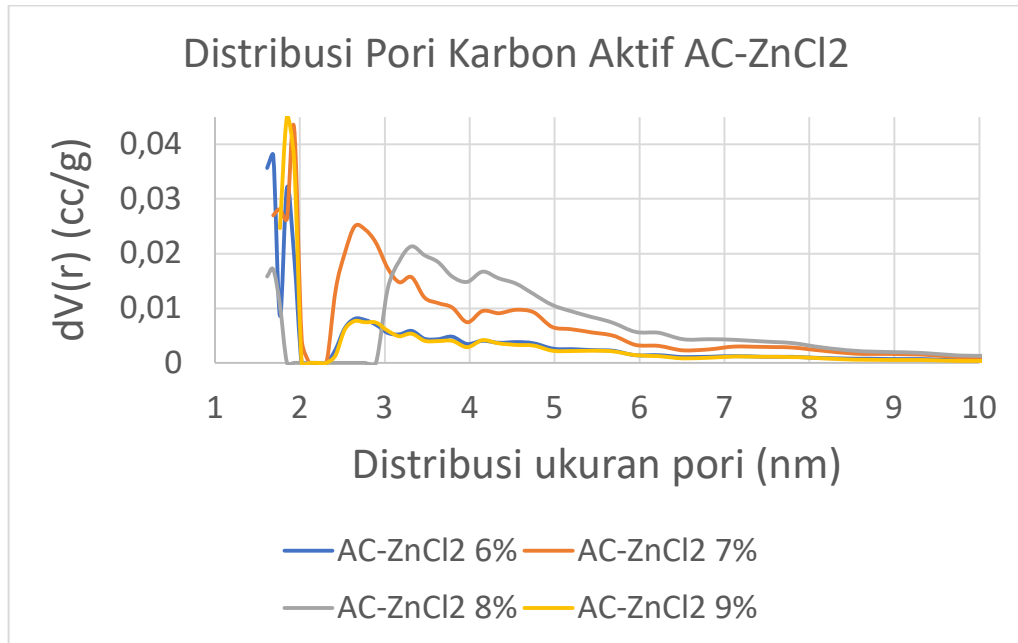
Karbon aktif	Surface Area (m <sup>2</sup> /g)	Micropore Surface Area (m <sup>2</sup> /g)	Mesopore/ Macropore Surface Area (m <sup>2</sup> /g)	Pore Volume (cc/g)	pore Radius (Angstrom)
Blanko	894,2	617.1	277.1	0,7860	13,24
AC-S 16%	510,3	378.4	131.9	0,4648	9,660
AC-S 33%	436,4	241.2	195.2	0,4796	15,850
AC-S 50%	308,3	164.5	143.8	0,3762	9,660
AC-Cu S 13%	634,2	407.9	226.3	0,6418	13,850
AC-Cu S 20%	434,9	359.9	75.0	0,3097	8,440
AC-Cu S 33%	260,6	89.4	171.2	0,3709	13,240
AC- CuS(l)	728,3	503.2	225.1	0,6874	8,440
AC-ZnCl <sub>2</sub> 6%	456,4	394.7	61.7	0,2981	8,440
AC-ZnCl <sub>2</sub> 7%	439,8	307.1	132.7	0,4238	9,660
AC-ZnCl <sub>2</sub> 8%	306,8	150.2	156.6	0,3825	16,580
AC-ZnCl <sub>2</sub> 9%	318,0	262.6	55.4	0,2350	9,234



Grafik DFT method Pore Size Distribution karbon aktif AC-S




Grafik DFT method Pore Size Distribution karbon aktif AC-CuS




Grafik DFT method Pore Size Distribution karbon aktif AC-ZnCl<sub>2</sub>

## Data Hasil Karakterisasi AC-S 16%

Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction for NOVA instruments ©1994-2013, Quantachrome Instruments version 11.03					
<b>Analysis</b>		<b>Date:</b> 2020/10/27		<b>Report</b>	
<b>Operator:</b>	quantachrome	<b>Filename:</b>	quantachrome	<b>Operator:</b>	quantachrome
<b>Sample ID:</b>	8093	<b>Comment:</b>	stn_6_26102020_6548-BET-EK-8093.gps	<b>Date:</b>	2020/11/02
<b>Sample Desc:</b>	Karbon Aktif 75	<b>Sample Volume:</b>	0.00994 cc	<b>Sample Density:</b>	3.41 g/cc
<b>Sample weight:</b>	0.0339 g	<b>Outgas Temp:</b>	250.0 C	<b>Equil timeout:</b>	240/240 sec (ads/des)
<b>Outgas Time:</b>	3.0 hrs	<b>Bath Temp:</b>	273.0 K	<b>Instrument:</b>	Nova Station B
<b>Analysis gas:</b>	Nitrogen	<b>Equil time:</b>	60/60 sec (ads/des)		
<b>Press. Tolerance:</b>	0.1000.100 (ads/des)	<b>End of run:</b>	2020/10/27 22:34:29		
<b>Analysis Time:</b>	403.1 min				
<b>Cell ID:</b>	12				
<b>Area-Volume Summary</b>					
<b>Data Reduction Parameters Data</b>					
<b>t-Method</b>		Thermal Transpiration: on		Eff. mol. diameter (D): 3.54 Å	
<b>BJH/DH method</b>		Calc. method: de Boer		Eff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm	
<b>HK method</b>		Moving pt. avg.: off		Ignoring P-tags below 0.35 P/Po	
<b>SF method</b>		Tabulated data interval: 1		Moving pt. avg: off	
<b>DFT method</b>		Calc. Model: N2 at 77 K on carbon (slit pore, NLDFT equilibrium model)		Liquid Density: 0.808 g/cc	
<b>Adsorbate</b>		Rel. press. range: 0.0000 - 1.0000			
<b>Adsorbent</b>		Nitrogen		Temperature: 77.350K	
		Molec. Wt.: 28.013		Cross Section: 16.200 Å²	
<b>Surface Area Data</b>					
SinglePoint BET.....		5.159e+02 m²/g			
MultiPoint BET.....		5.103e+02 m²/g			
Langmuir surface area.....		7.804e+02 m²/g			
BJH method cumulative adsorption surface area.....		1.466e+02 m²/g			
BJH method cumulative desorption surface area.....		1.842e+02 m²/g			
DH method cumulative adsorption surface area.....		1.500e+02 m²/g			
DH method cumulative desorption surface area.....		1.998e+02 m²/g			
t-method external surface area.....		1.319e+02 m²/g			
t-method micropore surface area.....		3.784e+02 m²/g			
DFT cumulative surface area.....		4.552e+02 m²/g			
<b>Pore Volume Data</b>					
Total pore volume for pores with Radius less than -68141.07 Å at P/Po = 1.000140.....		4.676e-01 cc/g			
BJH method cumulative adsorption pore volume.....		2.596e-01 cc/g			
BJH method cumulative desorption pore volume.....		2.598e-01 cc/g			
DH method cumulative adsorption pore volume.....		2.620e-01 cc/g			
DH method cumulative desorption pore volume.....		2.577e-01 cc/g			
t-method micropore volume.....		2.396e-01 cc/g			
HK method micropore volume.....		2.380e-01 cc/g			
SF method micropore volume.....		2.131e-01 cc/g			
DFT method cumulative pore volume.....		4.648e-01 cc/g			
<b>Pore Size Data</b>					
Average pore Radius.....		1.833e+01 Å			
BJH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r)).....		1.916e+01 Å			
BJH method desorption pore Radius (Mode Dv(r)).....		1.531e+01 Å			
DH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r)).....		1.916e+01 Å			
DH method desorption pore Radius (Mode Dv(r)).....		1.531e+01 Å			
HK method pore Radius (Mode).....		1.838e+00 Å			
SF method pore Radius (Mode).....		2.261e+00 Å			
DFT pore Radius (Mode).....		9.860e+00 Å			

## Data Hasil Karakterisasi AC-S 33%

Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction for NOVA instruments ©1994-2013, Quantachrome Instruments version 11.03					
<b>Analysis</b>		<b>Report</b>			
Operator:	quantachrome	Date: 2020/10/28	Operator:	quantachrome	Date: 2020/11/02
Sample ID:	8093	Filename:	sttn_A_27102020_6550-BET-EK-8093.qps		
Sample Desc:	Karbon Aktif 76	Comment:		Sample Density:	3.41 g/cc
Sample weight:	0.045 g	Sample Volume:	0.0132 cc		
Outgas Time:	3.0 hrs	Outgas Temp:	250.0 C		
Analysis gas:	Nitrogen	Bath Temp:	273.0 K		
Press. Tolerance:	0.100/0.100 (ads/des)	Equil time:	60/60 sec (ads/des)	Equil timeout:	240/240 sec (ads/des)
Analysis Time:	1029.4 min	End of run:	2020/10/28 9:08:08	Instrument:	Nova Station A
Cell ID:	11				
<b>Area-Volume Summary</b>					
<b>Data Reduction Parameters Data</b>					
t-Method	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D):	3.54 Å	Eff. cell stem diam. (d):	4.0000 mm
B/H/DH method	Calc. method: de Boer	Ignoring P-tags below	0.35 P/Po		
HK method	Moving pt. avg.: off				
SF method	Tabulated data interval: 1				
DFT method	Tabulated data interval: 1				
	Calc. Model: N2 at 77 K on carbon (slit pore, NLDFT equilibrium model)			Moving pt. avg:	off
Adsorbate	Rel. press. range: 0.0000 - 1.0000	Temperature	77.350K	Liquid Density:	0.808 g/cc
Adsorbent	Nitrogen	Cross Section:	16.200 Å²		
	Molec. Wt.: 28.013				
	Carbon				
<b>Surface Area Data</b>					
SinglePoint BET					4.423e+02 m²/g
MultiPoint BET					4.364e+02 m²/g
Langmuir surface area					6.767e+02 m²/g
B/H method cumulative adsorption surface area					1.552e+02 m²/g
B/H method cumulative desorption surface area					2.948e+02 m²/g
DH method cumulative adsorption surface area					1.596e+02 m²/g
DH method cumulative desorption surface area					3.024e+02 m²/g
t-method external surface area					1.952e+02 m²/g
t-method micropore surface area					2.412e+02 m²/g
DFT cumulative surface area					3.535e+02 m²/g
<b>Pore Volume Data</b>					
Total pore volume for pores with Radius less than 3505.26 Å at P/Po = 0.997266					5.023e-01 cc/g
B/H method cumulative adsorption pore volume					3.413e-01 cc/g
B/H method cumulative desorption pore volume					3.928e-01 cc/g
DH method cumulative adsorption pore volume					3.345e-01 cc/g
DH method cumulative desorption pore volume					3.876e-01 cc/g
t-method micropore volume					1.528e-01 cc/g
HK method micropore volume					2.008e-01 cc/g
SF method micropore volume					1.795e-01 cc/g
DFT method cumulative pore volume					4.796e-01 cc/g
<b>Pore Size Data</b>					
Average pore Radius					2.302e+01 Å
B/H method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))					1.925e+01 Å
B/H method desorption pore Radius (Mode Dv(r))					1.524e+01 Å
DH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))					1.925e+01 Å
DH method desorption pore Radius (Mode Dv(r))					1.524e+01 Å
HK method pore Radius (Mode)					1.838e+00 Å
SF method pore Radius (Mode)					1.754e+00 Å
DFT pore Radius (Mode)					1.585e+01 Å

# Data Hasil Karakterisasi AC-S 50%

Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction  
for NOVA Instruments  
©1994-2013, Quantachrome Instruments  
version 11.93



<b>Analysis</b>	quantachrome	Date: 2020/10/27	<b>Report</b>	quantachrome	Date: 2020/11/02
<b>Operator:</b>	8093	Filename:	Operator:	stin_A_26102020_6547-BET-EK-8093.qps	
<b>Sample ID:</b>	Karbon AMT 74	Comment:	<b>Sample Volume:</b>	0.00968 cc	<b>Sample Density:</b>
<b>Sample Desc:</b>	0.033 g	<b>Sample Temp:</b>	250.0 C	3.41 g/cc	
<b>Outgas Time:</b>	3.0 hrs	<b>Bath Temp:</b>	273.0 K		
<b>Analysis gas:</b>	Nitrogen	<b>Equil time:</b>	60/60 sec (ads/des)	<b>Equil timeout:</b>	240/240 sec (ads/des)
<b>Press. Tolerance:</b>	0.100/0.100 (ads/des)	<b>End of run:</b>	2020/10/27 22:32:11	<b>Instrument:</b>	Nova Station A
<b>Analysis Time:</b>	400.8 min				
<b>Cell ID:</b>	11				

## Area-Volume Summary

### Data Reduction Parameters Data

<b>I-Method</b>	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D):	3.54 Å	Eff. cell stem diam. (d):	4.0000 mm
<b>Calc. method:</b>	de Boer	<b>Ignoring P-tags below</b>	0.35 P/Po		
<b>BJH/DH method</b>	Moving pt. avg.: off				
<b>HK method</b>	Tabulated data interval: 1				
<b>SF method</b>	Tabulated data interval: 1				
<b>DFT method</b>	Calc. Model: N2 at 77 K on carbon (slit pore, NLDFT equilibrium model)			<b>Moving pt. avg.:</b>	off
<b>Adsorbate</b>	Nit. press. range: 0.0000 - 1.0000	<b>Temperature</b>	77.350K	<b>Liquid Density:</b>	0.808 g/cc
<b>Adsorbent</b>	Molec. Wt.: 28.013	<b>Cross Section:</b>	16.200 Å²		
	Carbon				

### Surface Area Data

SinglePoint BET	3.082e+02 m <sup>2</sup> /g
MultiPoint BET	3.083e+02 m <sup>2</sup> /g
Langmuir surface area	4.897e+02 m <sup>2</sup> /g
BJH method cumulative adsorption surface area	1.484e+02 m <sup>2</sup> /g
BJH method cumulative desorption surface area	1.962e+02 m <sup>2</sup> /g
DH method cumulative adsorption surface area	1.516e+02 m <sup>2</sup> /g
DH method cumulative desorption surface area	2.015e+02 m <sup>2</sup> /g
t-method external surface area	1.437e+02 m <sup>2</sup> /g
t-method micropore surface area	1.645e+02 m <sup>2</sup> /g
DFT cumulative surface area	2.712e+02 m <sup>2</sup> /g

### Pore Volume Data


Total pore volume for pores with Radius less than -289133.71 Å at P/Po = 1.000033	3.830e-01 cc/g
BJH method cumulative adsorption pore volume	2.819e-01 cc/g
BJH method cumulative desorption pore volume	2.685e-01 cc/g
DH method cumulative adsorption pore volume	2.945e-01 cc/g
DH method cumulative desorption pore volume	2.654e-01 cc/g
t-method micropore volume	1.265e-01 cc/g
HK method micropore volume	1.333e-01 cc/g
SF method micropore volume	1.077e-01 cc/g
DFT method cumulative pore volume	3.752e-01 cc/g

### Pore Size Data

Average pore Radius	2.485e+01 Å
BJH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))	1.909e+01 Å
BJH method desorption pore Radius (Mode Dv(r))	1.530e+01 Å
DH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))	1.909e+01 Å
DH method desorption pore Radius (Mode Dv(r))	1.530e+01 Å
HK method pore Radius (Mode)	1.838e+00 Å
SF method pore Radius (Mode)	1.754e+00 Å
DFT pore Radius (Mode)	9.660e+00 Å

# AC-CuS 13%

Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction  
for NOVA instruments  
©1994-2013, Quantachrome Instruments  
version 11.03



---

<b>Analysis</b> Operator: quantachrome Sample ID: 8094 Sample Desc: Karbon Aktif 77 Sample weight: 0.0344 g Outgas Time: 3.0 hrs Analysis gas: Nitrogen Press. Tolerance: 0.1000 100 (ads/des) Analysis Time: 1033.0 min Cell ID: 12	<b>Date:</b> 2020/10/28 <b>Filename:</b> Comment: <b>Sample Volume:</b> 0.01009 cc <b>Outgas Temp:</b> 250.0 C <b>Bath Temp:</b> 273.0 K Equal time: 60/60 sec (ads/des) End of run: 2020/10/28 9:11:42	<b>Report</b> Operator: quantachrome Filename: sttn_B_27102020_6551-BET-EK-8094.qps <b>Date:</b> 2020/11/02 <b>Sample Density:</b> 3.41 g/cc <b>Equil timeout:</b> 240/240 sec (ads/des) <b>Instrument:</b> Nova Station B
---	--	--

### Area-Volume Summary

#### Data Reduction Parameters Data

<b>t-Method</b> <b>B/H/DH method</b> <b>HK method</b> <b>SF method</b> <b>DFT method</b> <b>Adsorbate</b> <b>Adsorbent</b>	Thermal Transpiration: on Calc. method: de Boer Moving pt. avg.: off Tabulated data interval: 1 Tabulated data interval: 1 Calc. Model: N2 at 77 K on carbon (slt pore, NLDFT equilibrium model) Rel. press. range: 0.0000 - 1.0000 Nitrogen Molec. Wt.: 28.013 Carbon	Eff. mol. diameter (D): 3.54 Å Ignoring P-tags below 0.35 P/Po Eff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm Moving pt. avg: off Temperature: 77.350K Cross Section: 16.200 Å² Liquid Density: 0.808 g/cc
--	---	---

#### Surface Area Data

SinglePoint BET	6.408e+02 m²/g
MultiPoint BET	6.342e+02 m²/g
Langmuir surface area	9.333e+02 m²/g
B/H method cumulative adsorption surface area	2.003e+02 m²/g
B/H method cumulative desorption surface area	2.804e+02 m²/g
DH method cumulative adsorption surface area	2.046e+02 m²/g
DH method cumulative desorption surface area	2.879e+02 m²/g
t-method external surface area	2.263e+02 m²/g
t-method micropore surface area	4.079e+02 m²/g
DFT cumulative surface area	5.370e+02 m²/g


#### Pore Volume Data

Total pore volume for pores with Radius less than 11388.38 Å at P/Po = 0.999161	6.581e-01 cc/g
B/H method cumulative adsorption pore volume	4.085e-01 cc/g
B/H method cumulative desorption pore volume	4.015e-01 cc/g
DH method cumulative adsorption pore volume	4.008e-01 cc/g
DH method cumulative desorption pore volume	3.972e-01 cc/g
t-method micropore volume	2.812e-01 cc/g
HK method micropore volume	2.901e-01 cc/g
SF method micropore volume	2.593e-01 cc/g
DFT method cumulative pore volume	6.418e-01 cc/g

#### Pore Size Data

Average pore Radius	2.078e+01 Å
B/H method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))	1.915e+01 Å
B/H method desorption pore Radius (Mode Dv(r))	1.724e+01 Å
DH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))	1.915e+01 Å
DH method desorption pore Radius (Mode Dv(r))	1.724e+01 Å
HK method pore Radius (Mode)	1.838e+00 Å
SF method pore Radius (Mode)	1.754e+00 Å
DFT pore Radius (Mode)	1.385e+01 Å

# AC-CuS 20%


Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction for NOVA instruments ©1994-2013, Quantachrome Instruments version 11.03					
<b>Analysis</b>	quantachrome	Date:2020/10/28	<b>Report</b>	quantachrome	Date:2020/11/02
<b>Operator:</b>	8094	<b>Filename:</b>	atrn_D_27102020_6553-BET-EK-8094.qps		
<b>Sample ID:</b>	Karbon aktif 78	<b>Comment:</b>			
<b>Sample Desc:</b>	0.0389 g	<b>Sample Volume:</b>	0.01141 cc	<b>Sample Density:</b>	3.41 g/cc
<b>Sample weight:</b>	3.0 hrs	<b>Outgas Temp:</b>	250.0 C		
<b>Outgas Time:</b>	Nitrogen	<b>Bath Temp:</b>	273.0 K		
<b>Analysis gas:</b>	0.1000.100 (ads/ides)	<b>Equal time:</b>	8060 sec (ads/ides)	<b>Equal timeout:</b>	240/240 sec (ads/ides)
<b>Press. Tolerance:</b>	1037.4 min	<b>End of run:</b>	2020/10/28 9:16:55	<b>Instrument:</b>	Nova Station D
<b>Analysis Time:</b>	40				
<b>Cell ID:</b>					
<b>Area-Volume Summary</b>					
<b>Data Reduction Parameters Data</b>					
<b>t-Method</b>	Thermal Transpiration: on	<b>Eff. mol. diameter (D):</b>	3.54 Å		
<b>BJH/DH method</b>	Calc. method: de Boer	<b>Eff. cell stem diam. (d):</b>	4.0000 mm		
<b>HK method</b>	Moving pt. avg.: off				
<b>SF method</b>	Tabulated data interval: 1	Ignoring P-tags below 0.35 P/Po			
<b>DFT method</b>	Tabulated data interval: 1				
<b>Adsorbate</b>	Calc. Model: N2 at 77 K on carbon (slit pore, NLDFT equilibrium model)				
<b>Adsorbent</b>	Rel. press. range: 0.0000 - 1.0000	<b>Temperature</b>	77.350K		
		<b>Molec. Wt.:</b>	28.013	<b>Cross Section:</b>	16.200 Å²
				<b>Moving pt. avg: off</b>	
				<b>Liquid Density:</b>	0.808 g/cc
<b>Surface Area Data</b>					
SinglePoint BET.....					4.396e+02 m <sup>2</sup> /g
MultiPoint BET.....					4.349e+02 m <sup>2</sup> /g
Langmuir surface area.....					8.539e+02 m <sup>2</sup> /g
BJH method cumulative adsorption surface area.....					7.789e+01 m <sup>2</sup> /g
BJH method cumulative desorption surface area.....					8.421e+01 m <sup>2</sup> /g
DH method cumulative adsorption surface area.....					7.961e+01 m <sup>2</sup> /g
DH method cumulative desorption surface area.....					8.642e+01 m <sup>2</sup> /g
t-method external surface area.....					7.497e+01 m <sup>2</sup> /g
t-method micropore surface area.....					3.599e+02 m <sup>2</sup> /g
DFT cumulative surface area.....					3.958e+02 m <sup>2</sup> /g
<b>Pore Volume Data</b>					
Total pore volume for pores with Radius less than -51945.01 Å at P/Po = 1.000154.....					3.432e-01 cc/g
BJH method cumulative adsorption pore volume.....					1.462e-01 cc/g
BJH method cumulative desorption pore volume.....					1.217e-01 cc/g
DH method cumulative adsorption pore volume.....					1.486e-01 cc/g
DH method cumulative desorption pore volume.....					1.220e-01 cc/g
t-method micropore volume.....					2.050e-01 cc/g
HK method micropore volume.....					2.102e-01 cc/g
SF method micropore volume.....					1.859e-01 cc/g
DFT method cumulative pore volume.....					3.097e-01 cc/g
<b>Pore Size Data</b>					
Average pore Radius.....					1.578e+01 Å
BJH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r)).....					1.532e+01 Å
BJH method desorption pore Radius (Mode Dv(r)).....					1.909e+01 Å
DH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r)).....					1.532e+01 Å
DH method desorption pore Radius (Mode Dv(r)).....					1.692e+01 Å
HK method pore Radius (Mode).....					1.838e+01 Å
SF method pore Radius (Mode).....					1.754e+01 Å
DFT pore Radius (Mode).....					8.440e+00 Å



AC-CuS 33%

Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction for NOVA Instruments ©1994-2013, Quantachrome Instruments version 11.03				Quantachrome INSTRUMENTS	
<b>Analysis</b>		<b>Report</b>			
Operator:	quantachrome	Date:	2020/11/03	Operator:	quantachrome
Sample ID:	8094	Filename:	stin_A_02112020_6554-BET-EK-8094.gps	Date:	2020/11/03
Sample Desc:	Karbon Aktif 79	Comment:		Sample Density:	3.41 g/cc
Sample weight:	0.0383 g	Sample Volume:	0.01123 cc		
Outgas Time:	3.0 hrs	Outgas Temp:	250.0 C		
Analysis gas:	Nitrogen	Bath Temp:	273.0 K	Equal timeout:	240/240 sec (ads/des)
Press. Tolerance:	0.10/0.100 (ads/des)	Equal time:	60/60 sec (ads/des)	Instrument:	Nova Station A
Analysis Time:	424.0 min	End of run:	2020/11/03 23:45:30		
Cell ID:	11				
<b>Area-Volume Summary</b>					
<b>Data Reduction Parameters Data</b>					
t-Method	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D):	3.54 Å	Eff. cell stem diam. (d):	4.0000 mm
BJH/DH method	Calc. method: de Boer	Ignoring P-tags below 0.35 P/Po			
HK method	Moving pt. avg.: off				
SF method	Tabulated data interval: 1				
DFT method	Calc. Model: N2 at 77 K on carbon (slit pore, NLDFT equilibrium model)				
Adsorbate	Rel. press. range: 0.0000 - 1.0000	Temperature	77.350K	Moving pt. avg:	off
Adsorbent	Nitrogen	Molec. Wt.:	28.013	Cross Section:	16.200 Å <sup>2</sup>
	Carbon			Liquid Density:	0.808 g/cc
<b>Surface Area Data</b>					
SinglePoint BET	2.459e+02 m <sup>2</sup> /g				
MultiPoint BET	2.009e+02 m <sup>2</sup> /g				
Langmuir surface area	4.668e+02 m <sup>2</sup> /g				
BJH method cumulative adsorption surface area	1.643e+02 m <sup>2</sup> /g				
BJH method cumulative desorption surface area	2.229e+02 m <sup>2</sup> /g				
DH method cumulative adsorption surface area	1.680e+02 m <sup>2</sup> /g				
DH method cumulative desorption surface area	2.285e+02 m <sup>2</sup> /g				
t-method external surface area	1.712e+02 m <sup>2</sup> /g				
t-method micropore surface area	8.941e+01 m <sup>2</sup> /g				
DFT cumulative surface area	1.974e+02 m <sup>2</sup> /g				
<b>Pore Volume Data</b>					
Total pore volume for pores with Radius less than 9085.65 Å at P/Po = 0.998948	3.817e-01 cc/g				
BJH method cumulative adsorption pore volume	3.174e-01 cc/g				
BJH method cumulative desorption pore volume	3.093e-01 cc/g				
DH method cumulative adsorption pore volume	3.115e-01 cc/g				
DH method cumulative desorption pore volume	3.052e-01 cc/g				
t-method micropore volume	8.048e-02 cc/g				
HK method micropore volume	9.095e-02 cc/g				
SF method micropore volume	5.946e-02 cc/g				
DFT method cumulative pore volume	3.709e-01 cc/g				
<b>Pore Size Data</b>					
Average pore Radius	2.929e+01 Å				
BJH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))	1.695e+01 Å				
BJH method desorption pore Radius (Mode Dv(r))	1.512e+01 Å				
DH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))	1.695e+01 Å				
DH method desorption pore Radius (Mode Dv(r))	1.512e+01 Å				
HK method pore Radius (Mode)	1.838e+00 Å				
SF method pore Radius (Mode)	2.261e+00 Å				
DFT pore Radius (Mode)	1.324e+01 Å				

AC-CuS

Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction for NOVA instruments ©1994-2013, Quantachrome Instruments version 11.03					
<b>Analysis</b>		<b>Report</b>			
Operator:	quantachrome	Date: 2020/11/03	Operator:	quantachrome	Date: 2020/11/03
Sample ID:	8095	Filename:	stin_B_02112020_8555-BET-EK-8095.gps		
Sample Desc:	Karbon Aktif 80	Comment:			
Sample weight:	0.0274 g	Sample Volume:	0.00804 cc	Sample Density:	3.41 g/cc
Outgas Time:	3.0 hrs	Outgas Temp:	250.0 C		
Analysis gas:	Nitrogen	Bath Temp:	273.0 K		
Press. Tolerance:	0.100/0.100 (ads/des)	Equal time:	60/60 sec (ads/des)	Equal timeout:	240/240 sec (ads/des)
Analysis Time:	426.2 min	End of run:	2020/11/03 23:47:44	Instrument:	Nova Station B
Cell ID:	12				
<b>Area-Volume Summary</b>					
<b>Data Reduction Parameters Data</b>					
Thermal Transpiration: on		Eff. mol. diameter (D): 3.54 Å		Eff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm	
Calc. method: de Boer		Ignoring P-tags below 0.35 P/P0			
Moving pt. avg.: off					
Tabulated data interval: 1					
SF method					
DFT method					
Calc. Model: N2 at 77 K on carbon (slit pore, NLDFT equilibrium model)				Moving pt. avg.: off	
Rel. press. range: 0.0000 - 1.0000		Temperature: 77.350K		Liquid Density: 0.808 g/cc	
Adsorbate: Nitrogen		Cross Section: 16.200 Å²			
Molec. Wt.: 28.013					
Adsorbent: Carbon					
<b>Surface Area Data</b>					
SinglePoint BET		7.279e+02 m²/g			
MultiPoint BET		7.283e+02 m²/g			
Langmuir surface area		1.138e+03 m²/g			
BJH method cumulative adsorption surface area		2.340e+02 m²/g			
BJH method cumulative desorption surface area		2.589e+02 m²/g			
DH method cumulative adsorption surface area		2.389e+02 m²/g			
DH method cumulative desorption surface area		2.666e+02 m²/g			
t-method external surface area		2.250e+02 m²/g			
t-method micropore surface area		5.032e+02 m²/g			
DFT cumulative surface area		6.195e+02 m²/g			
<b>Pore Volume Data</b>					
Total pore volume for pores with Radius less than -9403.82 Å at P/P0 = 1.001013		7.142e-01 cc/g			
BJH method cumulative adsorption pore volume		4.177e-01 cc/g			
BJH method cumulative desorption pore volume		3.834e-01 cc/g			
DH method cumulative adsorption pore volume		4.231e-01 cc/g			
DH method cumulative desorption pore volume		3.791e-01 cc/g			
t-method micropore volume		3.172e-01 cc/g			
HK method micropore volume		3.215e-01 cc/g			
SF method micropore volume		2.758e-01 cc/g			
DFT method cumulative pore volume		6.874e-01 cc/g			
<b>Pore Size Data</b>					
Average pore Radius		1.962e+01 Å			
BJH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))		1.694e+01 Å			
BJH method desorption pore Radius (Mode Dv(r))		1.910e+01 Å			
DH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))		1.694e+01 Å			
DH method desorption pore Radius (Mode Dv(r))		1.910e+01 Å			
HK method pore Radius (Mode)		1.838e+00 Å			
SF method pore Radius (Mode)		2.261e+00 Å			
DFT pore Radius (Mode)		6.440e+00 Å			

AC-ZnCl2 6%

**Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction**  
 for NOVA instruments  
 ©1994-2013, Quantachrome Instruments  
 version 11.03

---

<b>Analysis</b>	quantachrome	Date: 2020/11/03	Report
Operator:	8095	Filename:	quantachrome
Sample ID:	Karbon aktif 81	Comment:	stn_D_02112020_6556-BET-EK-8095.cps
Sample Desc:	0.0376 g	Sample Volume:	0.01103 cc
Sample weight:	3.0 hrs	Outgas Temp:	250.0 C
Outgas Time:	Nitrogen	Bath Temp:	273.0 K
Analysis gas:	0.100/0.100 (ads/des)	Equal time:	60/60 sec (ads/des)
Press. Tolerance:	429.0 min	End of run:	2020/11/03 23:50:31
Analysis Time:	40	Instrument:	Nova Station D
Cell ID:			

**Area-Volume Summary**

---

**Data Reduction Parameters Data**

<b>T-Method</b>	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D):	3.54 Å
<b>BJH/DH method</b>	Calc. method: de Boer	Eff. cell stem diam. (d):	4.0000 mm
<b>HK method</b>	Moving pt. avg.: off	Ignoring P-tags below 0.35 P/Po	
<b>SF method</b>	Tabulated data interval: 1		
<b>DFT method</b>	Tabulated data interval: 1		
	Calc. Model: N2 at 77 K on carbon (slit pore, NLDFT equilibrium model)		
<b>Adsorbate</b>	Rel. press. range: 0.0000 - 1.0000	Temperature	77.350K
<b>Adsorbent</b>	Nitrogen	Cross Section:	16.200 Å²
	Molec. Wt.: 28.013	Moving pt. avg.: off	
	Carbon	Liquid Density:	0.808 g/cc

---

**Surface Area Data**

SinglePoint BET.....	4.593e+02 m²/g
MultiPoint BET.....	4.564e+02 m²/g
Langmuir surface area.....	6.665e+02 m²/g
BJH method cumulative adsorption surface area.....	5.921e+01 m²/g
BJH method cumulative desorption surface area.....	6.745e+01 m²/g
DH method cumulative adsorption surface area.....	6.053e+01 m²/g
DH method cumulative desorption surface area.....	6.923e+01 m²/g
t-method external surface area.....	6.173e+01 m²/g
t-method micropore surface area.....	3.947e+02 m²/g
DFT cumulative surface area.....	3.987e+02 m²/g

---

**Pore Volume Data**


Total pore volume for pores with Radius less than -17988.05 Å at P/Po = 1.000530.....	3.265e-01 cc/g
BJH method cumulative adsorption pore volume.....	1.128e-01 cc/g
BJH method cumulative desorption pore volume.....	9.868e-02 cc/g
DH method cumulative adsorption pore volume.....	1.120e-01 cc/g
DH method cumulative desorption pore volume.....	9.834e-02 cc/g
t-method micropore volume.....	2.187e-01 cc/g
HK method micropore volume.....	2.189e-01 cc/g
SF method micropore volume.....	1.894e-01 cc/g
DFT method cumulative pore volume.....	2.981e-01 cc/g

---


**Pore Size Data**

Average pore Radius.....	1.431e+01 Å
BJH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r)).....	1.715e+01 Å
BJH method desorption pore Radius (Mode Dv(r)).....	1.904e+01 Å
DH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r)).....	1.715e+01 Å
DH method desorption pore Radius (Mode Dv(r)).....	1.904e+01 Å
HK method pore Radius (Mode).....	1.838e+00 Å
SF method pore Radius (Mode).....	1.754e+00 Å
DFT pore Radius (Mode).....	8.440e+00 Å


AC-ZnCl2 7%

Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction for NOVA instruments ©1994-2013, Quantachrome Instruments version 11.03					
<b>Analysis</b>	quantachrome	Date: 2020/11/11	<b>Report</b>	quantachrome	Date: 2020/11/11
Operator:	8899	Filename:	Operator:	stn_A_10112020_6565-BET-EK-8899.qps	
Sample ID:	Sample 82	Comment:	Sample Volume:	0.01073 cc	Sample Density:
Sample Desc:	0.0366 g		Outgas Temp:	250.0 C	3.41 g/cc
Sample weight:	3.0 hrs		Bath Temp:	273.0 K	
Outgas Time:	Nitrogen		Equal times:	6060 sec (ads/des)	Equal timeout:
Analysis gas:	0.1000 100 (ads/des)		End of run:	2020/11/11 21:33:40	240/240 sec (ads/des)
Press. Tolerance:	453.2 min		Instrument:	Nova Station A	
Analysis Time:	11				
Cell ID:					
<b>Area-Volume Summary</b>					
<b>Data Reduction Parameters Data</b>					
<b>T-Method</b>	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D):	3.54 Å	Eff. cell stem diam. (d):	4.0000 mm
<b>BH/DH method</b>	Calc. method: de Boer	Ignoring P-tags below 0.35 P/Po			
<b>HK method</b>	Moving pt. avg.: off				
<b>SF method</b>	Tabulated data interval: 1				
<b>DFT method</b>	Calc. Model: N2 at 77 K on carbon (slit pore, NLDFT equilibrium model)			Moving pt. avg: off	
<b>Adsorbate</b>	Rel. press. range: 0.0000 - 1.0000	Temperature	77.350K	Liquid Density:	0.808 g/cc
<b>Adsorbent</b>	Nitrogen	Cross Section:	16.200 Å²		
	Molec. Wt.: 28.013				
	Carbon				
<b>Surface Area Data</b>					
SinglePoint BET	4.430e+02 m²/g				
MultiPoint BET	4.398e+02 m²/g				
Langmuir surface area	6.798e+02 m²/g				
BH method cumulative adsorption surface area	1.384e+02 m²/g				
BH method cumulative desorption surface area	1.612e+02 m²/g				
DH method cumulative adsorption surface area	1.414e+02 m²/g				
DH method cumulative desorption surface area	1.861e+02 m²/g				
t-method external surface area	1.327e+02 m²/g				
t-method micropore surface area	3.071e+02 m²/g				
DFT cumulative surface area	3.873e+02 m²/g				
<b>Pore Volume Data</b>					
Total pore volume for pores with Radius less than 8959.14 Å at P/Po = 0.999933	4.317e-01 cc/g				
BH method cumulative adsorption pore volume	2.654e-01 cc/g				
BH method cumulative desorption pore volume	2.462e-01 cc/g				
DH method cumulative adsorption pore volume	2.602e-01 cc/g				
DH method cumulative desorption pore volume	2.436e-01 cc/g				
L-method micropore volume	1.965e-01 cc/g				
HK method micropore volume	2.012e-01 cc/g				
SF method micropore volume	1.719e-01 cc/g				
DFT method cumulative pore volume	4.238e-01 cc/g				
<b>Pore Size Data</b>					
Average pore Radius	1.963e+01 Å				
BH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))	1.706e+01 Å				
BH method desorption pore Radius (Mode Dv(r))	1.510e+01 Å				
DH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))	1.706e+01 Å				
DH method desorption pore Radius (Mode Dv(r))	1.510e+01 Å				
HK method pore Radius (Mode)	1.838e+00 Å				
SF method pore Radius (Mode)	1.754e+00 Å				
DFT pore Radius (Mode)	9.660e+00 Å				

AC-ZnCl2 8%

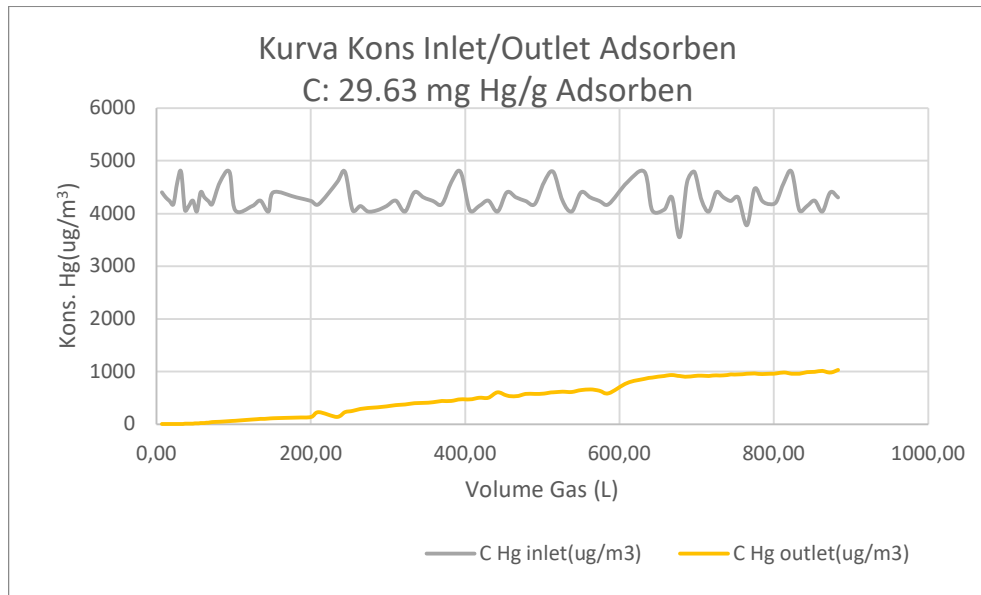
Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction for NOVA Instruments ©1994-2013, Quantachrome Instruments version 11.03							
<b>Analysis</b>	quantachrome	Date:2020/11/11	Report	quantachrome	Date:2020/11/11		
Operator:	6899	Filename:	Operator:	stin_B_10112020_6566-BET-EK-8899.qps			
Sample ID:	Sample 83	Comment:	Sample Volume:	0.00868 cc	Sample Density:	3.41 g/cc	
Sample Desc:	0.0296 g	Sample Volume:	Outgas Temp:	250.0 C			
Outgas Time:	3.0 hrs	Bath Temp:	273.0 K				
Analysis gas:	Nitrogen	Equal time:	60/60 sec (ads/des)	Equal timecut:	240/240 sec (ads/des)		
Press. Tolerance:	0.1000, 100 (ads/des)	End of run:	2020/11/11 21:38:51	Instrument:	Nova Station B		
Analysis Time:	458.4 min						
Cell ID:	12						
<b>Area-Volume Summary</b>							
<b>Data Reduction Parameters Data</b>							
<b>t-Method</b>	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D):	3.54 Å		Eff. cell stem diam. (d):	4.0000 mm	
<b>B-JH/DH method</b>	Calc. method: de Boer	Moving pt. avg.: off	Ignoring P-lags below 0.35 P/Po				
<b>DFT method</b>	Calc. Model: N2 at 77 K on carbon (alt pore, NLDFT equilibrium model)	Rel. press. range: 0.0000 - 1.0000			Moving pt. avg: off		
<b>Adsorbate</b>	Nitrogen	Temperature:	77.350K		Liquid Density:	0.808 g/cc	
<b>Adsorbent</b>	Carbon	Molec. Wt.:	28.013				
		Cross Section:	16.200 Å²				
<b>Surface Area Data</b>							
SinglePoint BET							3.154e+02 m²/g
MultiPoint BET							3.068e+02 m²/g
Langmuir surface area							4.549e+02 m²/g
BJH method cumulative adsorption surface area							1.199e+02 m²/g
BJH method cumulative desorption surface area							2.174e+02 m²/g
DH method cumulative adsorption surface area							1.223e+02 m²/g
DH method cumulative desorption surface area							2.232e+02 m²/g
t-method external surface area							1.565e+02 m²/g
t-method micropore surface area							1.502e+02 m²/g
DFT cumulative surface area							2.817e+02 m²/g
<b>Pore Volume Data</b>							
Total pore volume for pores with Radius							
less than 1527.89 Å at P/Po = 0.993694							3.935e-01 cc/g
BJH method cumulative adsorption pore volume							2.860e-01 cc/g
BJH method cumulative desorption pore volume							3.102e-01 cc/g
DH method cumulative adsorption pore volume							2.797e-01 cc/g
DH method cumulative desorption pore volume							3.067e-01 cc/g
t-method micropore volume							1.012e-01 cc/g
DFT method cumulative pore volume							3.825e-01 cc/g
<b>Pore Size Data</b>							
Average pore Radius							2.566e+01 Å
BJH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))							2.172e+01 Å
BJH method desorption pore Radius (Mode Dv(r))							1.702e+01 Å
DH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))							2.172e+01 Å
DH method desorption pore Radius (Mode Dv(r))							1.702e+01 Å
DFT pore Radius (Mode)							1.658e+01 Å

AC-ZnCl2 9%

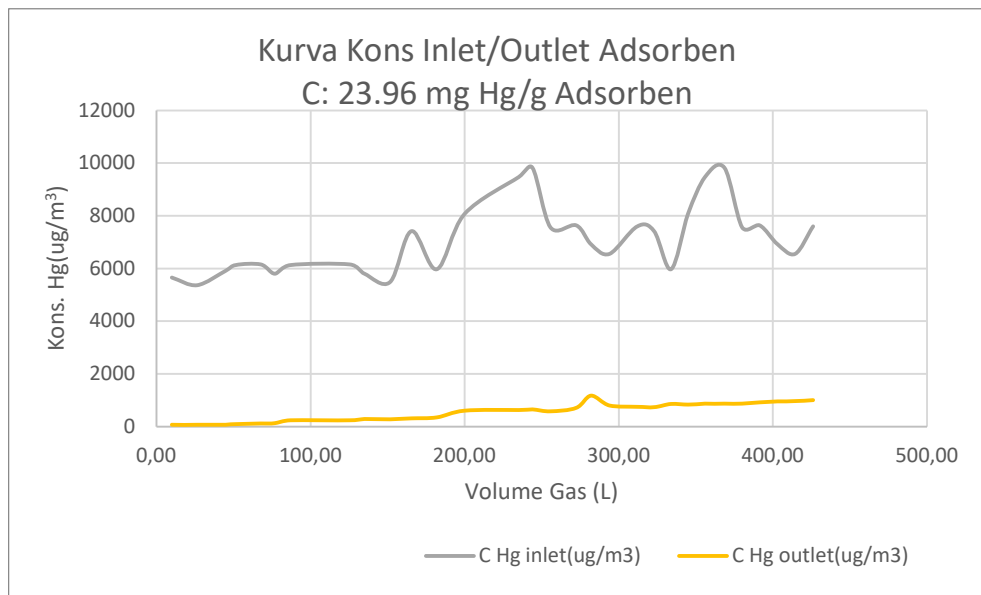
Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction for NOVA instruments ©1994-2013, Quantachrome Instruments version 11.03					
<b>Analysis</b>		<b>Report</b>			
Operator:	quantachrome	Date:	2020/11/11	Operator:	quantachrome
Sample ID:	8899	Filename:	stln_D_10112020_0557-BET-EK-8899.qps	Date:	2020/11/11
Sample Desc:	Sample 84	Comment:		Sample Density:	3.41 g/cc
Sample weight:	0.0321 g	Sample Volume:	0.00941 cc		
Outgas Time:	3.0 hrs	Outgas Temp:	250.0 C		
Analysis gas:	Nitrogen	Bath Temp:	273.0 K	Equal timeout:	240/240 sec (ads/des)
Press. Tolerance:	0.100/0.100 (ads/des)	Equal time:	60/60 sec (ads/des)	Instrument:	Nova Station D
Analysis Time:	461.2 min	End of run:	2020/11/11 21:41:42		
Cell ID:	40				
<b>Area-Volume Summary</b>					
<b>Data Reduction Parameters Data</b>					
t-Method	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D):	3.54 Å	Eff. cell stem diam. (d):	4.0000 mm
BJH/DH method	Calc. method: de Boer	Ignoring P-tags below	0.35 P/Po		
HK method	Moving pt. avg.: off				
SF method	Tabulated data interval: 1				
DFT method	Tabulated data interval: 1				
Adsorbate	Calc. Model: N2 at 77 K on carbon (slit pore, NLDFT equilibrium model)	Temperature	77.350K	Moving pt. avg: off	
Adsorbent	Rel. press. range: 0.0000 - 1.0000	Cross Section:	16.200 Å²	Liquid Density:	0.808 g/cc
	Nitrogen				
	Molec. Wt.: 28.013				
	Carbon				
<b>Surface Area Data</b>					
SinglePoint BET					3.203e+02 m²/g
MultiPoint BET					3.180e+02 m²/g
Langmuir surface area					4.839e+02 m²/g
BJH method cumulative adsorption surface area					5.131e+01 m²/g
BJH method cumulative desorption surface area					5.751e+01 m²/g
DH method cumulative adsorption surface area					5.248e+01 m²/g
DH method cumulative desorption surface area					5.909e+01 m²/g
t-method external surface area					5.547e+01 m²/g
t-method micropore surface area					2.626e+02 m²/g
DFT cumulative surface area					2.728e+02 m²/g
<b>Pore Volume Data</b>					
Total pore volume for pores with Radius less than -15130.32 Å at P/Po = 1.000930					2.557e-01 cc/g
BJH method cumulative adsorption pore volume					1.049e-01 cc/g
BJH method cumulative desorption pore volume					8.570e-02 cc/g
DH method cumulative adsorption pore volume					1.088e-01 cc/g
DH method cumulative desorption pore volume					8.679e-02 cc/g
t-method micropore volume					1.524e-01 cc/g
HK method micropore volume					1.498e-01 cc/g
SF method micropore volume					1.310e-01 cc/g
DFT method cumulative pore volume					2.350e-01 cc/g
<b>Pore Size Data</b>					
Average pore Radius					1.608e+01 Å
BJH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))					1.930e+01 Å
BJH method desorption pore Radius (Mode Dv(r))					1.893e+01 Å
DH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))					1.930e+01 Å
DH method desorption pore Radius (Mode Dv(r))					1.893e+01 Å
HK method pore Radius (Mode)					1.838e+00 Å
SF method pore Radius (Mode)					1.754e+00 Å
DFT pore Radius (Mode)					9.234e+00 Å

<u>Area-Volume Summary</u>			
<u>Data Reduction Parameters Data</u>			
<u>t-method</u>	Thermal Transpiration: on	Eff. mol. diameter (D): 3.54 Å	Eff. cell stem diam. (d): 4.0000 mm
<u>BJH/DH method</u>	Calc. method: de Boer		
<u>HK method</u>	Moving pt. avg.: off	Ignoring P-tags below 0.35 P/Po	
<u>SF method</u>	Tabulated data interval: 1		
<u>DFT method</u>	Tabulated data interval: 1		
<u>Adsorbate</u>	Calc. Model: N2 at 77 K on carbon (slit pore, NLDFT equilibrium model)		Moving pt. avg: off
<u>Adsorbent</u>	Rel. press. range: 0.0000 - 1.0000	Temperature: 77.350K	Liquid Density: 0.808 g/cc
	Molec. Wt.: 28.013	Cross Section: 16.200 Å²	
	Carbon		
<u>Surface Area Data</u>			
SinglePoint BET		8.785e+02 m²/g	
MultiPoint BET		8.942e+02 m²/g	
Langmuir surface area		1.435e+03 m²/g	
BJH method cumulative adsorption surface area		3.079e+02 m²/g	
BJH method cumulative desorption surface area		3.927e+02 m²/g	
DH method cumulative adsorption surface area		3.153e+02 m²/g	
DH method cumulative desorption surface area		4.029e+02 m²/g	
t-method external surface area		2.771e+02 m²/g	
t-method micropore surface area		6.171e+02 m²/g	
DFT cumulative surface area		6.741e+02 m²/g	
<u>Pore Volume Data</u>			
Total pore volume for pores with Radius less than -5390.44 Å at P/Po = 1.001765		8.287e-01 cc/g	
BJH method cumulative adsorption pore volume		4.885e-01 cc/g	
BJH method cumulative desorption pore volume		5.358e-01 cc/g	
DH method cumulative adsorption pore volume		4.823e-01 cc/g	
DH method cumulative desorption pore volume		5.289e-01 cc/g	
t-method micropore volume		3.524e-01 cc/g	
HK method micropore volume		3.655e-01 cc/g	
SF method micropore volume		2.851e-01 cc/g	
DFT method cumulative pore volume		7.861e-01 cc/g	
<u>Pore Size Data</u>			
Average pore Radius		1.853e+01 Å	
BJH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))		1.696e+01 Å	
BJH method desorption pore Radius (Mode Dv(r))		1.509e+01 Å	
DH method adsorption pore Radius (Mode Dv(r))		1.696e+01 Å	
DH method desorption pore Radius (Mode Dv(r))		1.509e+01 Å	
HK method pore Radius (Mode)		1.838e+00 Å	
SF method pore Radius (Mode)		2.261e+00 Å	
DFT pore Radius (Mode)		1.324e+01 Å	

Lampiran 19 Kurva Uji Kinerja Adsorben Suhu Saturasi 15°C dan Suhu Uji 40°C

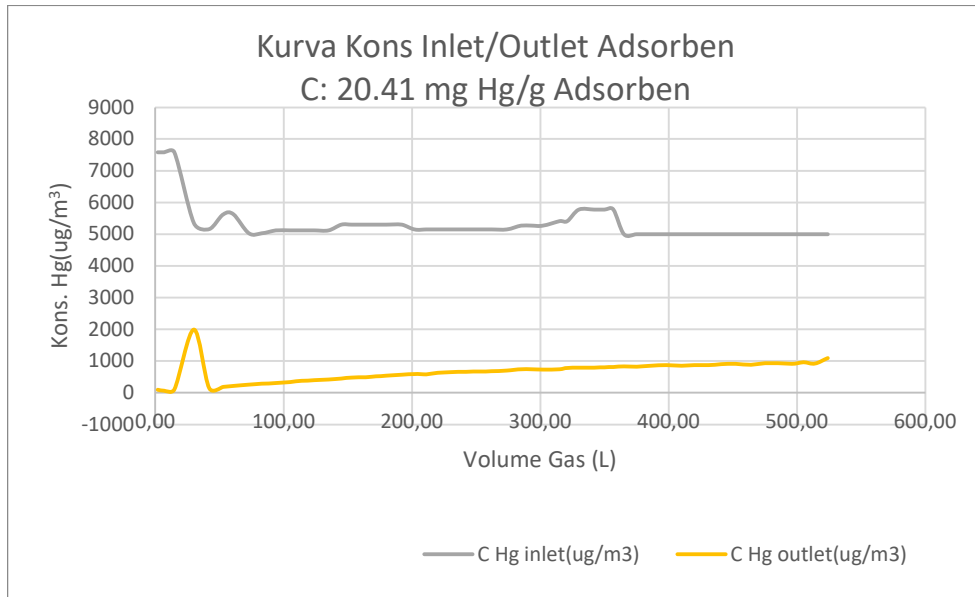


AC-S 16%,  $T_{\text{sat}} 15^{\circ}\text{C}/T_{\text{ads}} 40^{\circ}\text{C}$

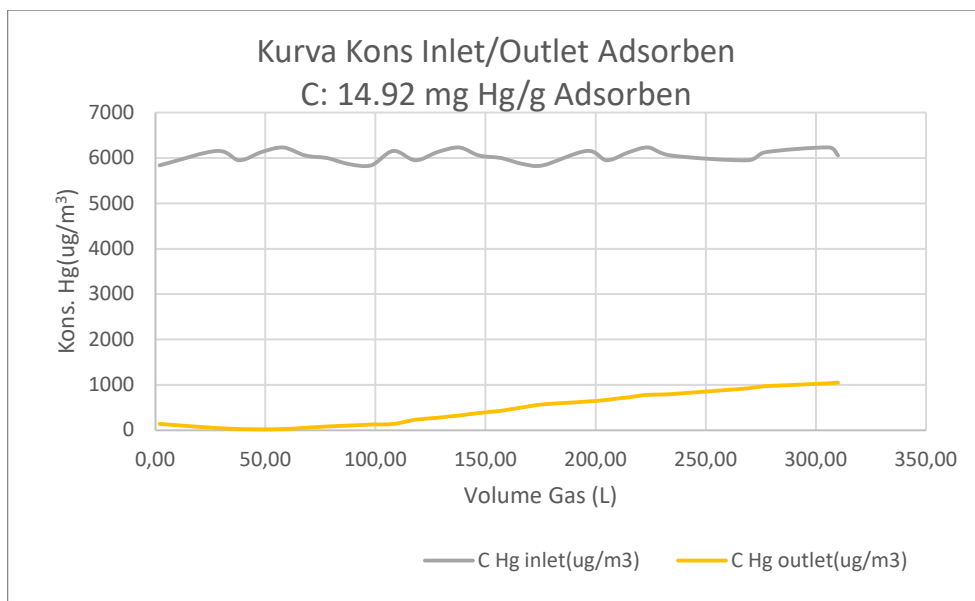


AC-S 33%,  $T_{\text{sat}} 15^{\circ}\text{C}/T_{\text{ads}} 40^{\circ}\text{C}$

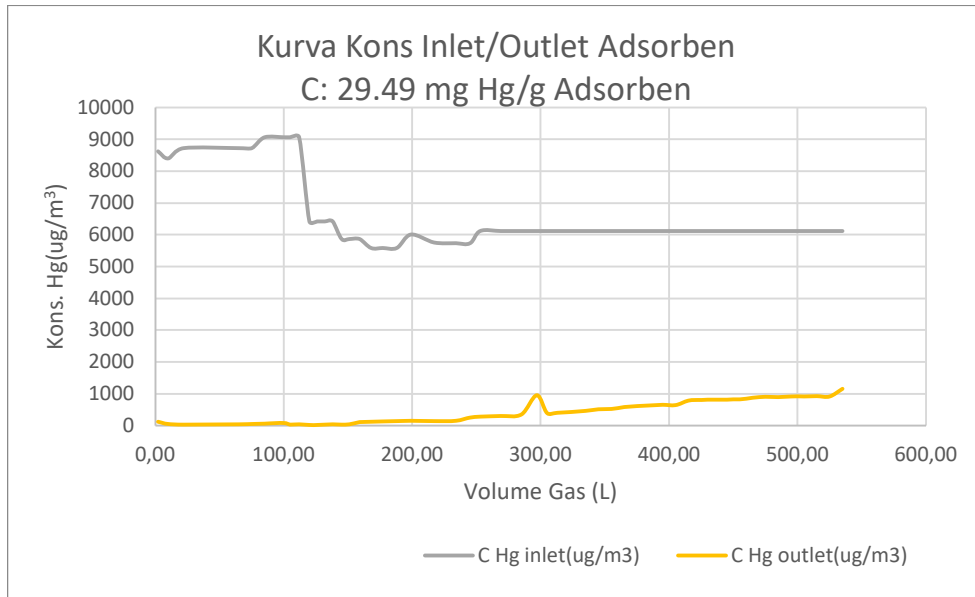




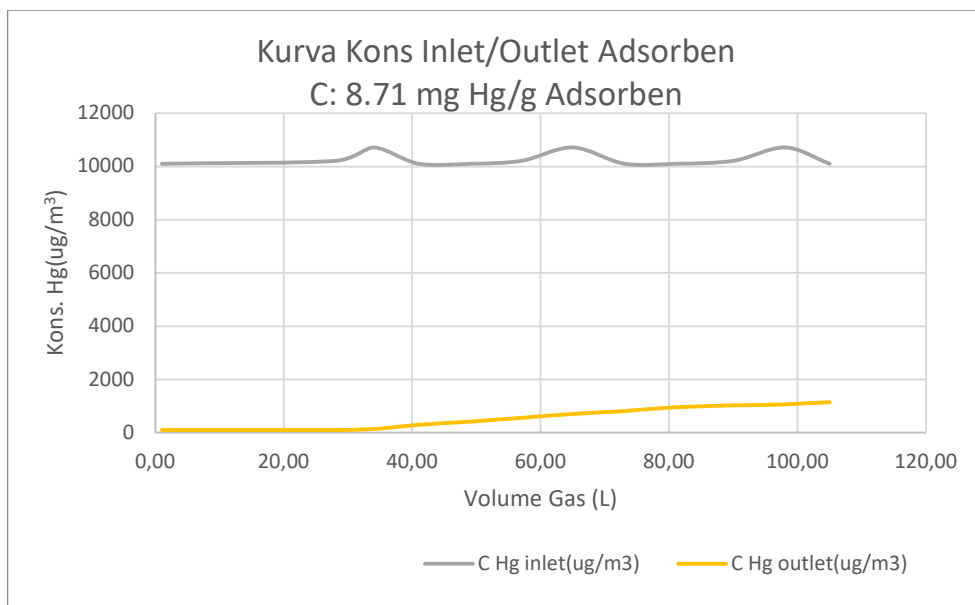
**AC-S 50%,  $T_{\text{sat}}$  15°C/ $T_{\text{ads}}$  40°C**



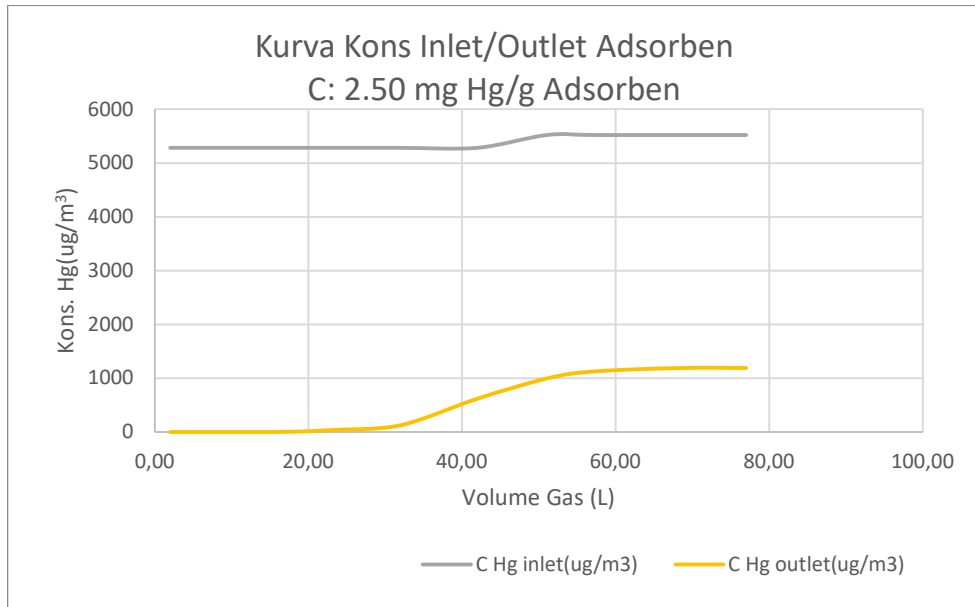
**AC-CuS 13%,  $T_{\text{sat}}$  15°C/ $T_{\text{ads}}$  40°C**



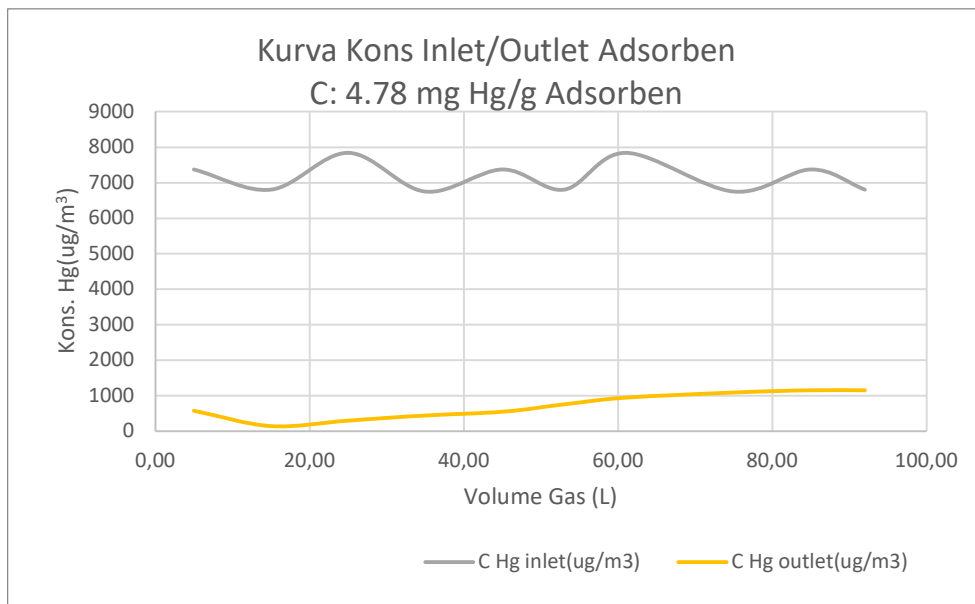
AC-CuS 20%,  $T_{\text{sat}} 15^{\circ}\text{C}/T_{\text{ads}} 40^{\circ}\text{C}$



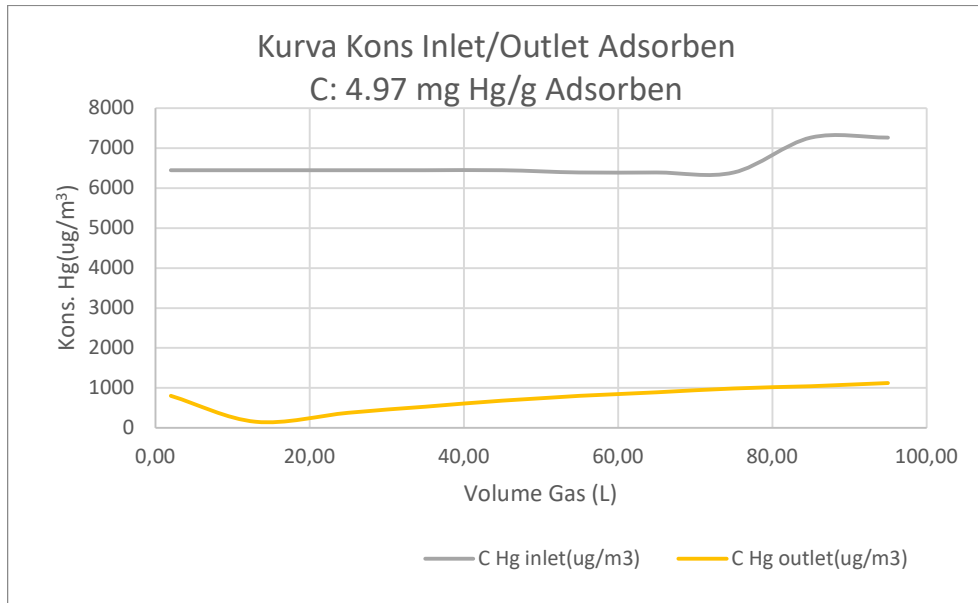
AC-CuS 33%,  $T_{\text{sat}} 15^{\circ}\text{C}/T_{\text{ads}} 40^{\circ}\text{C}$



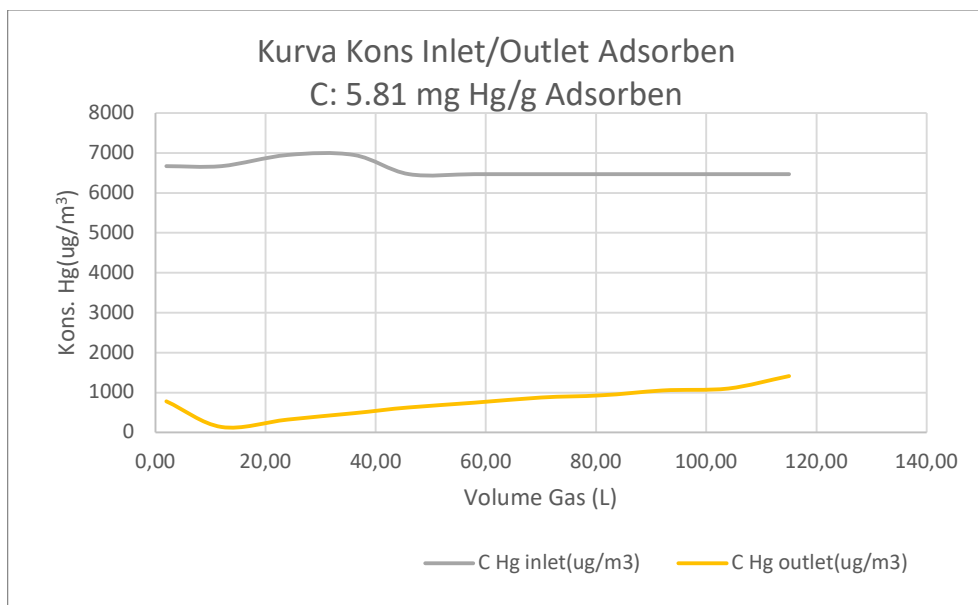
**AC-CuS, T<sub>sat</sub> 15°C/T<sub>ads</sub> 40°C**



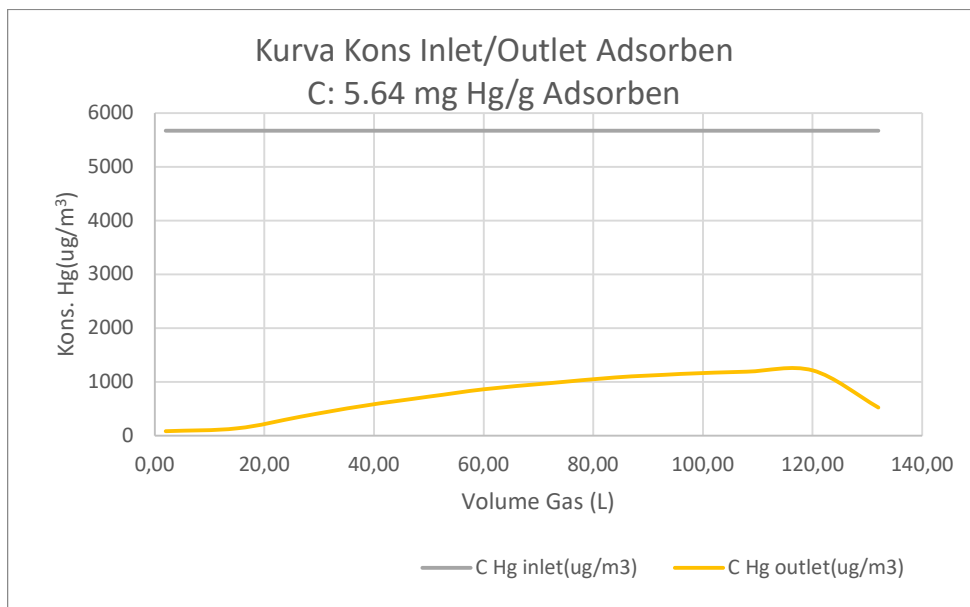
**AC-ZnCL<sub>2</sub> 6%, T<sub>sat</sub> 15°C/T<sub>ads</sub> 40°C**



AC-ZnCl<sub>2</sub> 7%, T<sub>sat</sub> 15°C/T<sub>ads</sub> 40°C

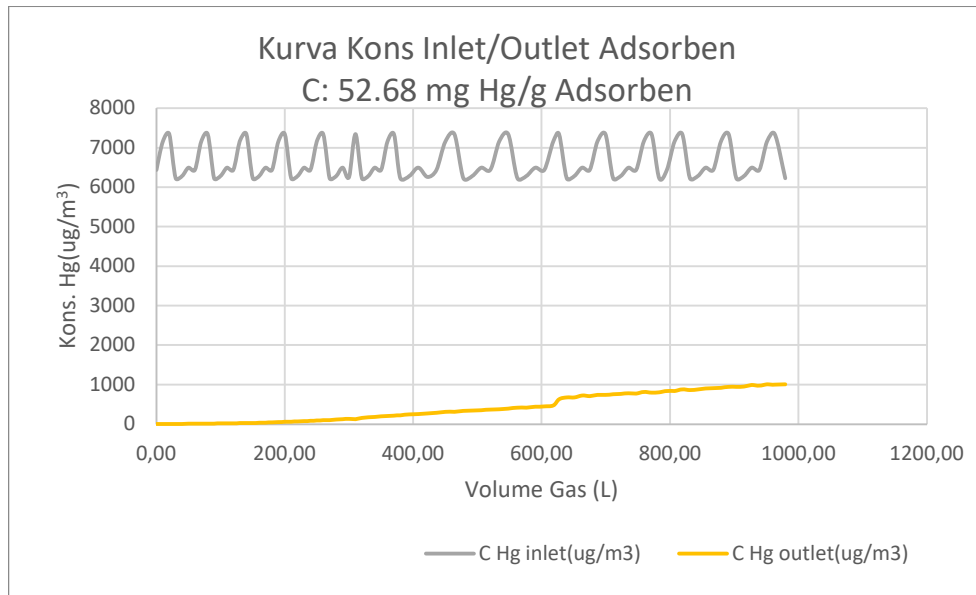


AC-ZnCl<sub>2</sub> 8%, T<sub>sat</sub> 15°C/T<sub>ads</sub> 40°C

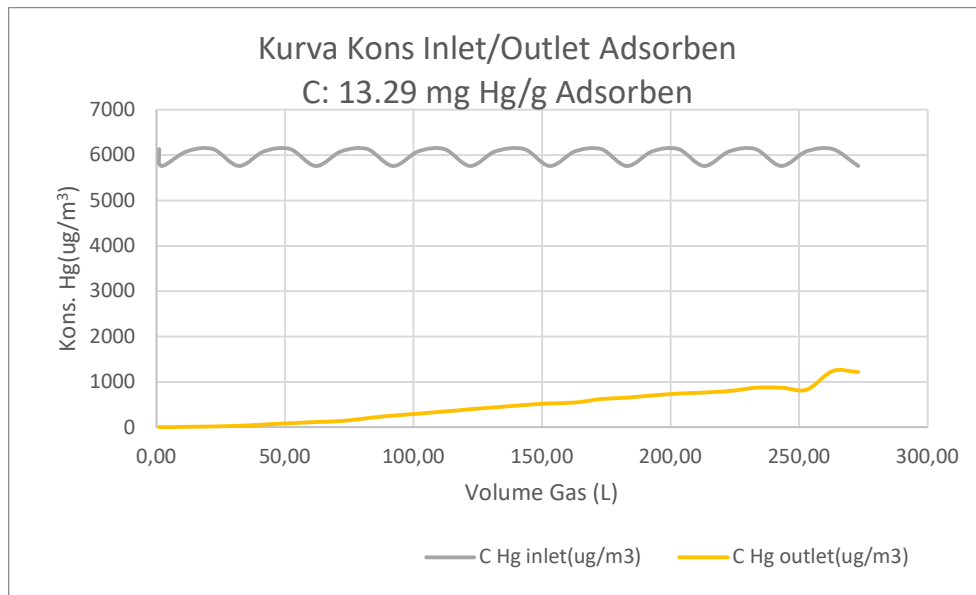


AC-ZnCL<sub>2</sub> 9%, T<sub>sat</sub> 15°C/T<sub>ads</sub> 40°C

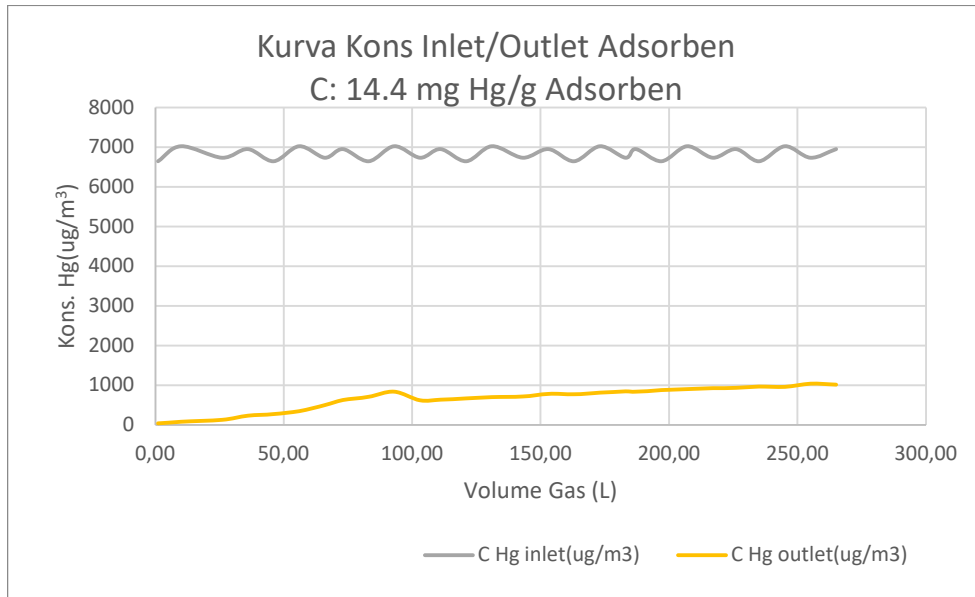
Lampiran 20 Kurva Uji Kinerja Adsorben Suhu Saturasi 25°C dan Suhu Uji 40°C



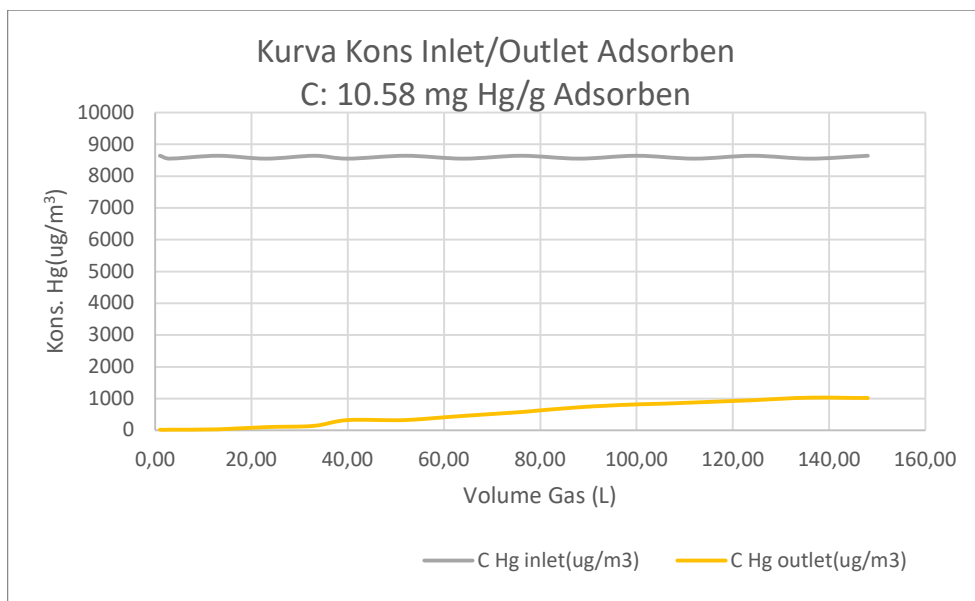
AC-S 16%,  $T_{\text{sat}}$  25°C/ $T_{\text{ads}}$  40°C



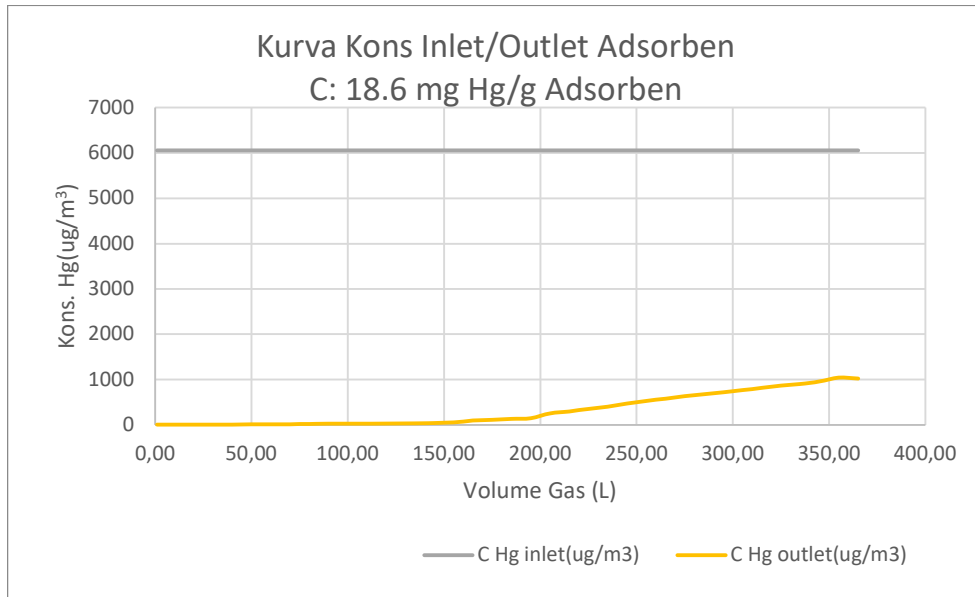
AC-S 33%,  $T_{\text{sat}}$  25°C/ $T_{\text{ads}}$  40°C



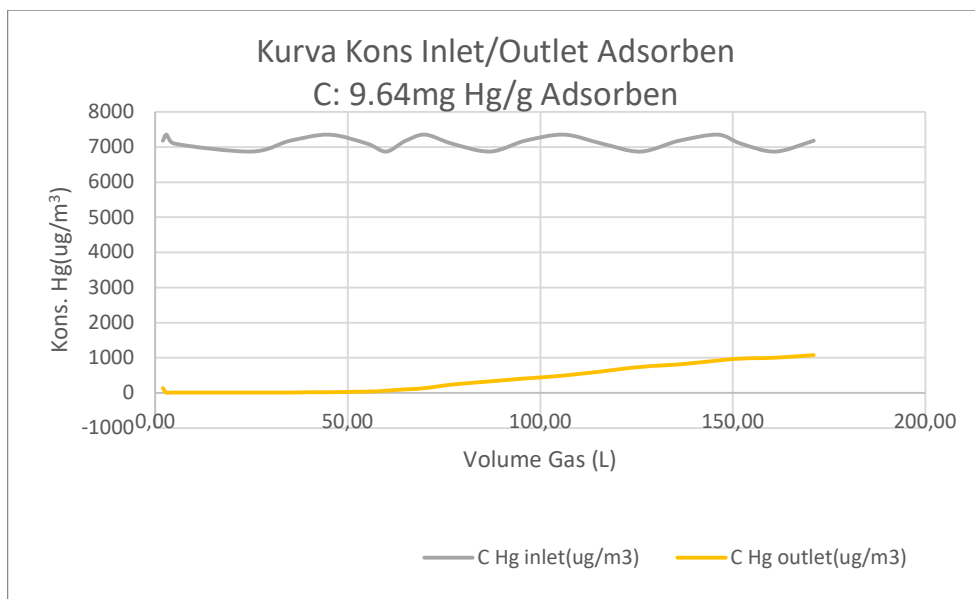
**AC-S 50%,  $T_{\text{sat}}$  25°C/ $T_{\text{ads}}$  40°C**



**AC-CuS 13%,  $T_{\text{sat}}$  25°C/ $T_{\text{ads}}$  40°C**

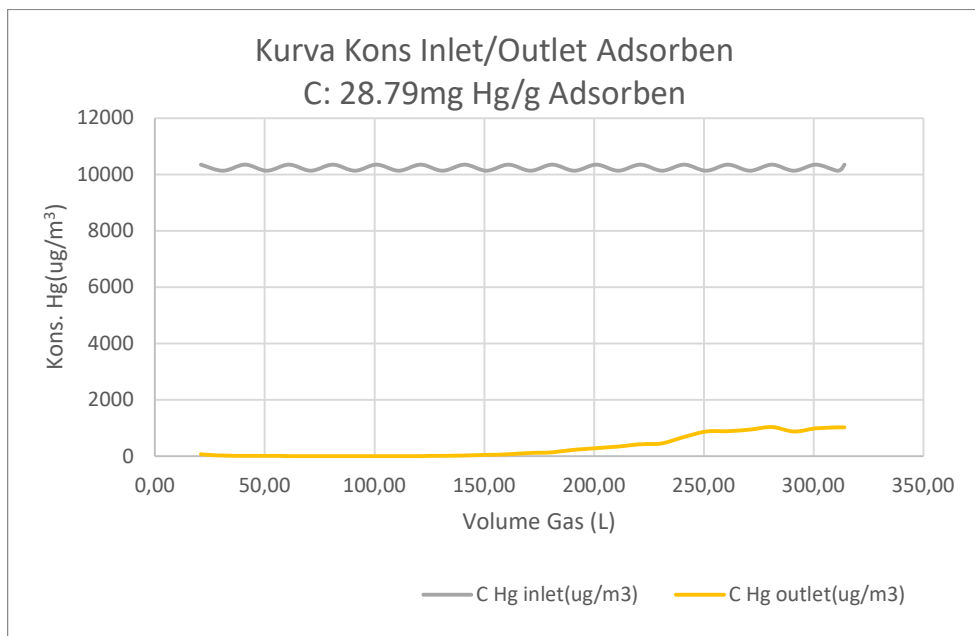


AC-CuS 20%,  $T_{\text{sat}} 25^\circ\text{C}/T_{\text{ads}} 40^\circ\text{C}$

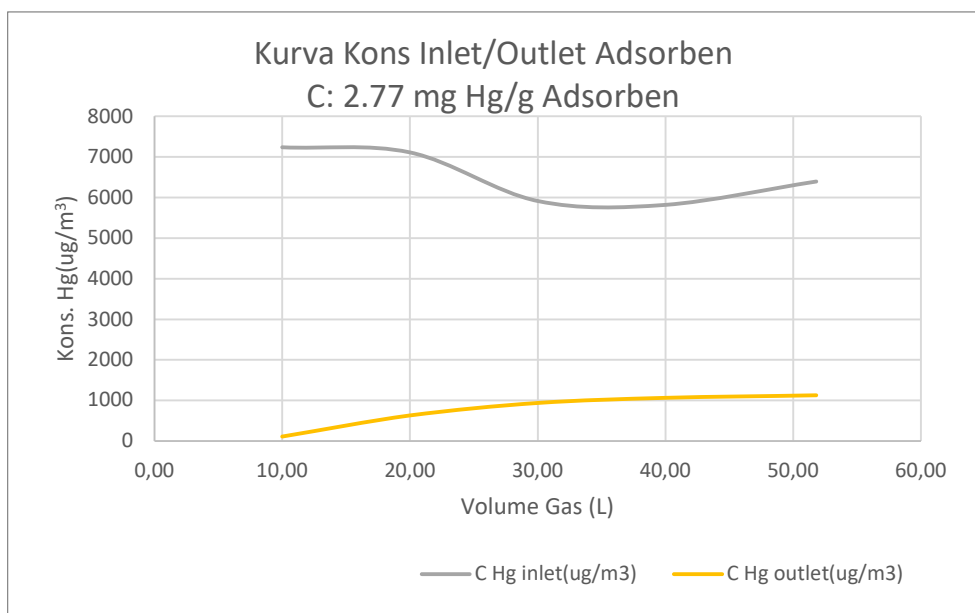


AC-CuS 33%,  $T_{\text{sat}} 25^\circ\text{C}/T_{\text{ads}} 40^\circ\text{C}$

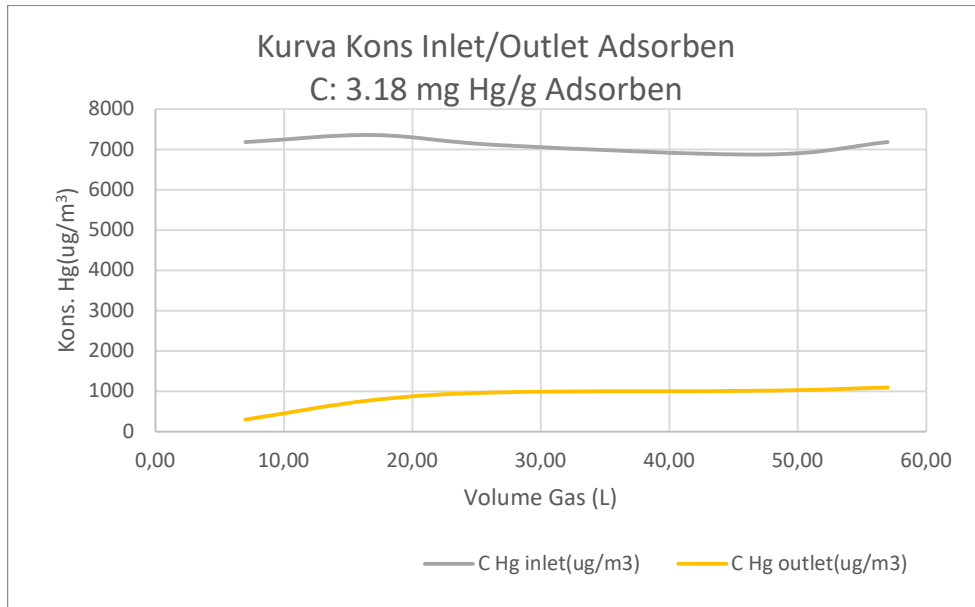




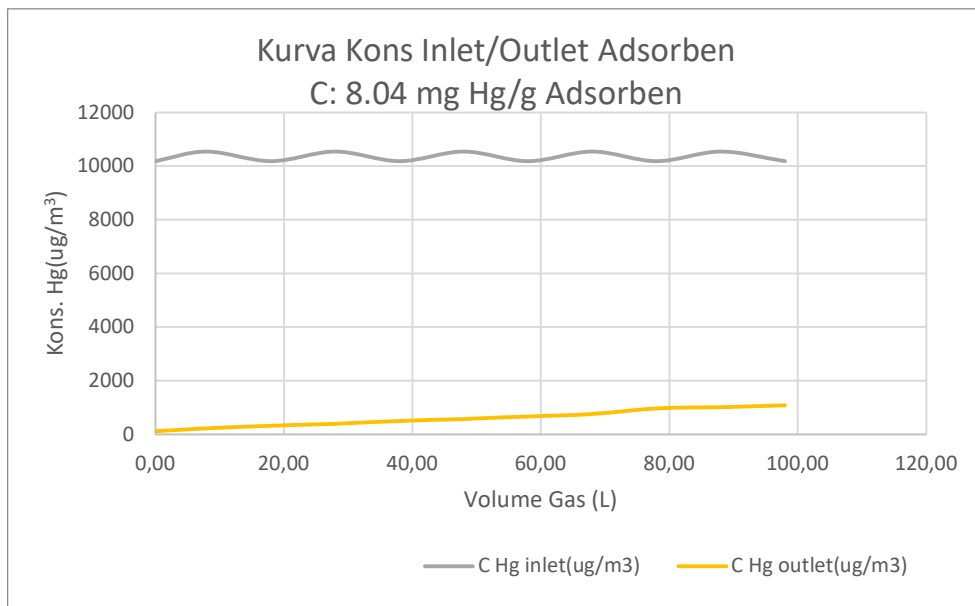
AC-CuS,  $T_{\text{sat}} 25^\circ\text{C}/T_{\text{ads}} 40^\circ\text{C}$



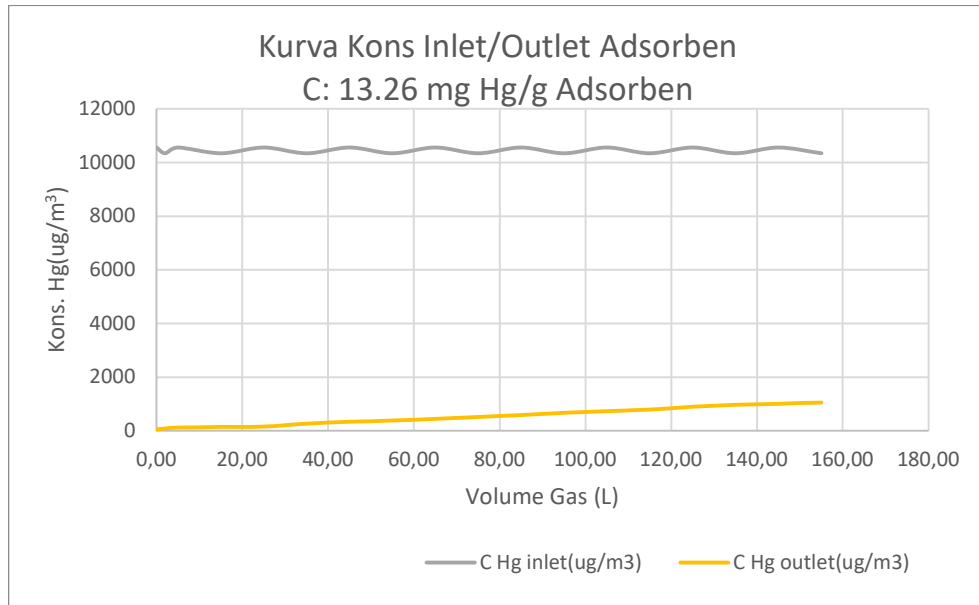
AC-ZnCl<sub>2</sub> 6%,  $T_{\text{sat}} 25^\circ\text{C}/T_{\text{ads}} 40^\circ\text{C}$



AC-ZnCl<sub>2</sub> 7%, T<sub>sat</sub> 25°C/T<sub>ads</sub> 40°C

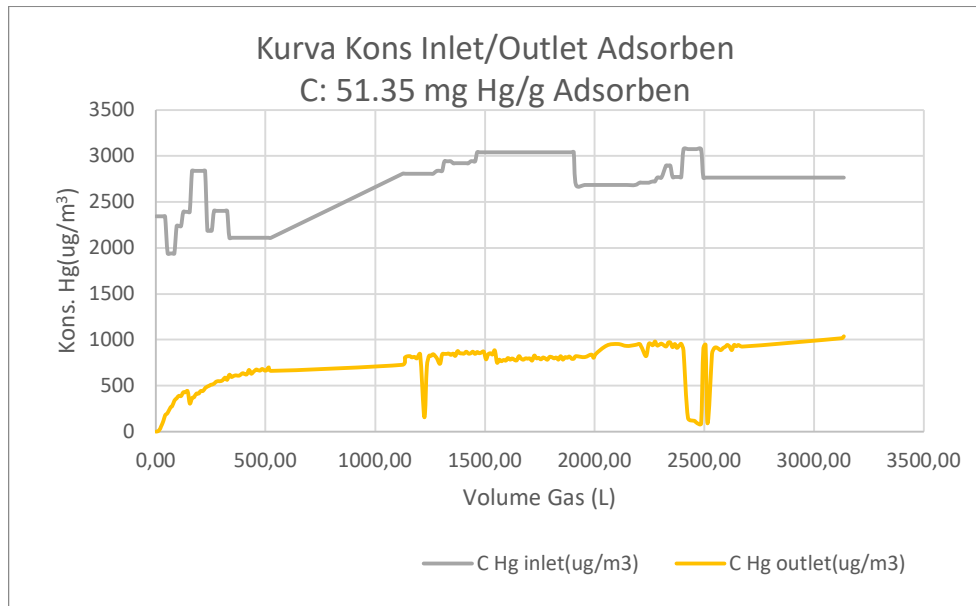


AC-ZnCl<sub>2</sub> 8%, T<sub>sat</sub> 25°C/T<sub>ads</sub> 40°C

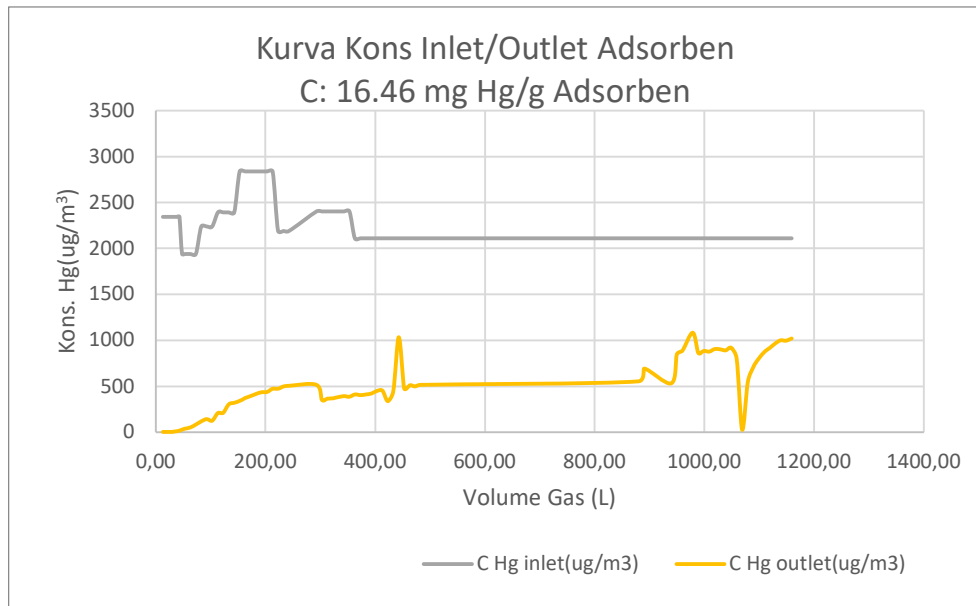


AC-ZnCL<sub>2</sub> 9%, T<sub>sat</sub> 25°C/T<sub>ads</sub> 40°C

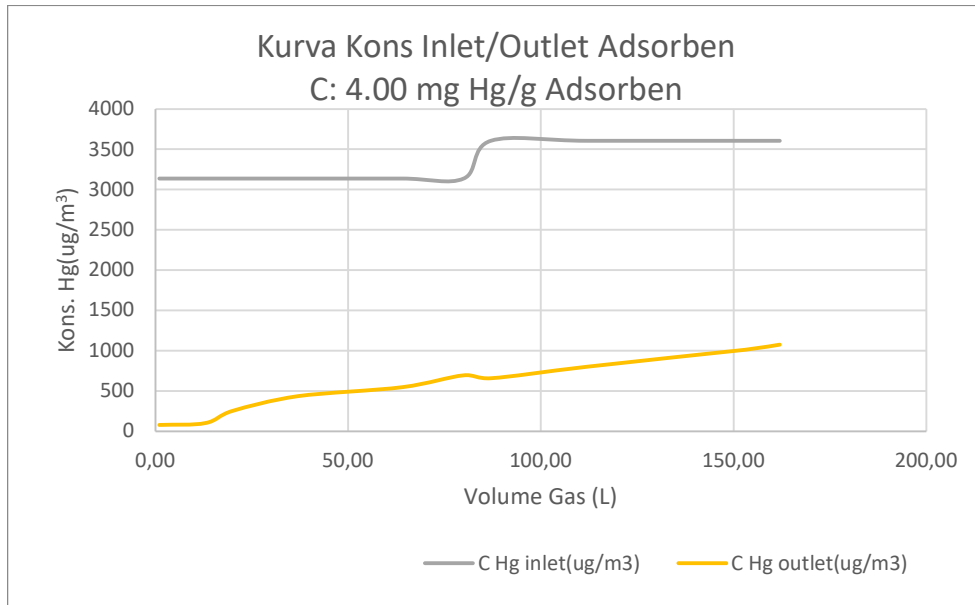
Lampiran 21 Kurva Uji Kinerja Adsorben Suhu Saturasi 30°C dan Suhu Uji 30°C



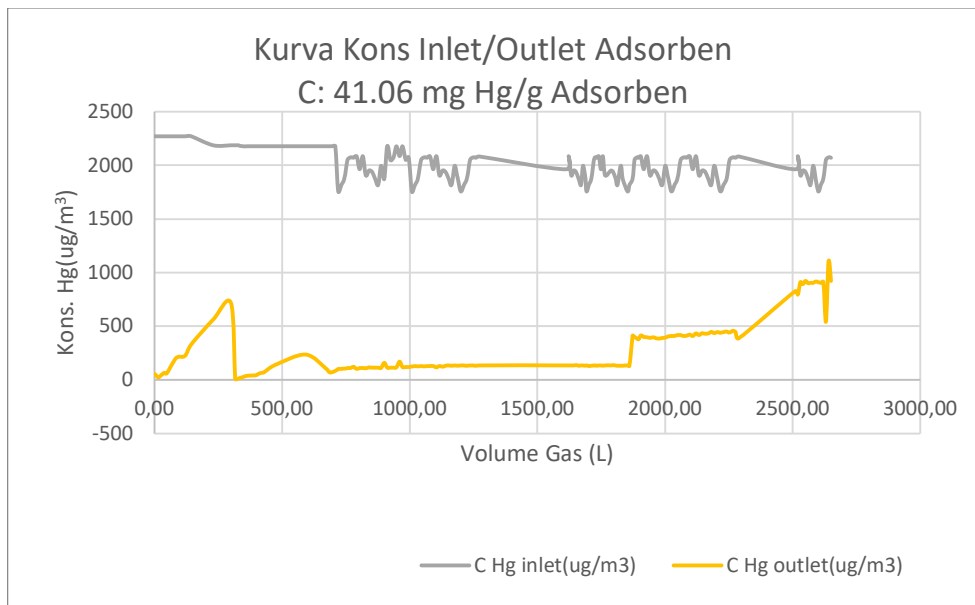
AC-S 16%,  $T_{\text{sat}} 30^{\circ}\text{C}/T_{\text{ads}} 30^{\circ}\text{C}$



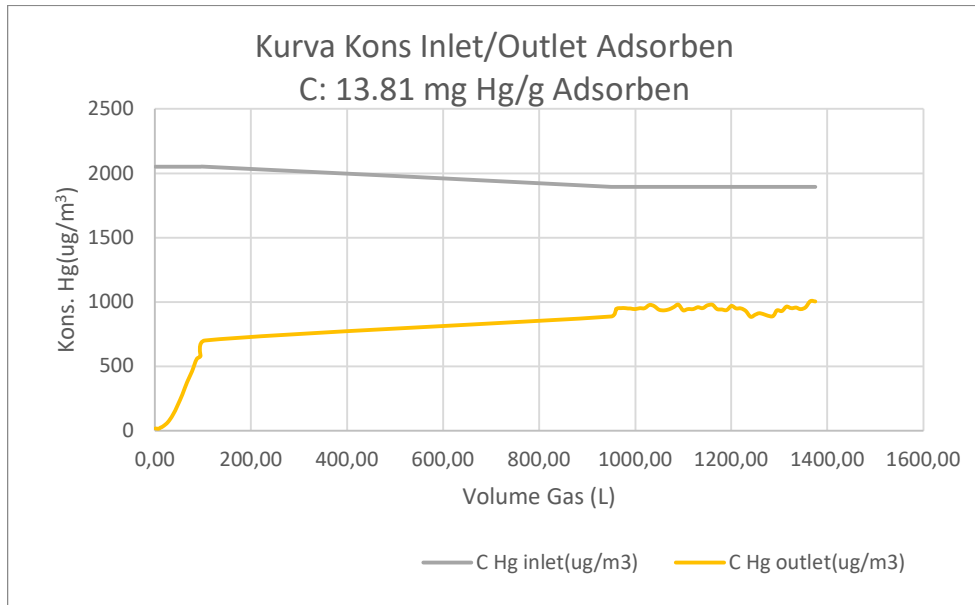
AC-S 33%,  $T_{\text{sat}} 30^{\circ}\text{C}/T_{\text{ads}} 30^{\circ}\text{C}$



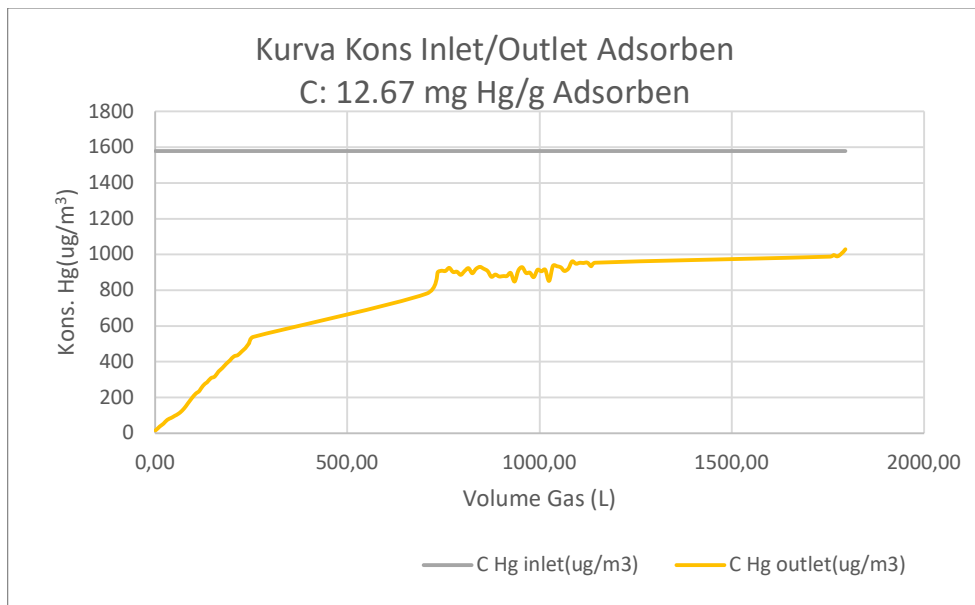
**AC-S 50%, T<sub>sat</sub> 30°C/T<sub>ads</sub> 30°C**



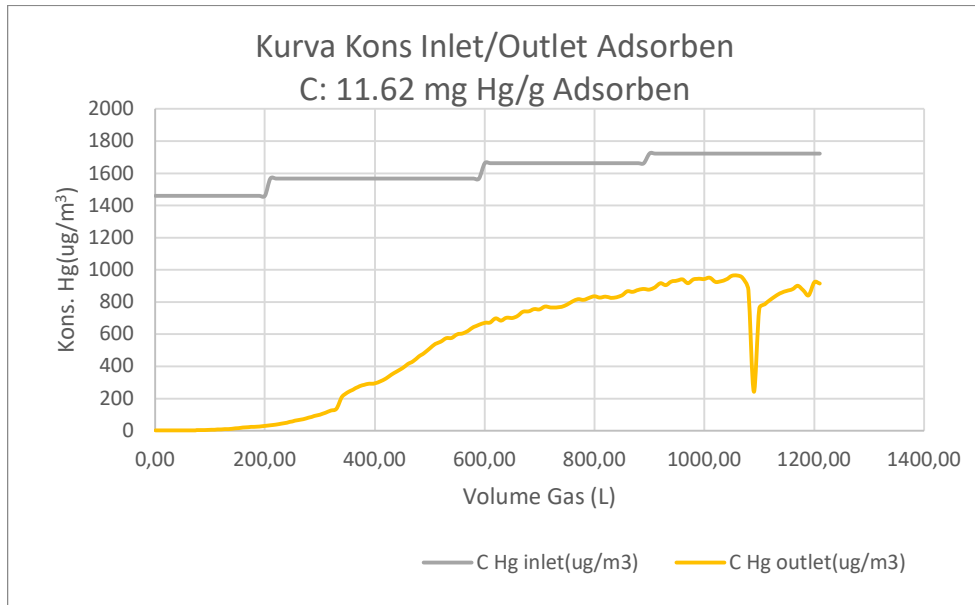
**AC-CuS 13%, T<sub>sat</sub> 30°C/T<sub>ads</sub> 30°C**



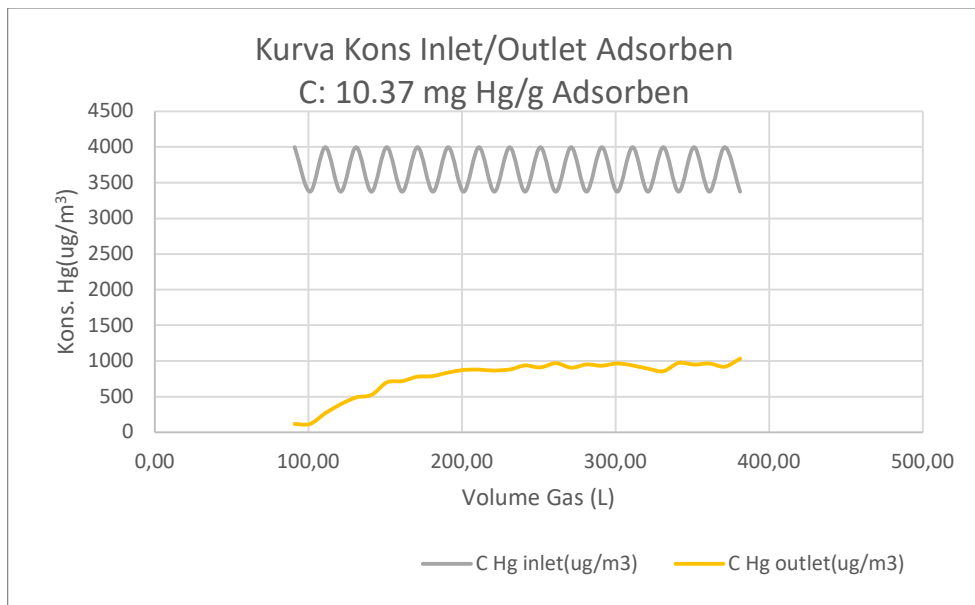
**AC-CuS 20%, T<sub>sat</sub> 30°C/T<sub>ads</sub> 30°C**



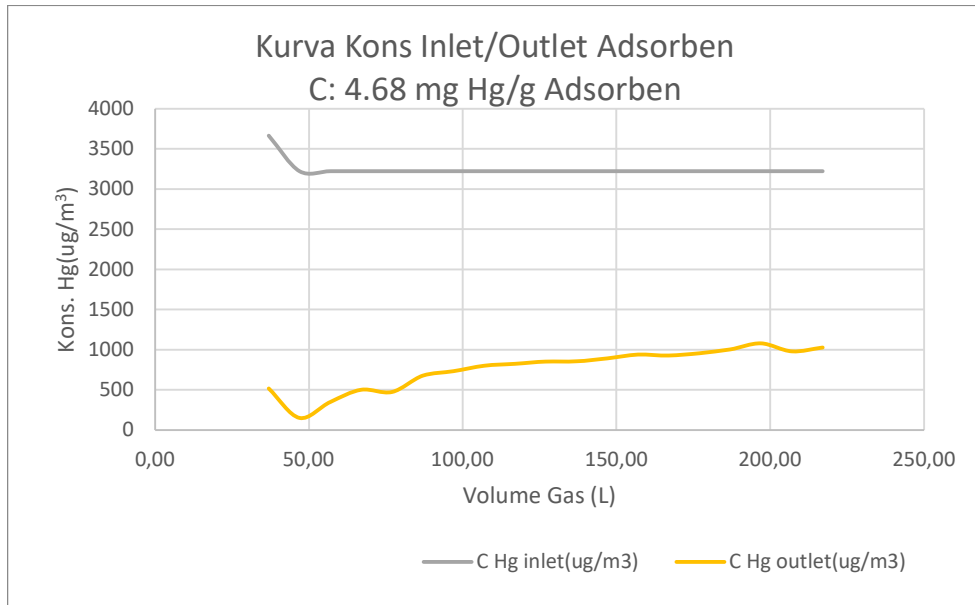
**AC-CuS 33%, T<sub>sat</sub> 30°C/T<sub>ads</sub> 30°C**



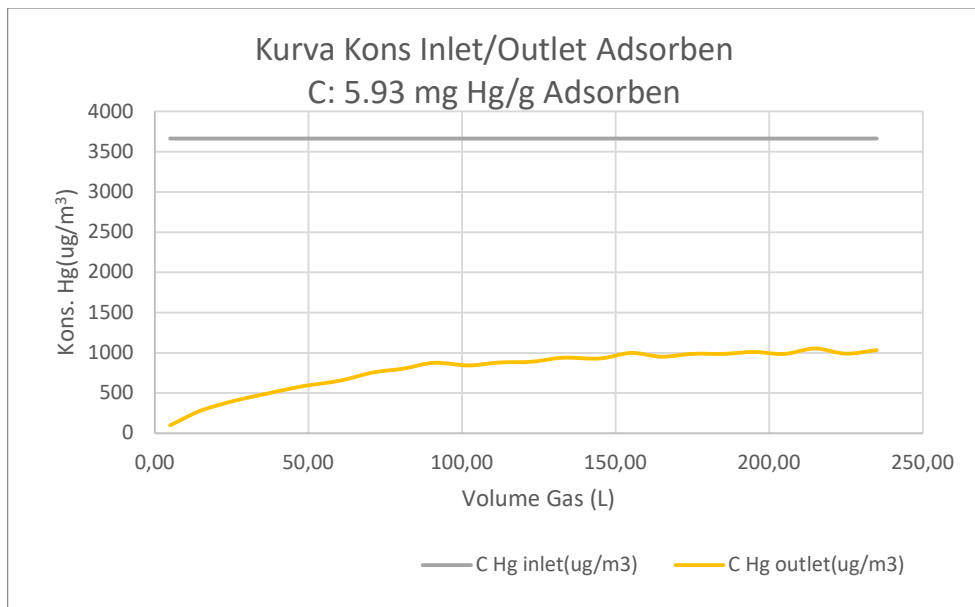
**AC-CuS,  $T_{\text{sat}} 30^\circ\text{C}/T_{\text{ads}} 30^\circ\text{C}$**



**AC-ZnCL<sub>2</sub> 6%,  $T_{\text{sat}} 30^\circ\text{C}/T_{\text{ads}} 30^\circ\text{C}$**

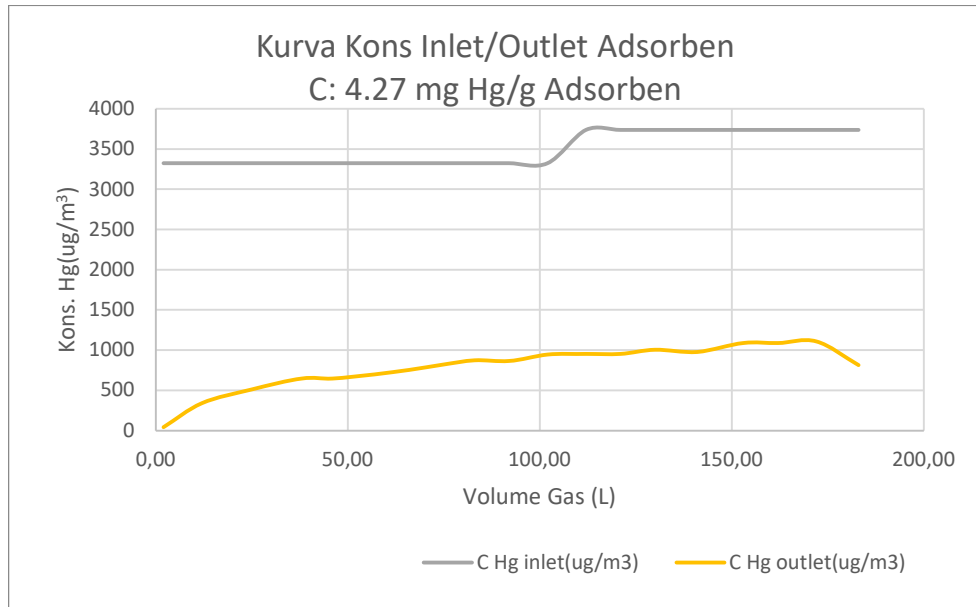


**AC-ZnCl<sub>2</sub> 7%, T<sub>sat</sub> 30°C/T<sub>ads</sub> 30°C**



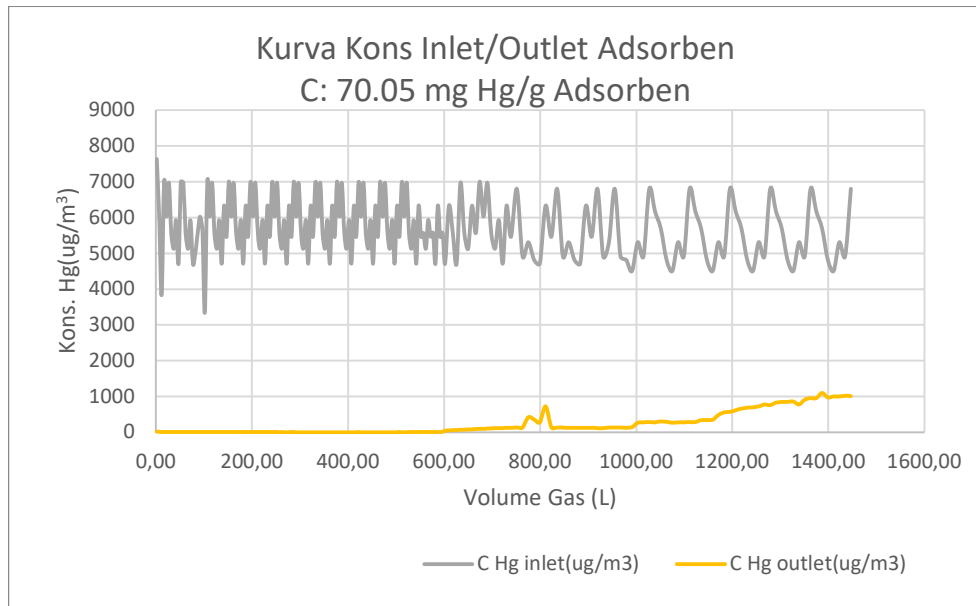
**AC-ZnCl<sub>2</sub> 8%, T<sub>sat</sub> 30°C/T<sub>ads</sub> 30°C**



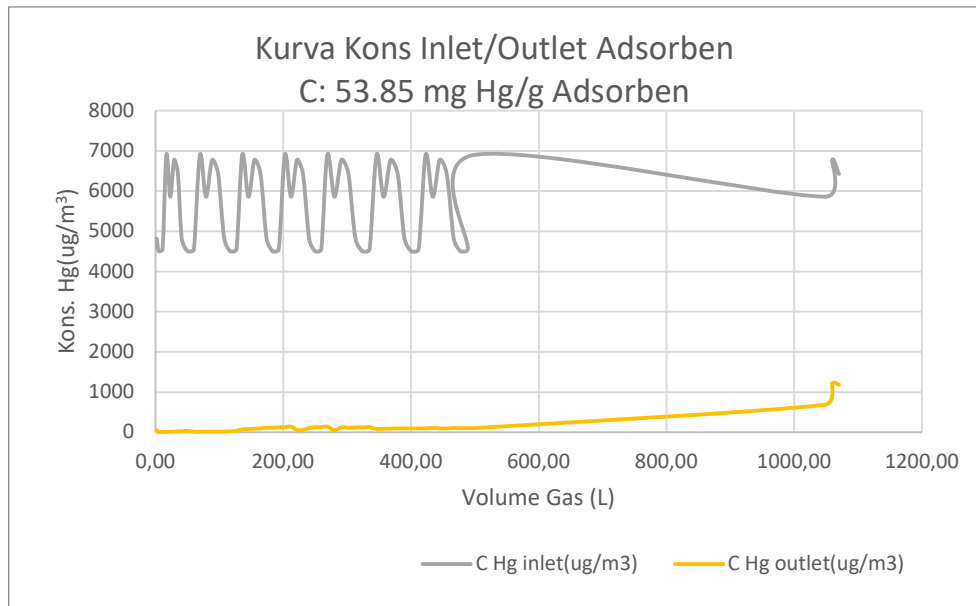


AC-ZnCL<sub>2</sub> 9%, T<sub>sat</sub> 30°C/T<sub>ads</sub> 30°C

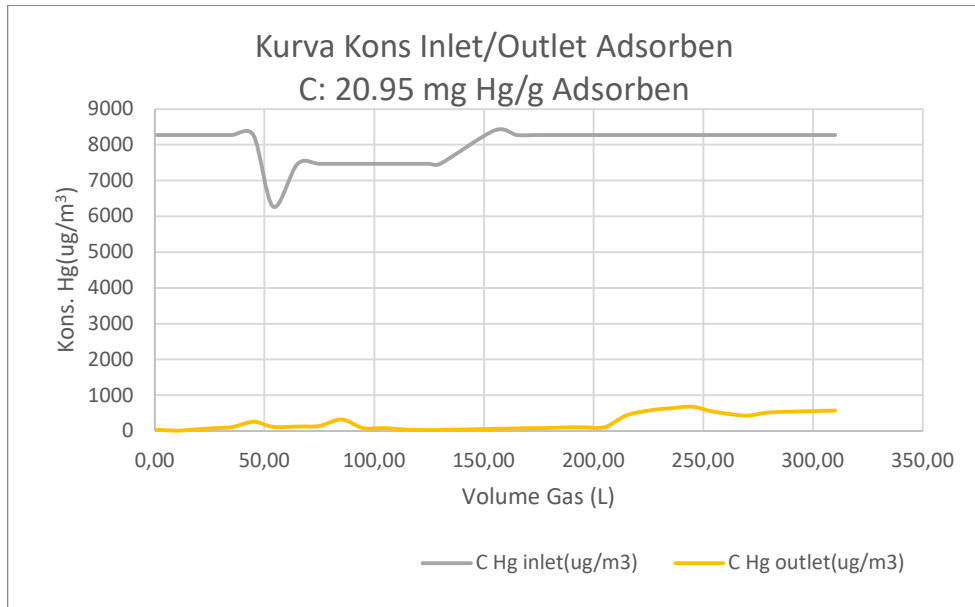
Lampiran 22 Kurva Uji Kinerja Adsorben Suhu Saturasi 40°C dan Suhu Uji 40°C



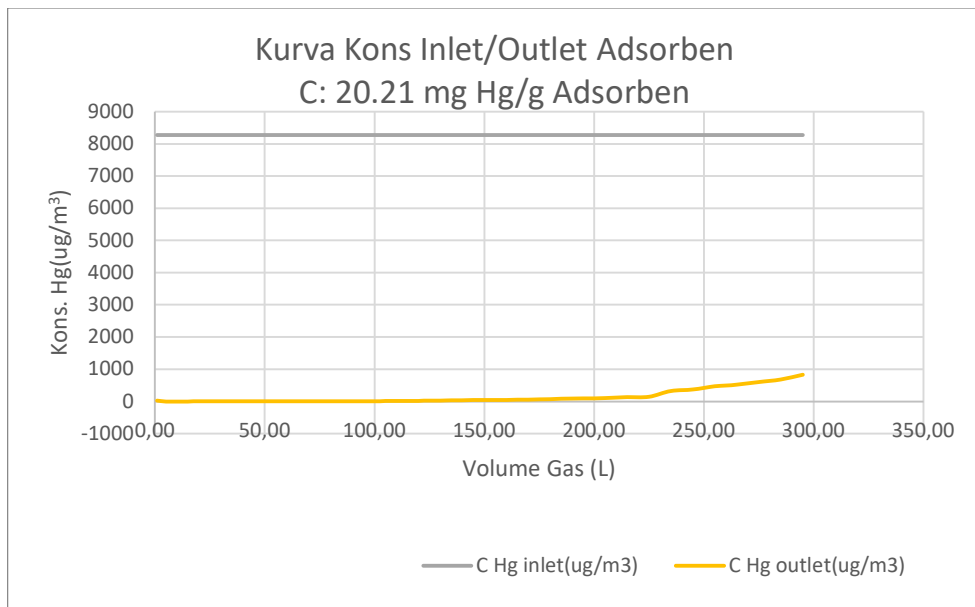
AC-S 16%, T<sub>sat</sub> 40°C/T<sub>ads</sub> 40°C



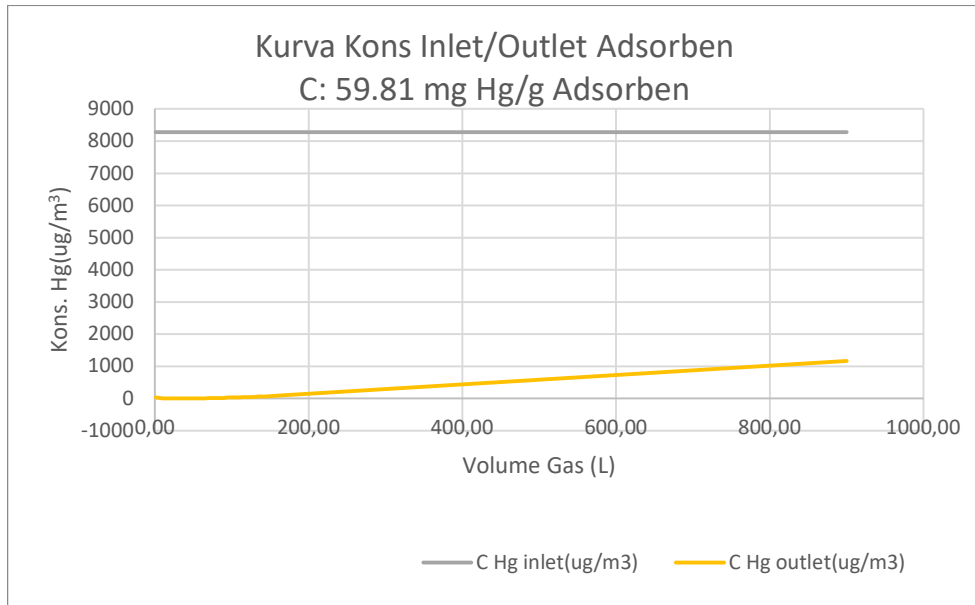
AC-S 33%, T<sub>sat</sub> 40°C/T<sub>ads</sub> 40°C



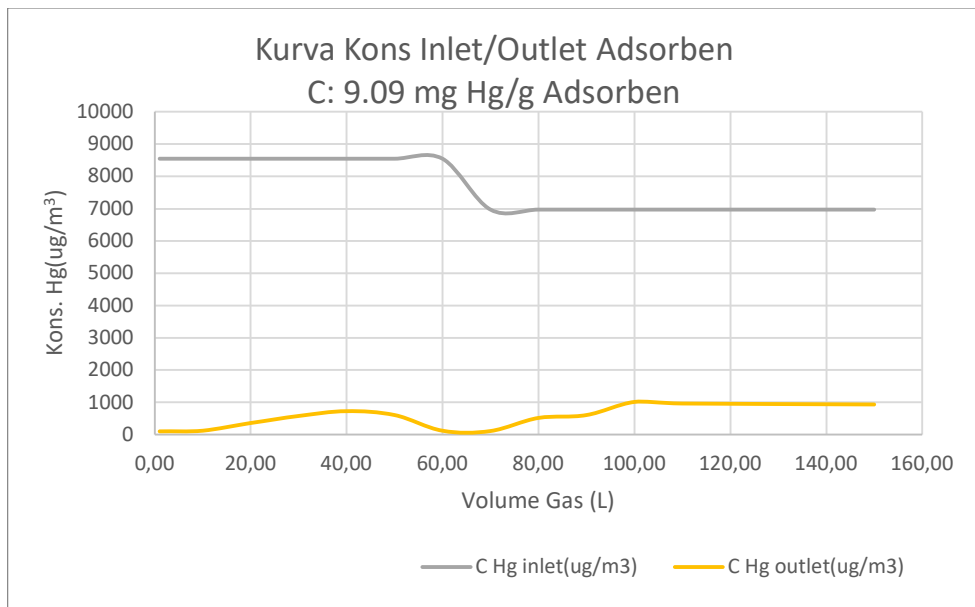
**AC-S 50%,  $T_{sat}$  40°C/ $T_{ads}$  40°C**



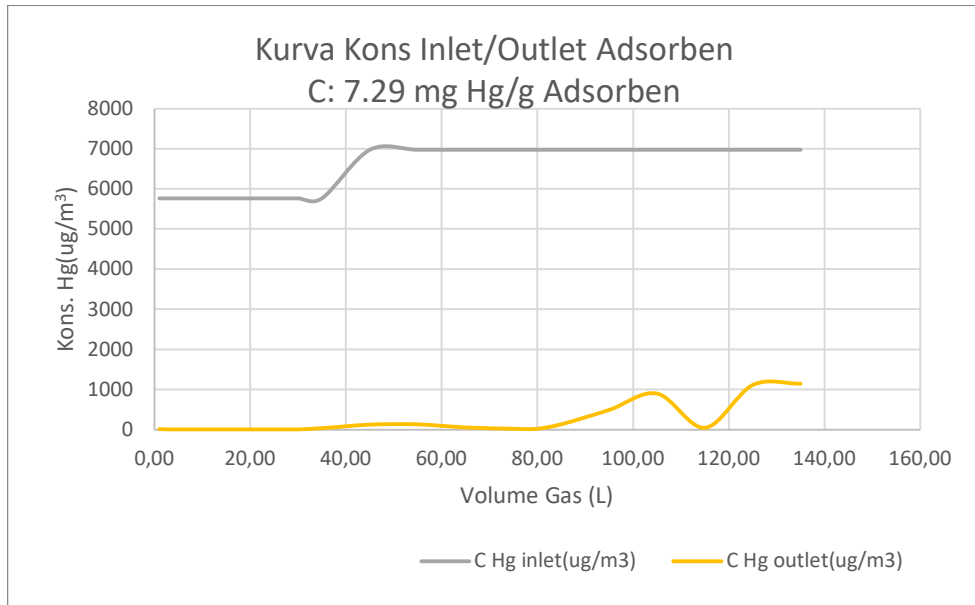
**AC-CuS 13%,  $T_{sat}$  40°C/ $T_{ads}$  40°C**



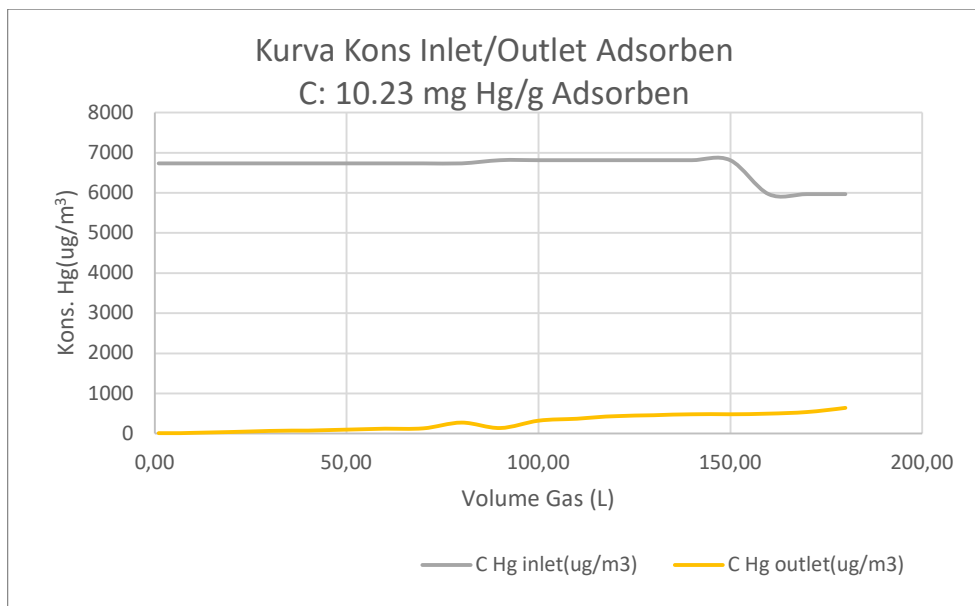
AC-CuS 20%,  $T_{\text{sat}} 40^\circ\text{C}/T_{\text{ads}} 40^\circ\text{C}$



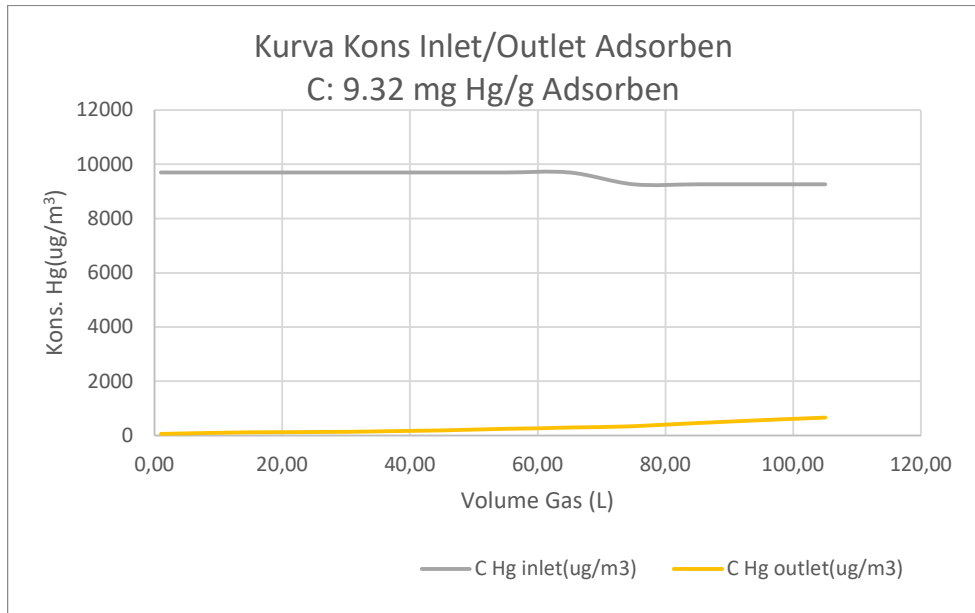
AC-CuS 33%,  $T_{\text{sat}} 40^\circ\text{C}/T_{\text{ads}} 40^\circ\text{C}$



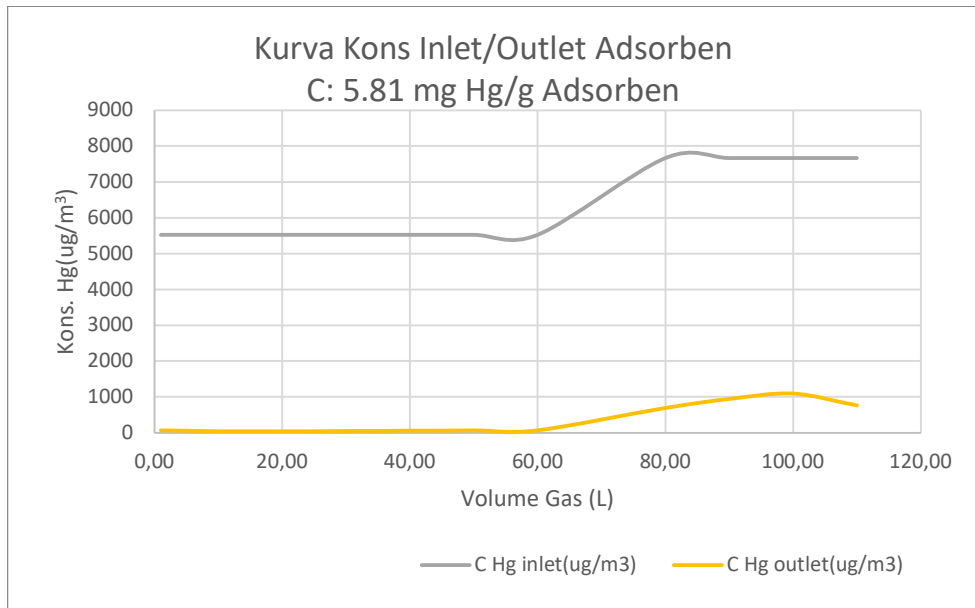
**AC-CuS, T<sub>sat</sub> 40°C/T<sub>ads</sub> 40°C**



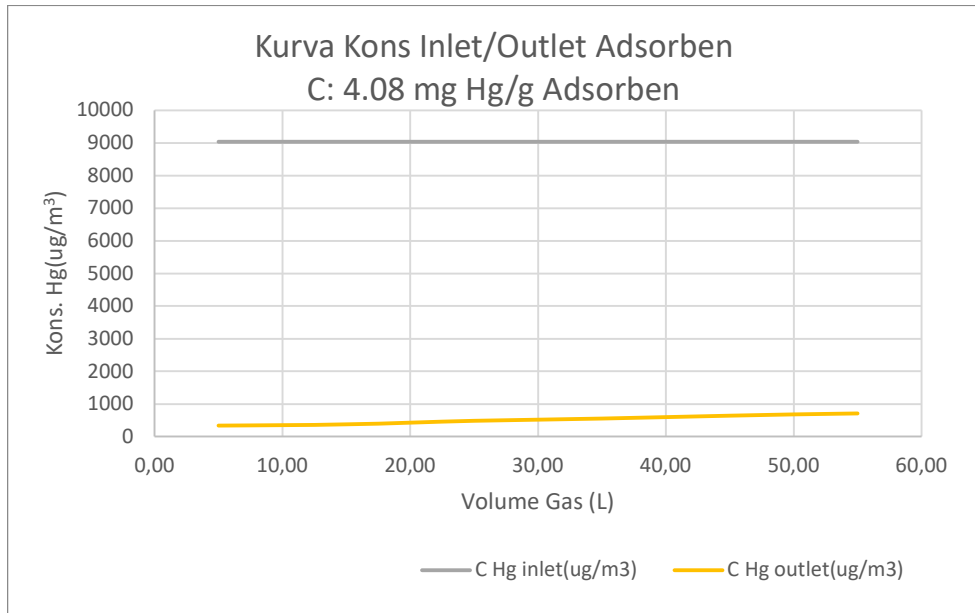
**AC-ZnCL<sub>2</sub> 6%, T<sub>sat</sub> 40°C/T<sub>ads</sub> 40°C**



**AC-ZnCL<sub>2</sub> 7%, T<sub>sat</sub> 40°C/T<sub>ads</sub> 40°C**



**AC-ZnCL<sub>2</sub> 8%, T<sub>sat</sub> 40°C/T<sub>ads</sub> 40°C**



AC-ZnCL<sub>2</sub> 9%, T<sub>sat</sub> 40°C/T<sub>ads</sub> 40°C

Lampiran 23 Hasil Uji SEM-EDX



**PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN TEKNOLOGI MINYAK DAN GAS BUMI  
"LEMIGAS"**

JL. Ciledug Raya Kav.109, Cipulir, Kebayoran Lama, Jakarta 12230, Indonesia  
Phone: 021-7230046 (direct line) or 7394422 ext. 1318

**LAPORAN AKHIR**

**HASIL ANALISIS SEM-EDX  
12 (DUA BELAS) PERCONTO KARBON AKTIF**

Oleh:  
Laboratorium Sedimentologi  
Kelompok Geologi dan Geoinformasi  
KPPT EKSPLORASI

No. Pekerjaan 20-19-51

November, 2020

Dipersiapkan untuk:

**KPP TEKNOLOGI GAS**  
PENELITIAN PENGEMBANGAN DAN UJI KINERJA ABSORBEN  
UNTUK MENURUNKAN KONSENTRASI MERKURI DARI GAS ALAM  
TAHUN ANGGARAN 2020

**DAFTAR ISI**

COVER .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	ii
<b>1. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Tujuan.....	1
1.2. Ketersediaan data .....	1
1.3. Metoda and penyajian data .....	1
<b>2. HASIL ANALISIS</b> .....	<b>3</b>
<b>3. REFERENSI</b> .....	<b>9</b>

**DAFTAR LAMPIRAN**

Lampiran-01 : Deskripsi dan Foto Mikro Hasil Analisis SEM-EDX Perconto **1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 81, 82, 83, 84, D12**

## 1. PENDAHULUAN

Laporan ini disusun berdasarkan hasil pengamatan dan analisis menggunakan metode *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan dikombinasikan dengan analisis *Energy Dispersive by X-Ray Spectrometry* (EDX) yang dilakukan pada percontonya dengan kode 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 81, 82, 83, 84 dan D12. Pekerjaan analisis ini dilaksanakan berdasarkan permintaan dari KPPP Teknologi Gas.

### 1.1. Tujuan

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui morfologi dan karakteristik komponen penyusun percontonya yang dianalisis.

### 1.2. Ketersediaan data

Data yang digunakan untuk analisis ini terdiri dari 12 (dua belas) percontonya serbuk karbon aktif dengan kode 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 81, 82, 83, 84 dan D12. Seluruh percontonya terpilih disediakan oleh KPPP Teknologi Gas.

### 1.3. Metoda and penyajian data

Preparasi dan analisis SEM-EDX

Metoda analisis yang digunakan dalam pekerjaan ini adalah *Scanning Electron Microscope* (SEM) yang dilengkapi dengan *Energy Dispersive by X-Ray Spectrometry* (EDX). Metode standar yang diterapkan untuk preparasi dan analisis SEM-EDX diuraikan sebagai berikut:

Preparasi diawali dengan membersihkan percontonya menggunakan pelarut organik dan dikeringkan secara ultrasonik, kemudian dipatahkan untuk membuat permukaan rata dan bersih. Percontonya selanjutnya dilekatkan diatas *Cu stub* berukuran 10 mm dan dibersihkan dengan semprotan udara untuk menghilangkan debu-debu dan unsur pengotor

lainnya. Tahapan selanjutnya percontonya dilapisi secara elektrostatik dengan karbon atau *gold-palladium* agar bersifat konduktif terhadap elektron. Preparat siap untuk dianalisis dengan alat SEM tipe JSM-6390-LA yang dilengkapi dengan sistem perekaman gambar secara digital.

Peralatan SEM tipe JSM-6390-LA dilengkapi dengan piranti EDX yang berfungsi untuk mengidentifikasi jenis mineral. Analisis SEM-EDX difokuskan untuk mengetahui distribusi mineral autigenik, pertumbuhan dan perkembangan sistem pori. Kehadiran mineral autigenik diamati secara detail dengan memperbesar fokus gambar pada saat pengamatan dan dilanjutkan dengan analisis EDX untuk mengetahui unsur/ elemen yang terkandung dalam mineral. Objek mineral yang teramati dilakukan perekaman gambar/ foto SEM serta didukung dengan penjelasan unsur penyusun mineralnya. Semua hasil analisis SEM dan EDX dapat dilihat pada **Plate S.01-S.12** dan **Plate E.01-E.12D**.

## 2. HASIL ANALISIS

5, 6, 7, 81, 82, 83, 84 dan D12 difokuskan untuk mengidentifikasi komponen penyusun berdasarkan pengamatan morfologi dan analisis unsur pembentuk komponen tersebut.

### 2.1. Perconto 1

Hasil pengamatan di bawah mikroskop elektron (SEM) dengan konfigurasi elektron sekunder menunjukkan bahwa perconto 1 terdiri dari butiran dengan ukuran berkisar dari 250 µm hingga 550 µm. Secara keseluruhan butiran penyusun perconto 1 memperlihatkan tingkat kebundaran menyudut hingga membundar tanggung serta keseragaman butiran yang tergolong sedang hingga baik (Lihat **Lampiran-01; Plate S.01**). Pengukuran terhadap panjang rongga pori dilakukan pada salah satu butiran yang memiliki bidang permukaan menyerupai serat kayu dengan ukuran pori-pori 1 µm sampai 6.5 µm.

Analisis EDX terhadap komponen penyusun perconto menunjukkan bahwa semua butiran memiliki komposisi kimiawi yang homogen dengan unsur utama berupa Sulfur (S), persentase massa (mass%) 40.05% (lihat **Lampiran-01; Plate E.01 – E.01D**).

### 2.2. Perconto 2

Hasil pengamatan SEM pada perconto 2 menunjukkan karakteristik butiran dengan rentang ukuran butir 220 µm hingga 610 µm. Butiran penyusun perconto 2 secara umum menunjukkan tingkat kebundaran menyudut sampai membundar tanggung dengan keseragaman butir sedang hingga baik (Lihat **Lampiran-01; Plate S.02**). Pengukuran terhadap panjang rongga pori dilakukan pada salah satu butiran yang memiliki bidang permukaan tidak teratur dengan ukuran pori-pori 0.5 µm sampai 8 µm.

Analisis EDX terhadap komponen penyusun perconto menunjukkan komposisi unsur yang relatif homogen berupa Sulfur (S) dengan persentase massa (mass%) 40.05% (lihat **Lampiran-01; Plate E.02 – E.02D**).

### 2.3. Perconto 3

Hasil pengamatan SEM pada perconto 3 menunjukkan rentang ukuran butir dari 270 µm hingga 550 µm. Karakteristik perconto mengindikasikan tingkat kebundaran menyudut hingga membundar tanggung, dengan keseragaman butir sedang sampai baik (Lihat **Lampiran-01; Plate S.03**). Ukuran pori bervariasi dari 0.5 µm hingga 13 µm.

Analisis EDX dilakukan pada beberapa titik baik secara general maupun dengan perbesaran tinggi. Hasil analisis menunjukkan keseluruhan butiran mengandung unsur Sulfur (S) dengan persentase massa (mass%) 40.05% (lihat **Lampiran-01; Plate E.03 – E.03D**).

### 2.4. Perconto 4

Hasil pengamatan SEM pada perconto 4 menunjukkan karakteristik butiran dengan rentang ukuran butir 280 µm hingga 470 µm. Butiran penyusun perconto 4 memperlihatkan tingkat kebundaran menyudut sampai membundar tanggung dengan keseragaman butir sedang hingga baik (Lihat **Lampiran-01; Plate S.04**). Pengukuran terhadap panjang rongga pori dilakukan pada salah satu butiran yang memiliki bidang permukaan rata dan berpori. Pada perconto 4, rongga pori mempunyai rentang ukuran dari 1 µm sampai 37 µm.

Analisis EDX pada perconto 4, menunjukkan dominasi komposisi penyusun berupa Tembaga dan Sulfur. Persentase massa (mass%) bervariasi dari 6.34% - 18.14% untuk unsur Tembaga (Cu) dan 30.95% -

36.87% untuk unsur Sulfur (S), hasil analisis detil dapat dilihat pada **Lampiran-01; Plate E.04 – E.04D**.

#### 2.5. Perconto 5

Berdasarkan hasil pengamatan di bawah mikroskop elektron (SEM), perconto 5 memiliki komponen penyusun berukuran 240 µm hingga 520 µm. Masing-masing komponen memperlihatkan tingkat kebundaran menyudut hingga membundar tanggung dengan tingkat keseragaman butiran sedang hingga baik (Lihat **Lampiran-01; Plate S.05**). Pengukuran terhadap panjang rongga pori dilakukan pada salah satu butiran yang memiliki bidang permukaan tidak teratur atau bergelombang dengan rentang ukuran pori-pori 0.5 µm sampai 5 µm.

Hasil analisis EDX yang dilakukan pada beberapa butiran merepresentasikan dominansi dua unsur yaitu Tembaga dan Sulfur. Kehadiran unsur Tembaga (Cu) terdeteksi dengan persentase massa (mass%) 8.94% - 44.38% sedangkan untuk unsur Sulfur (S) mempunyai persentase 17.80% - 35.57% (lihat **Lampiran-01; Plate E.05 – E.05D**).

#### 2.6. Perconto 6

Pengamatan SEM pada perconto 6 menunjukkan variasi ukuran butiran penyusun dari 240 µm hingga 540 µm. Secara umum masing-masing butiran memiliki tingkat kebundaran menyudut sampai membundar tanggung dengan keseragaman butir sedang hingga baik (Lihat **Lampiran-01; Plate S.06**). Pengukuran terhadap panjang rongga pori dilakukan pada salah satu butiran yang memiliki bidang permukaan yang tidak rata dan bergelombang dengan ukuran pori-pori 1 µm sampai 15 µm.

Analisis EDX pada perconto yang sama, juga menunjukkan dominansi unsur Tembaga dan Sulfur. Komponen tersebut terdeteksi hadir dengan persentase massa (mass%) berkisar 3.16% - 11.24% untuk unsur

Tembaga (Cu) dan 34.41% - 38.47% untuk unsur Sulfur (S). Hasil analisis detil EDX pada perconto 6 dapat dilihat pada **Lampiran-01; Plate E.06 – E.06D**.

#### 2.7. Perconto 7

Hasil pengamatan di bawah mikroskop elektron (SEM) menunjukkan perconto 7 disusun oleh variasi material berukuran 260 µm hingga 700 µm. Tingkat kebundaran butiran teramati menyudut hingga membundar tanggung dengan keseragaman butiran tergolong sedang hingga baik (Lihat **Lampiran-01; Plate S.07**). Pengukuran rongga pori dilakukan pada salah satu butiran yang memiliki bidang permukaan menyerupai serat kayu berpori dengan ukuran pori-pori dari 0.5 µm sampai 13 µm.

Analisis EDX yang dilakukan pada beberapa area menunjukkan dominansi unsur Tembaga dan Sulfur. Kehadiran (mass%) unsur Tembaga (Cu) terdeteksi 46.65% - 50.88% dan unsur Sulfur (S) 14.54% - 16.66% (lihat **Lampiran-01; Plate E.07 – E.07D**).

#### 2.8. Perconto 8

Hasil pengamatan SEM menunjukkan karakteristik material pada perconto 8 yang disusun oleh butiran dengan rentang ukuran dari 250 µm hingga 550 µm. Secara tekstur, perconto 8 memiliki tingkat kebundaran menyudut sampai membundar tanggung dan keseragaman butir relatif sedang hingga baik (Lihat **Lampiran-01; Plate S.08**). Pori-pori ditemukan cukup signifikan di dalam butiran dengan rentang ukuran 0.7 µm sampai 7.5 µm.

Hasil analisis EDX pada perconto 8 menunjukkan kehadiran unsur Seng dan Klorin. Masing-masing unsur terdeteksi dengan persentase massa (mass%) berkisar dari 39.21% - 44.20% untuk unsur Seng (Zn) dan 44.98% - 51.20% untuk unsur Klorin (Cl). Hasil analisis detil dapat dilihat pada **Lampiran-01; Plate E.08 – E.08D**.

### 2.9. Perconto 9

Hasil analisis SEM menggunakan konfigurasi elektron sekunder pada perconto 9 menunjukkan variasi ukuran butiran penyusun dari 250 µm hingga 470 µm. Pengamatan SEM juga memperlihatkan tingkat kebundaran penyudut hingga membundar tanggung serta keseragaman butiran yang tergolong sedang hingga baik (Lihat **Lampiran-01; Plate S.09**). Pengukuran terhadap panjang rongga pori dilakukan pada salah satu butiran yang memiliki bidang permukaan bergelombang dengan ukuran pori-pori 0.5 µm sampai 20 µm.

Analisis EDX terhadap komponen penyusun perconto menunjukkan komposisi unsur Seng (Zn) dengan persentase massa (mass%) 40.43% - 46.84% dan Klorin (Cl) dengan persentase 41.70% - 46.98% (lihat **Lampiran-01; Plate E.09 – E.09D**).

### 2.10. Perconto 10

Hasil pengamatan di bawah mikroskop elektron (SEM) dengan konfigurasi elektron sekunder menunjukkan perconto 10 memiliki tingkat kebundaran dari menyudut hingga membundar tanggung dengan keseragaman butir sedang sampai baik. Butiran umumnya berukuran dari 300 – 550 µm (Lihat **Lampiran-01; Plate S.10**). Ukuran pori bervariasi dengan panjang rongga mulai dari 1 µm hingga 10 µm.

Analisis EDX dilakukan pada beberapa titik baik secara general maupun dengan perbesaran tinggi. Komponen penyusun didominasi unsur Seng (Zn) dengan persentase massa (mass%) 43.07% - 50.93% dan Klorin (Cl) dengan persentase 36.61% - 46.39% (lihat **Lampiran-01; Plate E.10 – E.10D**).

### 2.11. Perconto 11

Hasil pengamatan SEM pada perconto 11 menunjukkan karakteristik butiran dengan rentang ukuran 220 µm hingga 525 µm. Material

penyusun perconto 11 secara umum menunjukkan tingkat kebundaran menyudut sampai membundar tanggung dengan keseragaman butir sedang hingga baik (Lihat **Lampiran-01; Plate S.11**). Pengukuran terhadap panjang rongga pori dilakukan pada salah satu butiran yang memiliki bidang permukaan bergelombang dan berpori cukup rapat dengan kisaran ukuran 1 µm sampai 23 µm.

Hasil analisis EDX pada perconto ini juga menunjukkan dominansi unsur Seng dan Klorin. Kehadiran unsur Seng (Zn) terdeteksi dengan persentase massa (mass%) 41.28% - 55.75 dan Klorin (Cl) dengan persentase 30.60% - 48.62% (lihat **Lampiran-01; Plate E.11 – E.11D**).

### 2.12. Perconto 12

Hasil pengamatan perconto 12 menunjukkan variasi material berukuran butir dari 270 µm hingga 570 µm. Tingkat kebundaran butiran menyudut hingga membundar tanggung dengan keseragaman butiran tergolong sedang hingga baik (Lihat **Lampiran-01; Plate S.12**). Pengukuran rongga pori dilakukan pada salah satu butiran yang memiliki bidang permukaan menyerupai ruas-ruas bambu dan bergelombang dengan rentang ukuran pori dari 1 µm sampai 15 µm.

Analisis EDX yang dilakukan pada beberapa titik di dalam perconto, menunjukkan spektrum EDX untuk tipe unsur Kalium (K) dengan peak yang rendah (lihat **Lampiran-01; Plate E.12 – E.12D**).

### 3. REFERENSI

- Almond, W. R., and D. K. Davies, 1978. Clay technology and well stimulation: Gulf Coast Assoc. Geol. Sacs. Trans., v.28, p.1-6.
- Almond, W. R., and D. K. Davies, 1981. Formation damage and the crystal chemistry of clays, in F.J. Longstaffe, ed., Short course in clays and the resource geologist: Mineralogical Assoc. Canada, p. 81-102.
- Grim, R.E., 1968. Clay Mineralogy, 2nd ed. McGraw Hill, New York.
- Hower, W.F., 1974. Influence of clays on the production of hydrocarbons: Symposium on Formation Damage Control, Soc. Pet. Engineers, Paper SPE4785, p. 165-172.
- Joint Committee on Powder Diffraction Standards, 1974. Selected Powder Diffraction Data for Minerals 1<sup>st</sup> Rd., Philadelphia, 833 pages.
- Kerr, P. F., 1959, Optical Mineralogy, 3rd Ed. McGraw-Hill Book Company, New York, 442 p.
- Trewin, N., 1988. Use of scanning electron microscope in sedimentology, in Tucker, M., ed., Techniques in Sedimentology, Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 229-273.
- Welton, J. A., 2003, SEM Petrology Atlas, 2nd printing, The AAPG Methods in Exploration Series No. 4, Tulsa, Oklahoma, 240 p.

**Deskripsi dan Foto Mikro Hasil Analisis SEM-EDX  
Perconto 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 81, 82, 83, 84, D12**

**PLATE: S.01**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
Kode Sampel : 1

**Foto Mikro SEM Bagian Atas**

Kenampakan SEM secara umum menunjukkan butiran-butiran pada percontonya serbuk dengan rentang ukuran butir 250 - 550 µm, tingkat kebundaran butiran menyudut hingga membundar tanggung dengan pemilahan sedang - baik. Komposisi utama yang menyusun butiran dalam percontonya adalah Sulfur (S) dengan persentase rata-rata 40.05% (**EDX Plate E.01, E.01A, E01B, dan E.01C**).

Perbesaran: x 75

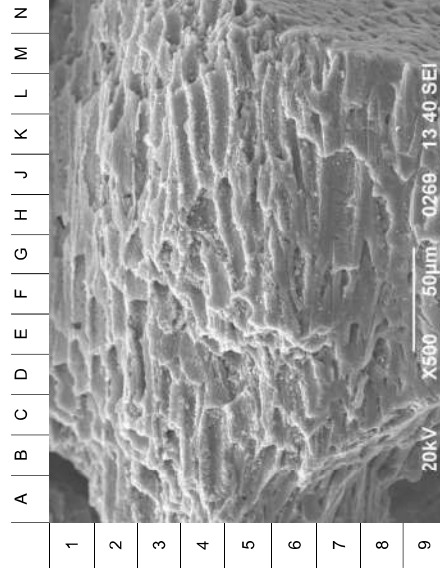
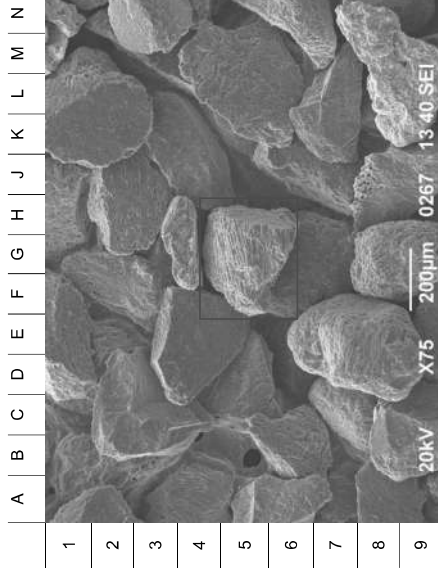
**Foto Mikro SEM Bagian Bawah**

Gambar detail SEM menunjukkan salah satu butiran di dalam percontonya pada perbesaran 500X dengan bentuk menyudut tanggung dan morfologi berupa serat kayu dengan pori-pori dengan rongga yang cukup rapat berukuran 1 µm sampai 6.5 µm. Komposisi yang menyusun butiran adalah Sulfur (S) (**EDX Plate E.01D**).

Perbesaran: x 500

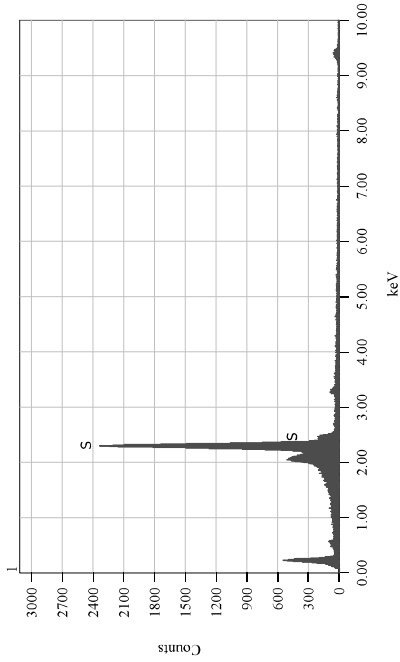
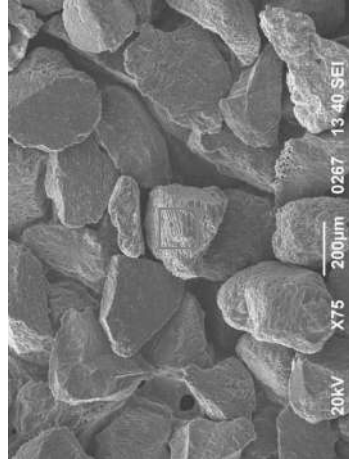
**PLATE: S.01**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
Kode Sampel : 1



**PLATE E.01**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 1

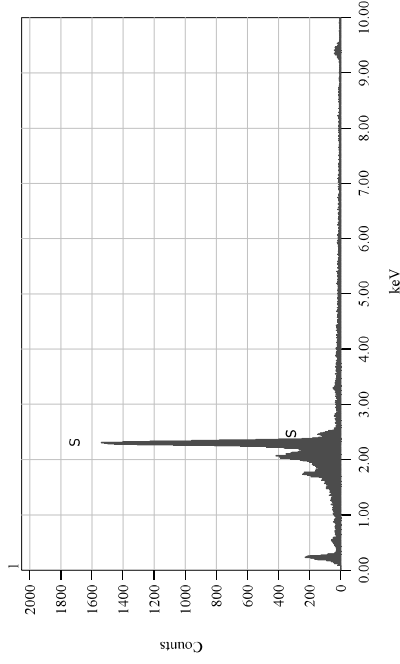
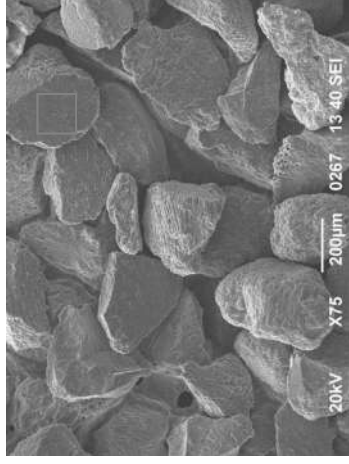


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	59.95	59.95						
S	2.307	40.05	0.88	100.00	SO3	100.00	8.00	100.00000
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.00</b>	

**PLATE E.01A**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 1



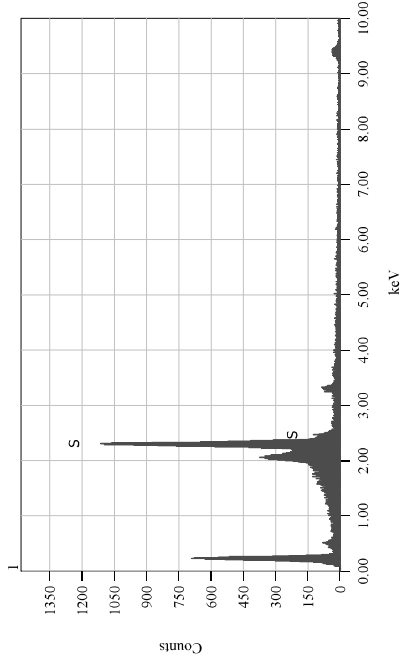
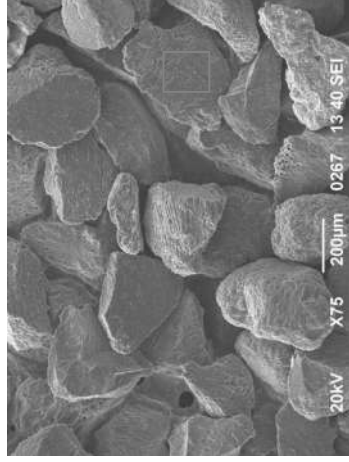
ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	59.95	59.95						
S	2.307	40.05	0.81	100.00	SO3	100.00	8.00	100.00000
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.00</b>	



**PLATE E.01B**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 1

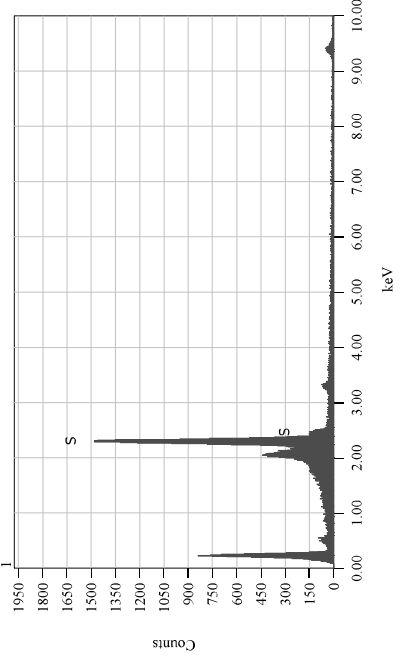
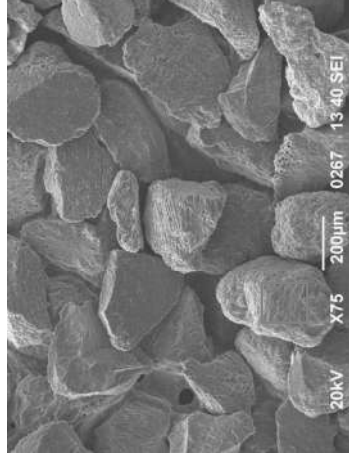


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	59.95	59.95	40.05	1.32	100.00	\$O_3\$	100.00	8.00 100.00000
S	2.307	40.05	1.32	100.00	\$S_3\$	100.00	100.00	8.00 100.00000
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>8.00</b>

**PLATE E.01C**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 1

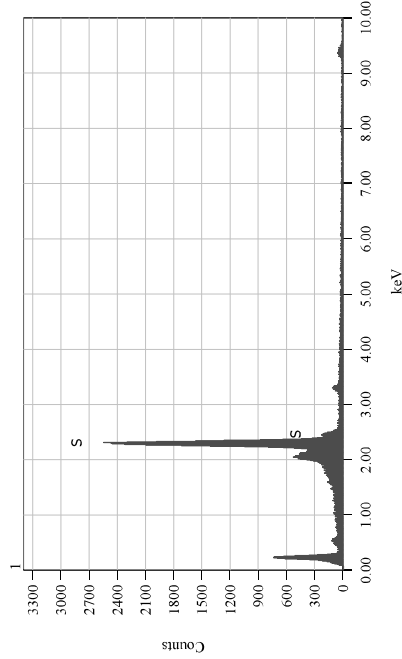
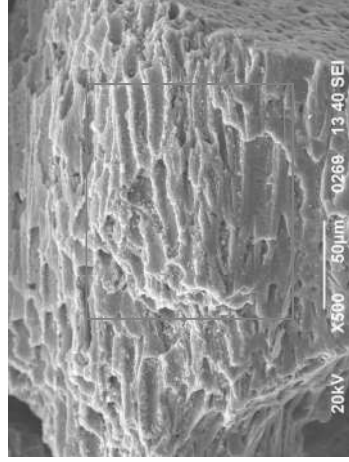


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	59.95	59.95	40.05	1.24	100.00	\$O_3\$	100.00	8.00 100.00000
S	2.307	40.05	1.24	100.00	\$S_3\$	100.00	100.00	8.00 100.00000
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>8.00</b>

**PLATE E.01D**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 1



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		59.95						
S K	2.307	40.05	0.92	100.00	SO3	100.00	8.00	100.00000
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.00</b>	

**PLATE: S.02**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 2

**Foto Mikro SEM Bagian Atas**

Kenampakan SEM secara umum menunjukkan butiran-butiran pada percontu serbuk dengan rentang ukuran butir 220-610 µm, tingkat kebundaran butiran menyudut hingga membundar tanggung dengan pemilahan sedang - baik. Komposisi utama yang menyusun butiran dalam percontu adalah Sulfur (S) dengan persentase rata-rata 40.05% (EDX Plate E.02, E.02A, E02B, dan E.02C).  
 Perbesaran: x 75

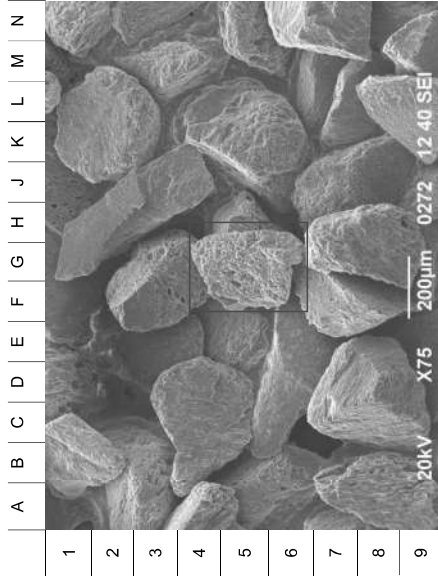
**Foto Mikro SEM Bagian Bawah**

Gambar detail SEM menunjukkan salah satu butiran yang menyusun percontu pada perbesaran 500X dengan bentuk menyudut tanggung dan morfologi tidak teratur disertai kemunculan pori yang cukup signifikan berukuran 0.5 µm sampai 8 µm. permukaan butiran juga cenderung banyak pengotor dan beberapa menutupi pori. Komposisi penyusun butiran didominasi oleh Sulfur (S) (EDX Plate E.02D).  
 Perbesaran: x 500

**PLATE: S.02**

Tipe Sampel  
Kode Sampel

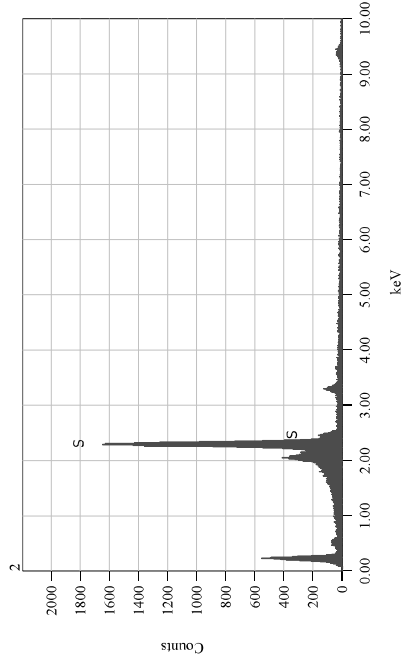
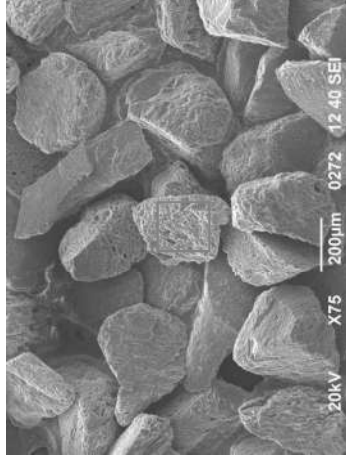
: Serbuk (karbon aktif)  
: 2



**PLATE E.02**

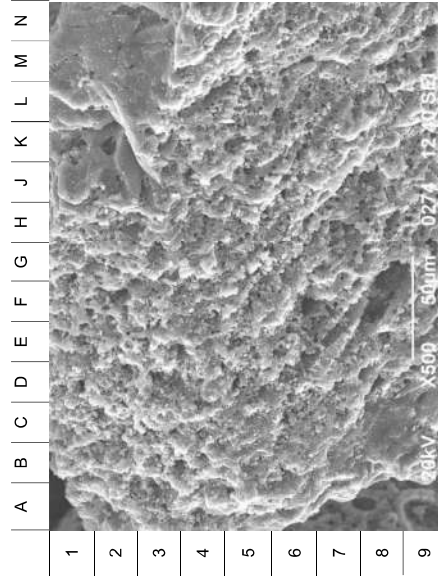
Tipe Sampel  
Kode Sampel

: Serbuk (karbon aktif)  
: 2



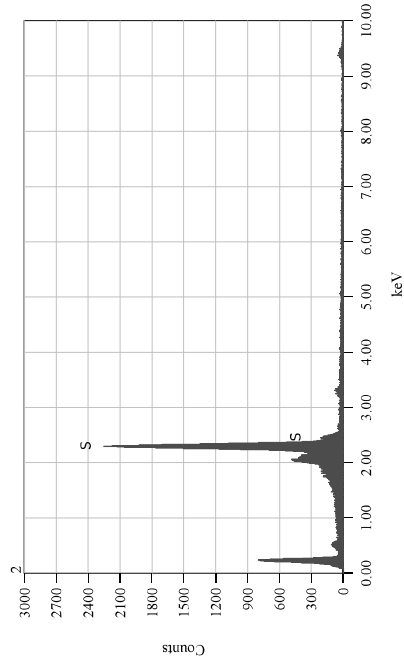
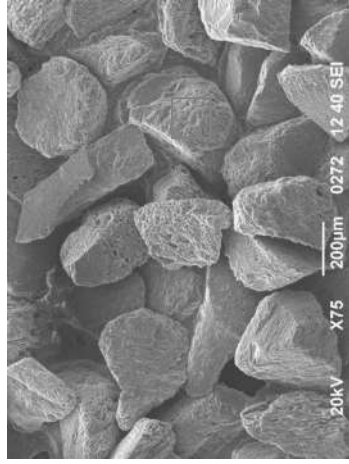
ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	59.95	59.95						
S	2.307	40.05	1.03	100.00	SO3	100.00	8.00	100.00000
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.00</b>	



**PLATE E.02A**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 2

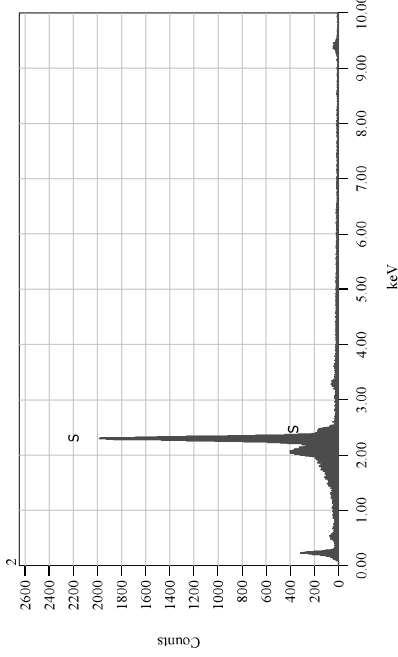
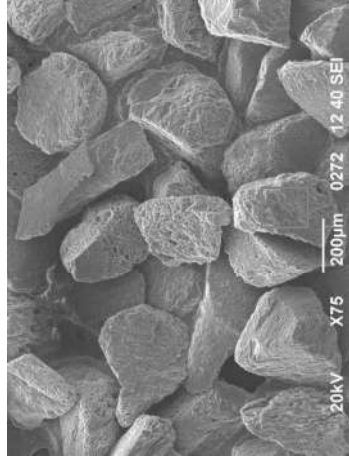


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	59.95	59.95		100.00	S03	100.00	8.00	100.00000
S	2.307	40.05	1.02	100.00	S03	100.00	100.00	8.00
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.00</b>	

**PLATE E.02B**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 2

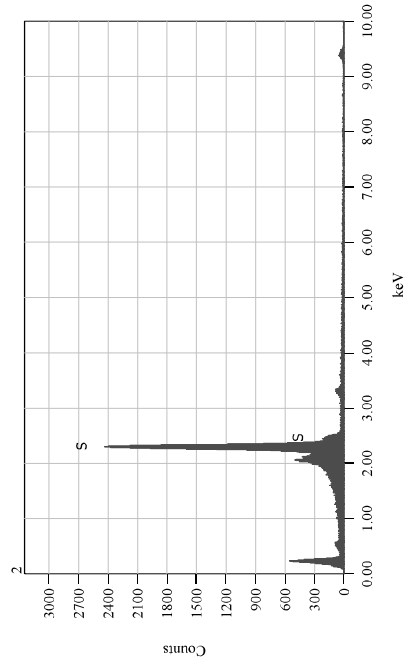
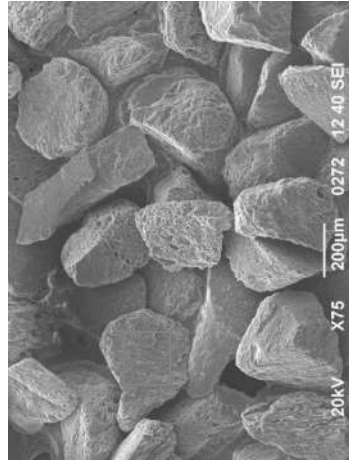


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	59.95	59.95		100.00	S03	100.00	8.00	100.00000
S	2.307	40.05	0.81	100.00	S03	100.00	100.00	8.00
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.00</b>	

**PLATE E.02C**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 2

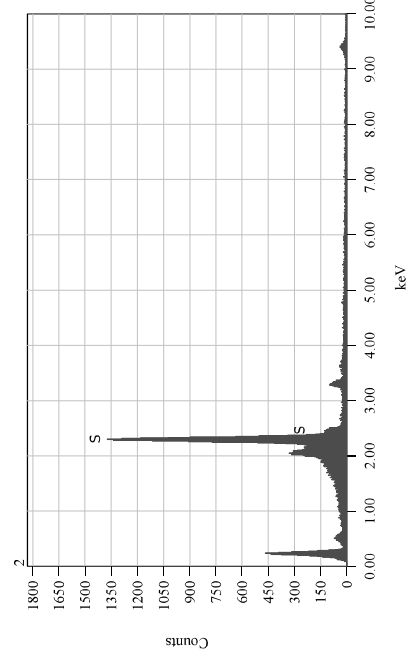
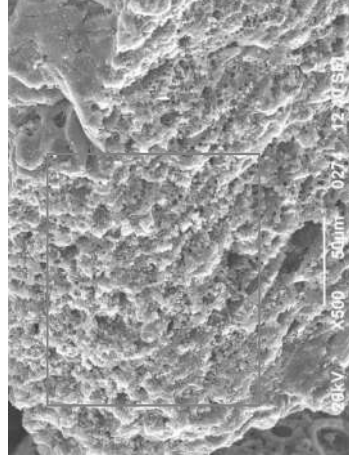


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	59.95	59.95						
S	2.307	40.05	0.86	100.00	SO3	100.00	8.00	100.00000
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.00</b>	

**PLATE E.02D**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 2



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	59.95	59.95						
S	2.307	40.05	1.02	100.00	SO3	100.00	8.00	100.00000
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.00</b>	

**PLATE: S.03**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 3

**Foto Mikro SEM Bagian Atas**

Kenampakan SEM secara umum menunjukkan butiran-butiran pada perconto serbuk dengan rentang ukuran butir 270-550 µm. tingkat kebundaran butiran menyudut hingga membundar tanggung dengan permilahan sedang - baik. Komposisi utama yang menyusun butiran dalam perconto adalah Sulfur (S) dengan persentase rata-rata 40.05% (EDX Plate E.03, E.03A, E03B, dan E.03C).

Perbesaran: x 75

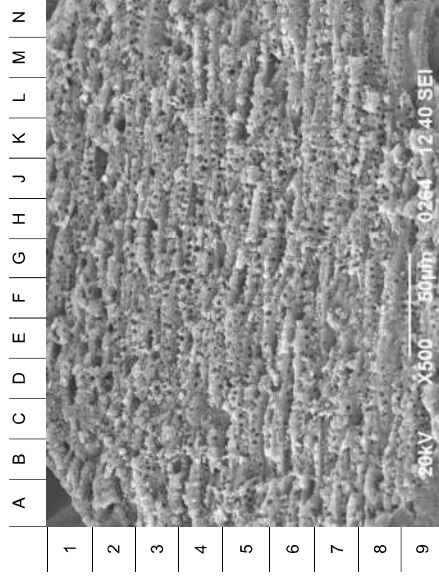
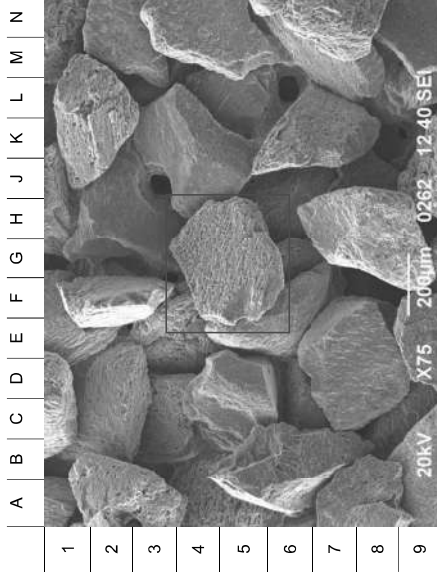
**Foto Mikro SEM Bagian Bawah**

Gambar detail SEM menunjukkan salah satu butiran yang menyusun perconto pada perbesaran 500X dengan bentuk menyudut tanggung dan morfologi seperti serat kayu dengan jarak antar pori yang cukup rapat dan merata (relatif sama besar) berukuran 0.5 µm sampai 13 µm. Komposisi utama butiran adalah Sulfur (S) (EDX Plate E.03D).

Perbesaran: x 500

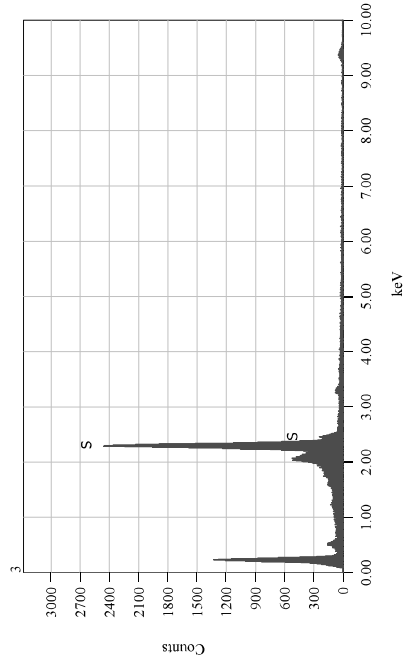
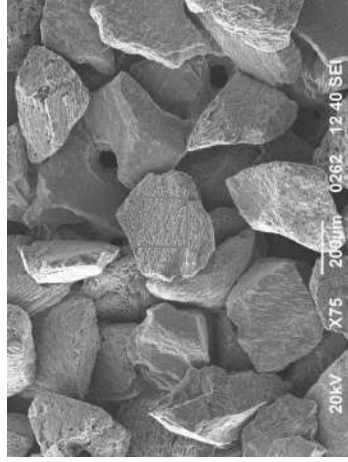
**PLATE: S.03**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 3



**PLATE E.03**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 3

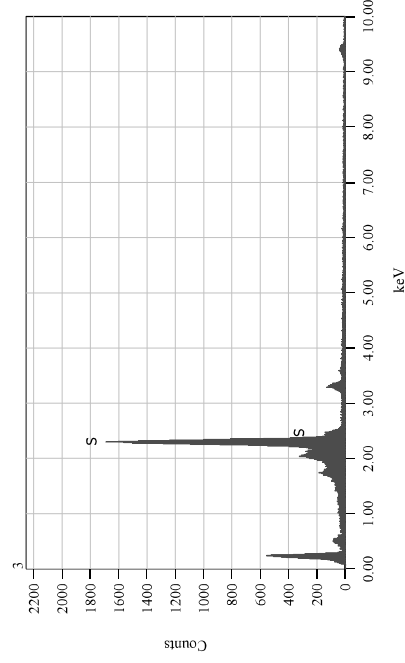
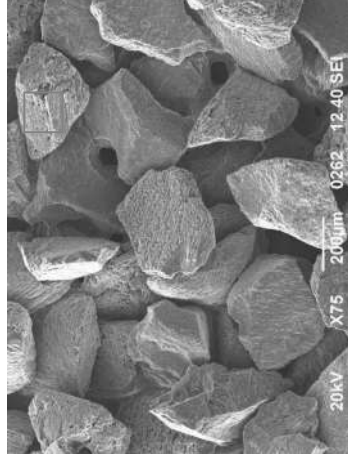


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	59.95	59.95						
S	2.307	40.05	1.22	100.00	SO3	100.00	8.00	100.00000
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.00</b>	

**PLATE E.03A**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 3

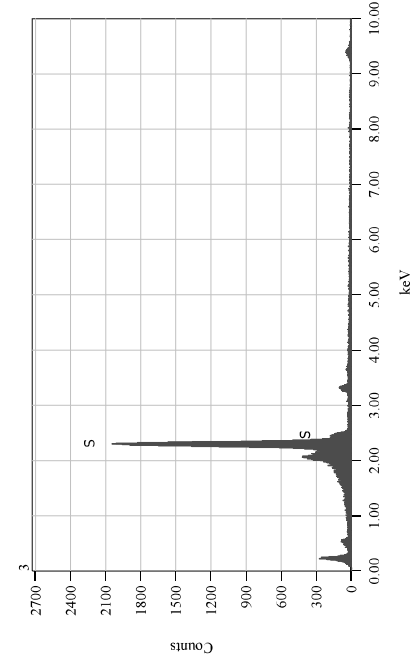


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	59.95	59.95						
S	2.307	40.05	0.98	100.00	SO3	100.00	8.00	100.00000
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.00</b>	

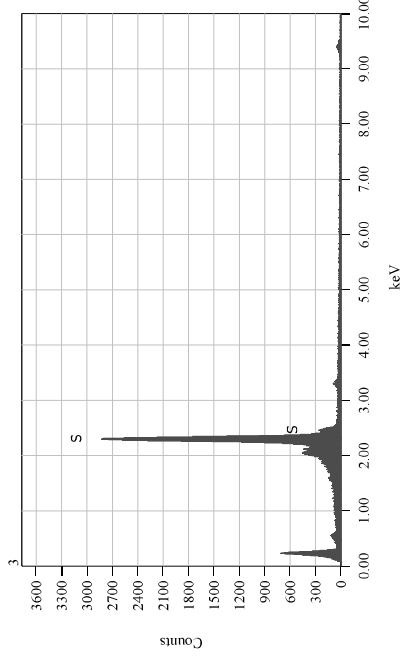
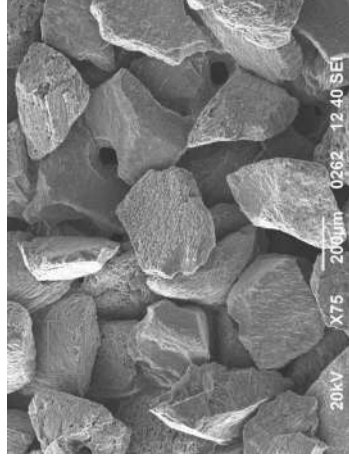
**PLATE E.03B**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 3



**PLATE E.03C**

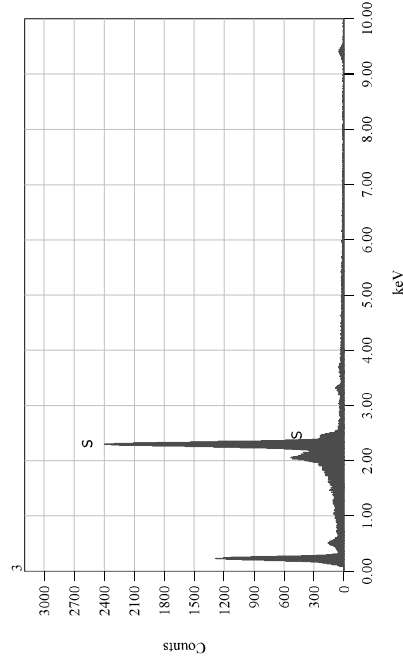
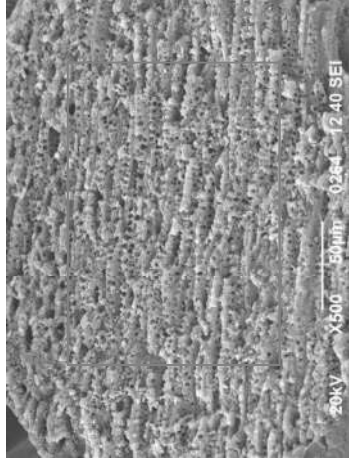
Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 3





**PLATE E.03D**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 3



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Moi%	Compound	mass%	Cation	K
O	59.95							
S	2.307	40.05	1.21	100.00	SO3	100.00	8.00	100.00000
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.00</b>	

**PLATE: S.04**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 4

**Foto Mikro SEM Bagian Atas**

Kenampakan SEM secara umum menunjukkan butiran-butiran pada perconto serbuk dengan rentang ukuran butir 280-470 µm, tingkat kebundaran butiran menyudut hingga membundar tanggung dengan permilahan sedang - baik. Komposisi utama yang menyusun butiran dalam perconto adalah Tembaga (Cu) dengan persentase 6.34% – 18.14% dan Sulfur (S) dengan persentase rata-rata 30,95% - 36.87% (**EDX Plate E.04, E.04A, E04B, dan E.04C**).

Perbesaran: x 75

**Foto Mikro SEM Bagian Bawah**

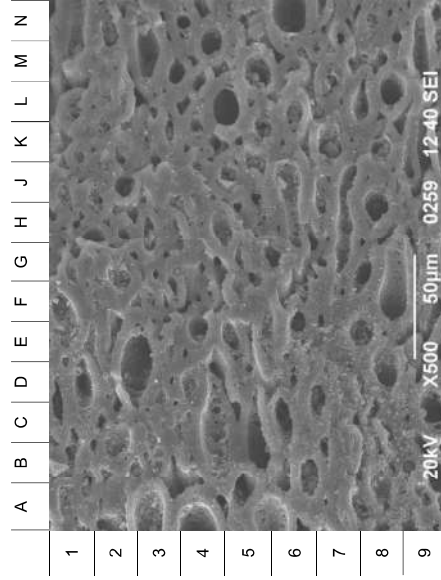
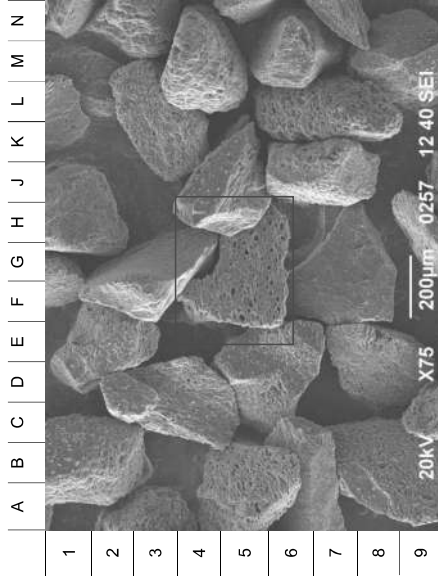
Gambar detail SEM menunjukkan salah satu butiran yang menyusun perconto pada perbesaran 500X dengan bentuk menyudut tanggung dan morfologi seperti balang berpori dengan permukaan yang rata. Por-pori ditemukan cukup signifikan dan besar dengan ukuran bervariasi dari 1 µm sampai 37 µm. Elemen yang menyusun butiran didominasi oleh Tembaga (Cu) dan Sulfur (S) (**EDX Plate E.04D**).

Perbesaran: x 500

**PLATE: S.04**

Tipe Sampel  
Kode Sampel

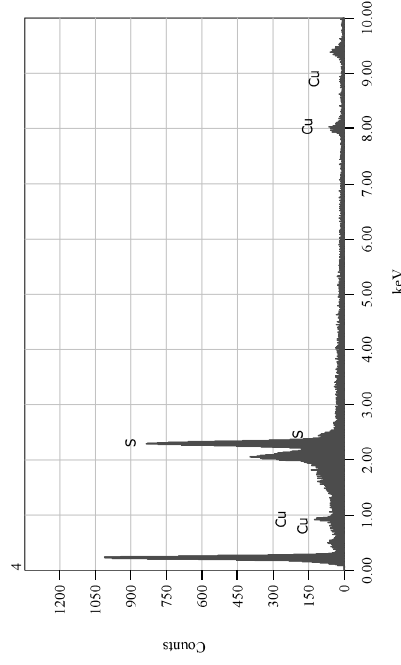
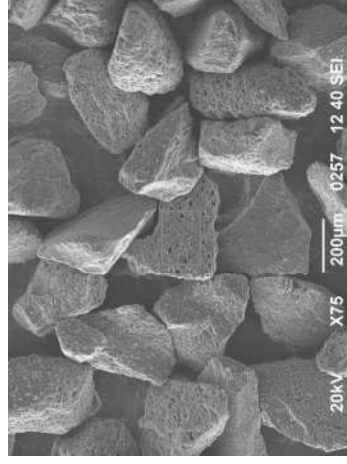
: Serbuk (karbon aktif)  
: 4



**PLATE E.04**

Tipe Sampel  
Kode Sampel

: Serbuk (karbon aktif)  
: 4

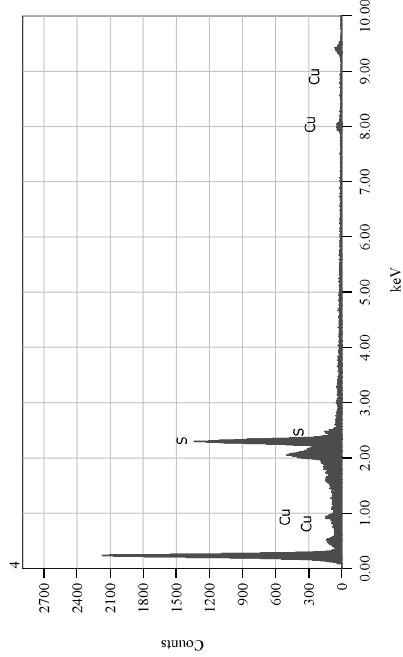
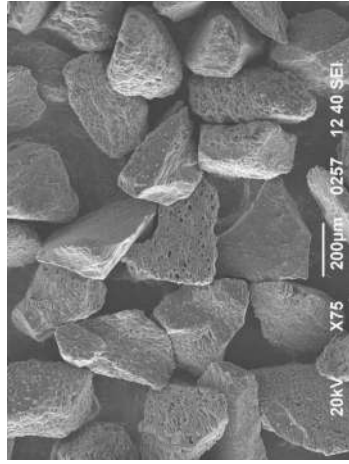


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		54.24						
S	2.307	34.30	2.07	85.57	SO3	85.65	7.57	78.4712
Cu	8.040	11.46	8.56	14.43	CuO	14.35	1.28	21.5288
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.85</b>	

**PLATE E.04A**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 4

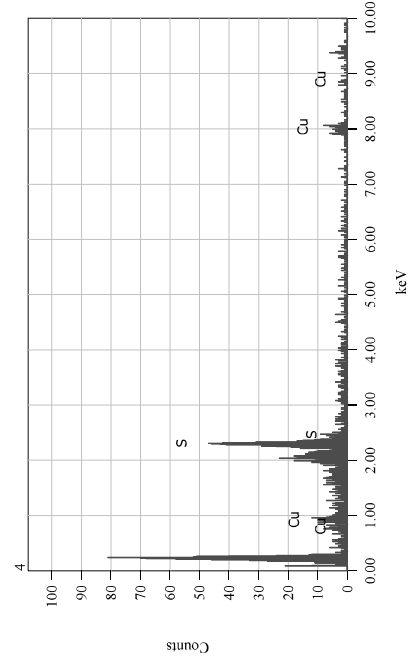
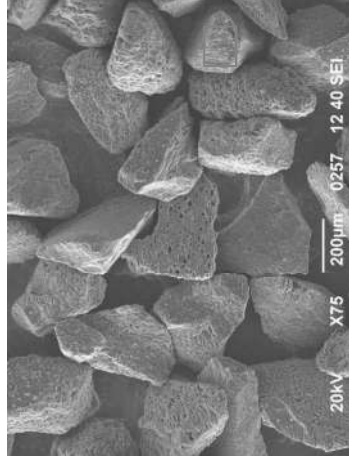


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation
O	56.79	56.79					
S K	2.307	36.87	2.91	92.02	SO3	92.07	7.78
Cu K	8.040	6.34	12.44	7.98	CuO	7.93	0.67
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.45</b>

**PLATE E.04B**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 4

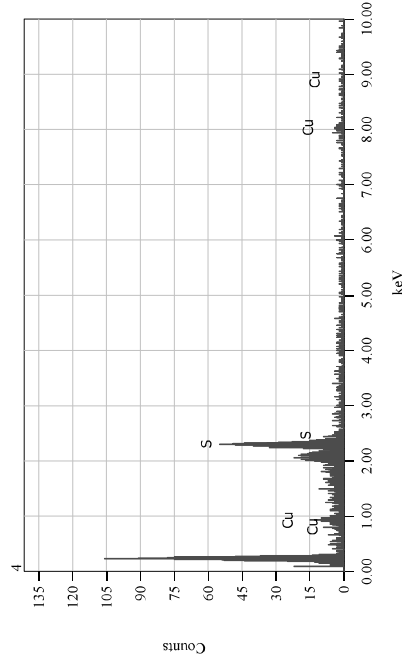
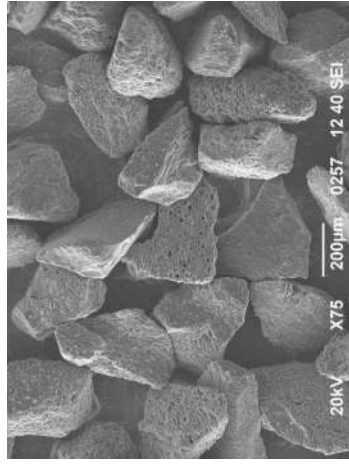


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation
O	50.90	50.90					
S K	2.307	30.95	2.58	77.17	SO3	77.29	7.28
Cu K	8.040	18.14	10.26	22.83	CuO	22.71	2.15
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>9.44</b>

**PLATE E.04C**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 4

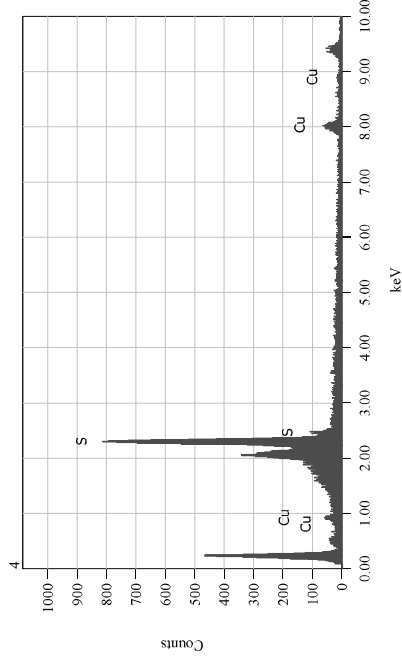
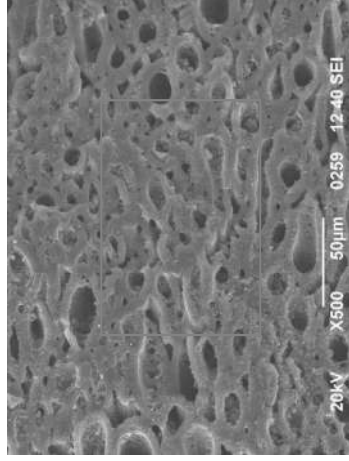


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		52.38						
S K	2.307	32.44	3.19	80.90	SO3	81.00	7.42	71.7875
Cu K	8.040	15.18	12.90	19.10	CuO	19.00	1.75	28.2125
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>9.17</b>	

**PLATE E.04D**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 4



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		52.77						
S K	2.307	32.83	1.04	81.87	SO3	81.97	7.45	73.1573
Cu K	8.040	14.40	4.22	18.13	CuO	18.03	1.65	26.8427
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>9.10</b>	

**PLATE: S.05**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 5

**Foto Mikro SEM Bagian Atas**

Kenampakan SEM secara umum menunjukkan butiran-butiran pada perconto serbuk dengan rentang ukuran butir 240 - 520 µm, tingkat kebundaran butiran menyudut hingga membundar tanggung dengan pemilahan sedang - baik. Komposisi utama yang menyusun butiran dalam perconto adalah Tembaga (Cu) dengan persentase 8,94% - 44,38% dan Sulfur (S) dengan persentase 17,80% - 35,57% (**EDX Plate E.05, E.05A, E05B, dan E.05C**).

Perbesaran: x 75

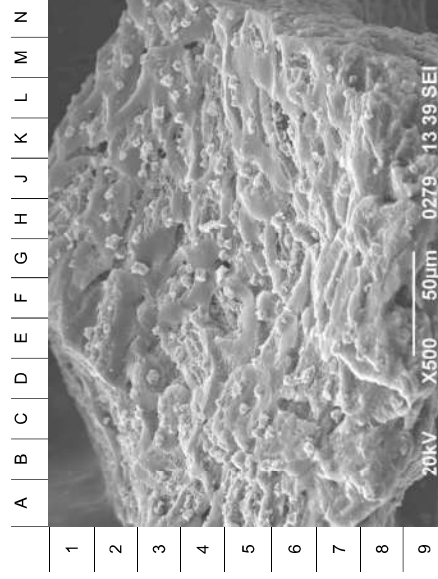
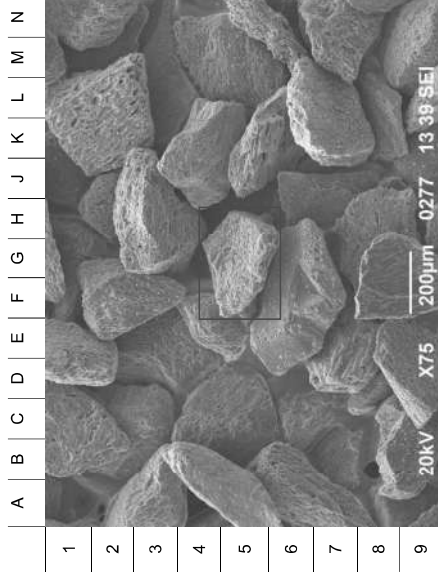
**Foto Mikro SEM Bagian Bawah**

Gambar detail SEM menunjukkan salah satu butiran yang menyusun perconto pada perbesaran 500X dengan bentuk menyudut dan morfologi tidak teratur (bergelombang). Pori-pori dijumpai dengan jumlah relatif kecil berukuran 0.5 µm sampai 5 µm. Dijumpai banyak agregat halus (seperti pengotor) pada permukaan butiran dan sebagian menutupi pori. Komposisi utama butiran adalah Tembaga (Cu) dan Sulfur (S) (**EDX Plate E.05D**).

Perbesaran: x 500

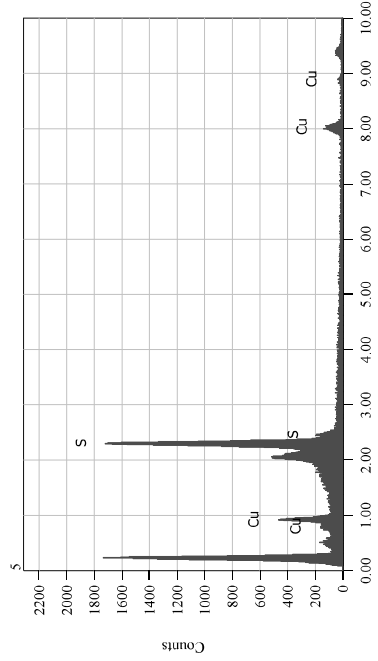
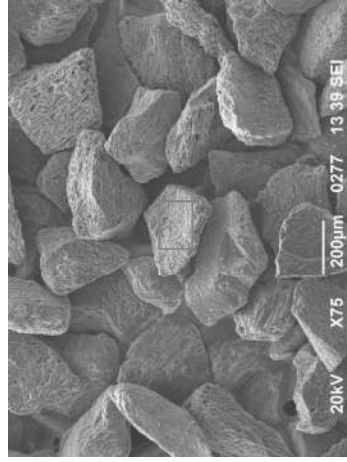
**PLATE: S.05**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 5



**PLATE E.05**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 5

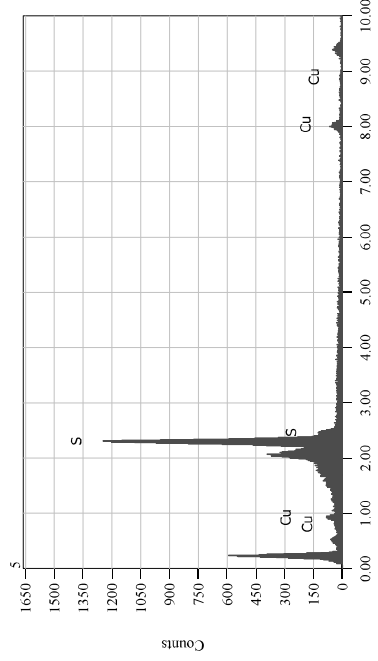
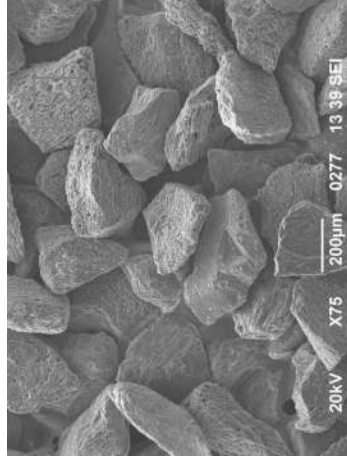


ZAF Method StandardLess Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		51.96						
S	2.307	32.01	1.51	79.83	SO3	79.93	7.38	70.2820
Cu	8.040	16.03	6.09	20.17	CuO	20.07	1.86	29.7180
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>9.24</b>	

**PLATE E.05A**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 5

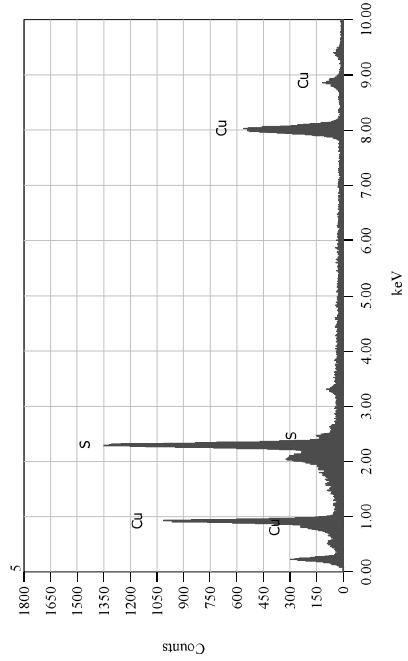
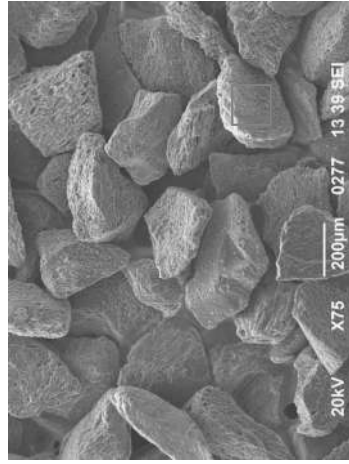


ZAF Method StandardLess Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		54.76						
S	2.307	34.83	0.96	86.90	SO3	86.97	7.62	80.3969
Cu	8.040	10.41	3.98	13.10	CuO	13.03	1.15	19.6031
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.77</b>	

**PLATE E.05B**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 5

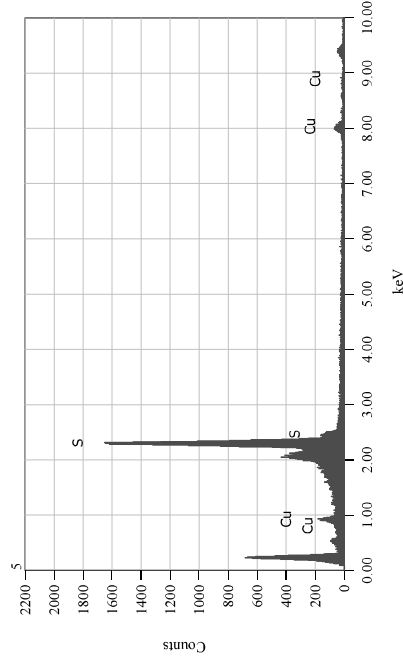


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	37.82							
S	2.307	17.80	0.50	44.29	SO3	44.45	5.64	28.8880
Cu	8.040	44.38	1.71	55.71	CuO	55.55	7.09	71.1120
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>12.73</b>	

**PLATE E.05C**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 5

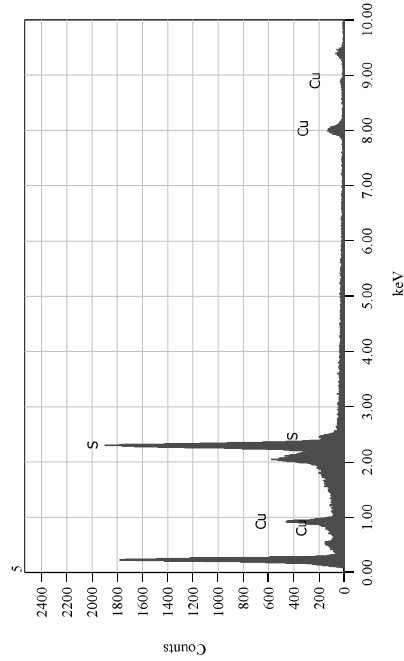
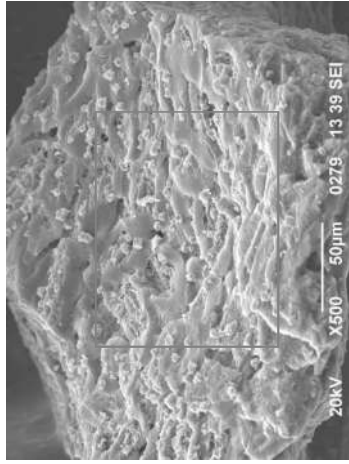


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	55.49							
S	2.307	35.57	0.92	88.74	SO3	88.80	7.68	83.1033
Cu	8.040	8.94	3.89	11.26	CuO	11.20	0.97	16.8967
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.65</b>	

**PLATE E.05D**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 5



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	52.90	52.90	1.53	82.20	SO3	82.30	7.46	73.6279
S	2.307	32.96	6.21	17.80	CuO	17.70	1.62	26.3721
Cu	8.040	14.14				100.00	9.08	
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>9.08</b>	

**PLATE: S.06**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 6

**Foto Mikro SEM Bagian Atas**

Kenampakan SEM secara umum menunjukkan butiran-butiran pada perconto serbuk dengan rentang ukuran butir 240 - 540 µm, tingkat kebundaran butiran menyudut hingga membundar tanggung dengan permlahan sedang - baik. Komposisi utama yang menyusun butiran dalam perconto adalah Tembaga (Cu) dengan persentase 3.16% – 11.24% dan Sulfur (S) dengan persentase 34.41% - 38.47% (**EDX Plate E.06, E.06A, E06B, dan E.06C**).

Perbesaran: x 75

**Foto Mikro SEM Bagian Bawah**

Gambar detail SEM menunjukkan salah satu butiran yang menyusun perconto pada perbesaran 500X dengan bentuk menyudut dan morfologi tidak merata (bergelombang) dengan pori-pori didalamnya berukuran bervariasi dari 1 µm sampai 15 µm. Unsur yang ditemukan di dalam butiran adalah dominasi Tembaga (Cu) dan Sulfur (S) (**EDX Plate E.06D**).

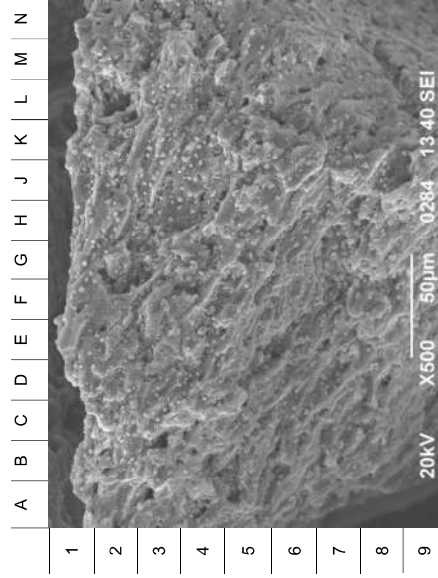
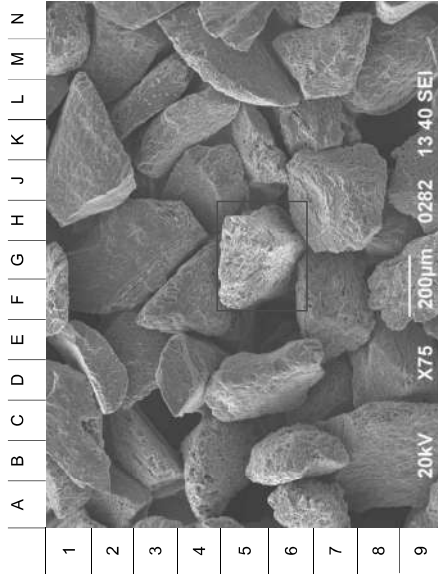
Perbesaran: x 500



**PLATE: S.06**

Tipe Sampel  
Kode Sampel

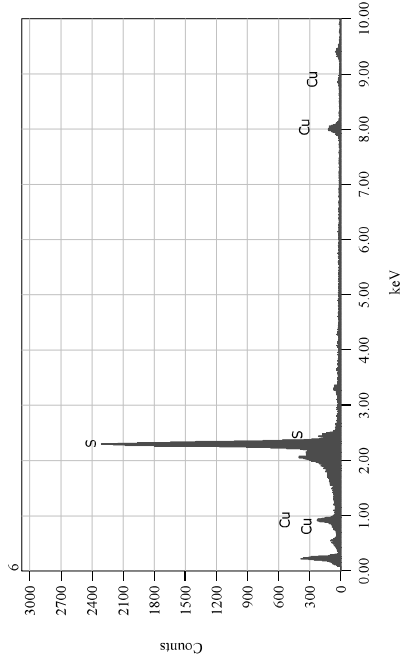
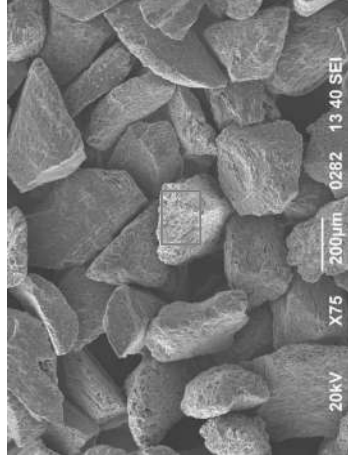
: Serbuk (karbon aktif)  
: 6



**PLATE E.06**

Tipe Sampel  
Kode Sampel

: Serbuk (karbon aktif)  
: 6

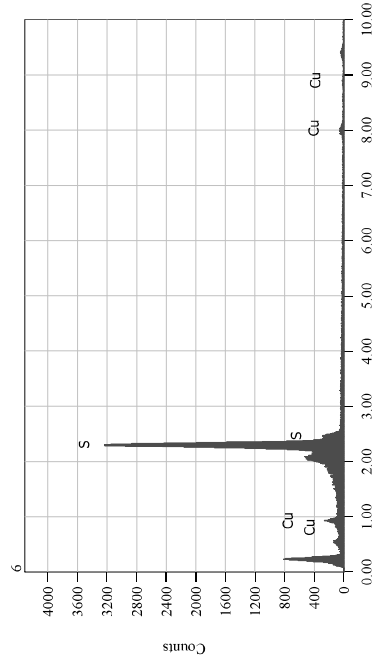
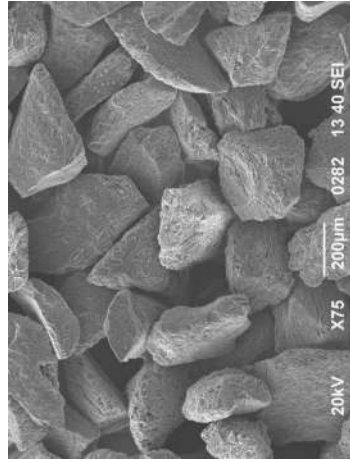


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		54.34						
S	2.307	34.41	0.73	85.85	SO3	85.93	7.58	78.8683
Cu	8.040	11.24	3.04	14.15	CuO	14.07	1.25	21.1317
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.83</b>	

**PLATE E.06A**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 6

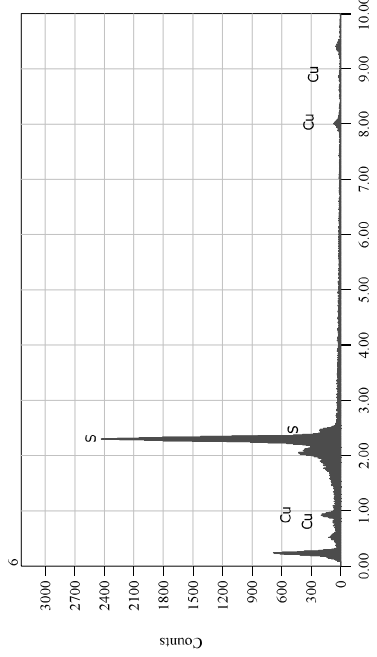
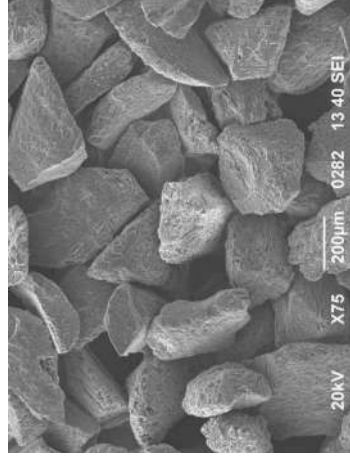


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O								
S	2.307	58.37	0.85	96.02	S <sub>03</sub>	96.04	7.89	93.9839
Cu	8.040	39.16	3.71	3.98	Cu <sub>0</sub>	3.96	0.33	6.0161
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.22</b>	

**PLATE E.06B**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 6

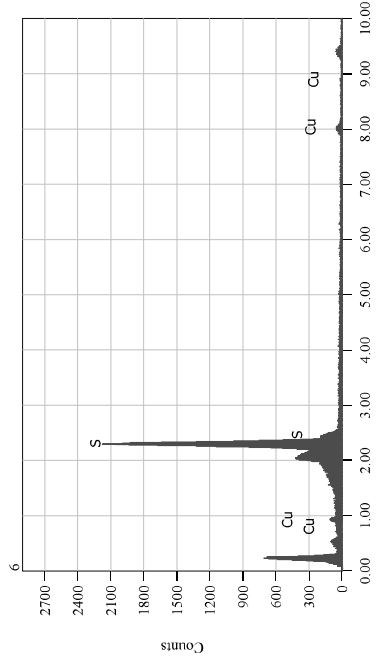
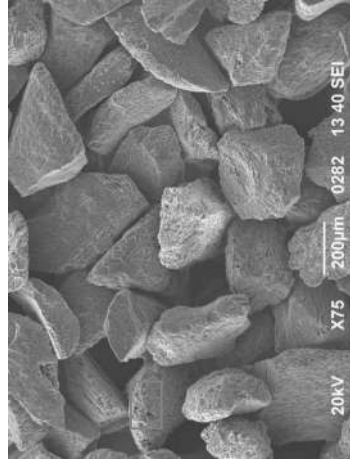


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O								
S	2.307	57.21	0.82	93.07	S <sub>03</sub>	93.11	7.81	89.5452
Cu	8.040	5.50	3.53	6.93	Cu <sub>0</sub>	6.89	0.58	10.4548
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.39</b>	

**PLATE E.06C**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 6

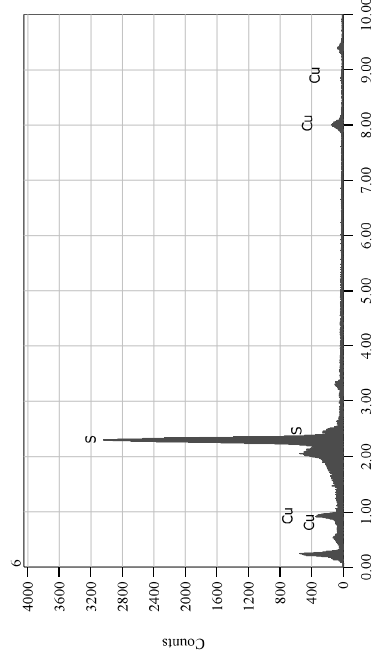
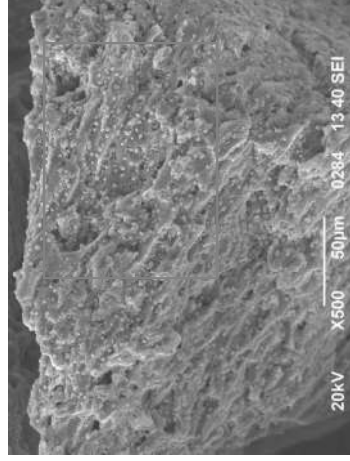


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		57.72						
S	2.307	37.81	0.90	94.37	SO3	94.41	7.84	91.5009
Cu	8.040	4.47	3.89	5.63	CuO	5.59	0.47	8.4991
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.31</b>	

**PLATE E.06D**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 6



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		55.09						
S	2.307	35.16	0.76	87.72	SO3	87.79	7.64	81.6100
Cu	8.040	9.75	3.16	12.28	CuO	12.21	1.07	18.3900
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>8.71</b>	

**PLATE: S.07**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 7

**Foto Mikro SEM Bagian Atas**

Kenampakan SEM secara umum menunjukkan butiran-butiran pada perconto serbuk dengan rentang ukuran butir 260 - 700 µm, tingkat kebundaran butiran menyudut hingga membundar tanggung dengan pemilahan sedang - baik. Komposisi utama yang menyusun butiran dalam perconto adalah Tembaga (Cu) dengan persentase 46,65% – 50,88% dan Sulfur (S) dengan persentase 14,54% - 16,66% (**EDX Plate E.07, E.07A, E.07B, dan E.07C**).

Perbesaran: x 75

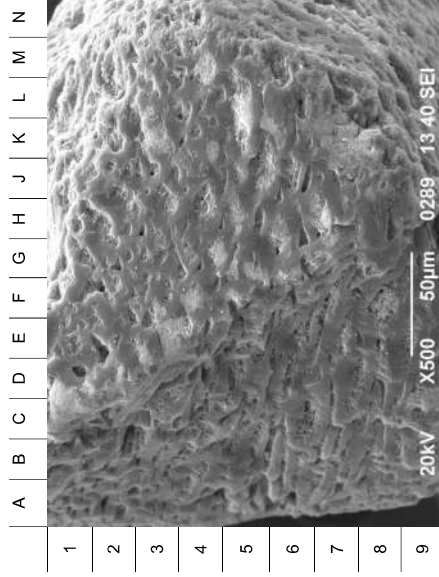
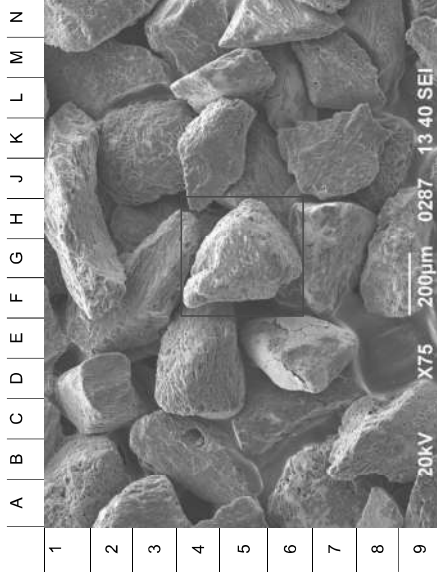
**Foto Mikro SEM Bagian Bawah**

Gambar detail SEM menunjukkan salah satu butiran yang menyusun perconto pada perbesaran 500X dengan bentuk menyudut langgung dan morfologi seperti serat kayu berpori. Pori-pori ditemukan berukuran 0.5 µm sampai 13 µm, dan hampir sebagian pori ditutupi oleh agregat halus. Komposisi utama butiran adalah Tembaga (Cu) dan Sulfur (S) (**EDX Plate E.07D**).

Perbesaran: x 500

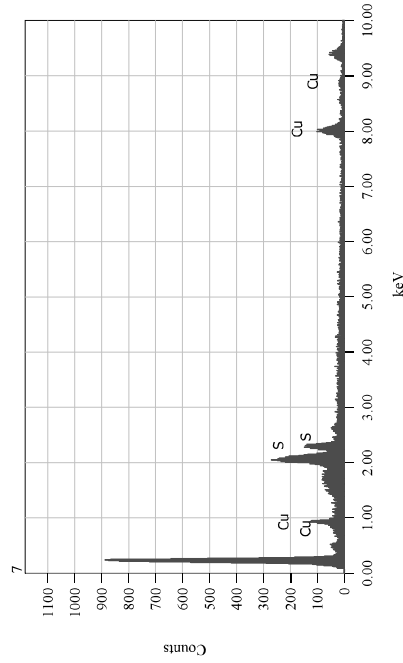
**PLATE: S.07**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 7



**PLATE E.07**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 7

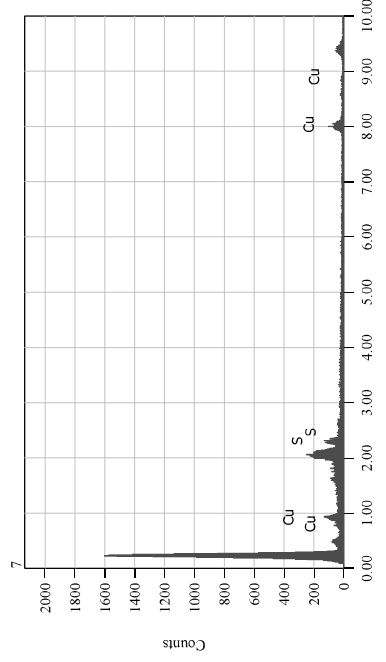


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	2.307	34.58	14.54	4.44	S03	36.31	5.04	21.8861
S	8.040	50.88	14.79	63.84	CuO	63.69	8.89	78.1139
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>13.93</b>	

**PLATE E.07A**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 7

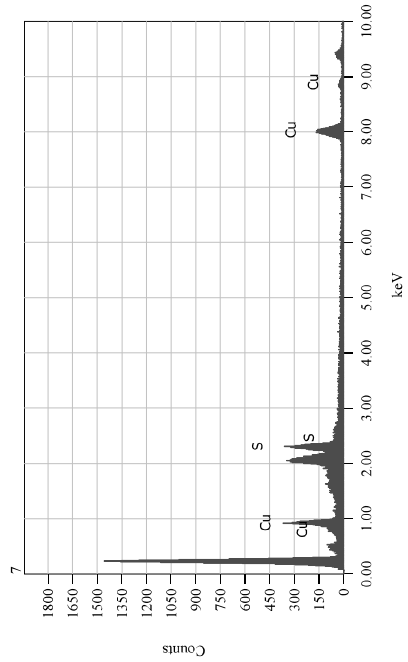


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	2.307	34.75	14.72	10.09	S03	36.75	5.07	22.2396
S	8.040	50.53	33.68	63.41	CuO	63.25	8.79	77.7604
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>13.86</b>	

**PLATE E.07B**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 7

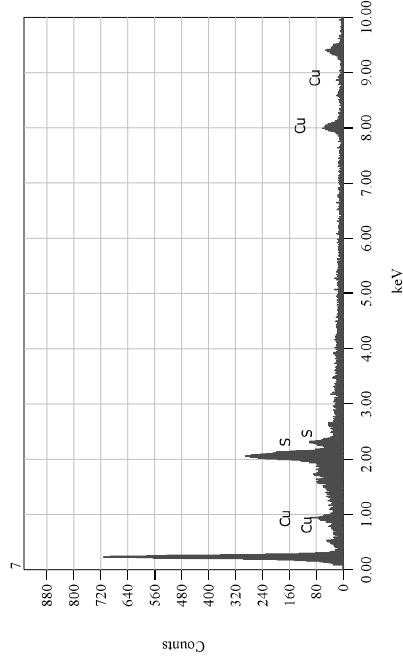


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		36.69						
S	2.307	16.66	3.49	41.45	SO3	41.61	5.44	26.3411
Cu	8.040	46.65	11.87	58.55	CuO	58.39	7.68	73.6589
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>13.12</b>	

**PLATE E.07C**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 7

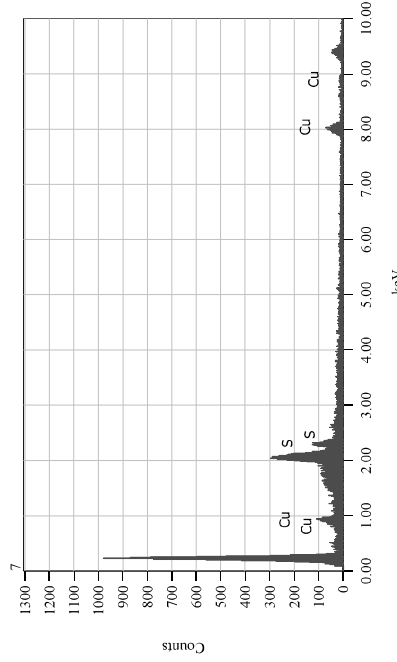
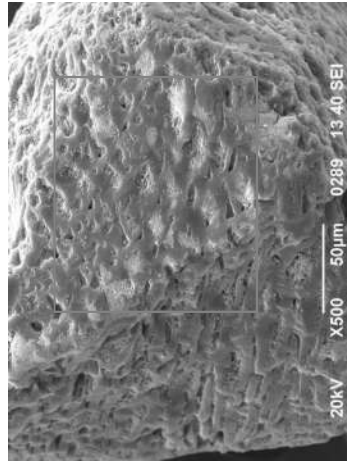


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		35.20						
S	2.307	15.16	5.83	37.71	SO3	37.86	5.16	23.1515
Cu	8.040	49.64	19.53	62.29	CuO	62.14	8.52	76.8485
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>13.68</b>	

**PLATE E.07D**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 7



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	2.307	36.35	6.31	40.59	SO3	40.75	5.38	25.5949
S	16.32	16.32	21.41	59.41	CUO	59.25	7.87	74.4051
Cu	8.040	47.33						
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>13.25</b>	

**PLATE: S.08**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 81

**Foto Mikro SEM Bagian Atas**

Kenampakan SEM secara umum menunjukkan butiran-butiran pada percontto serbuk dengan rentang ukuran butir 250 - 550 µm, tingkat kebundaran butiran menyudut hingga membundar langgung dengan permlahan sedang - baik. Komposisi utama yang menyusun butiran dalam percontto adalah Seng (Zn) dengan persentase 39.21% - 44.20% dan Klorin (Cl) dengan persentase 44.98% - 51.20% (**EDX Plate E.08, E.08A, E08B, dan E.08C**).

Perbesaran: x 75

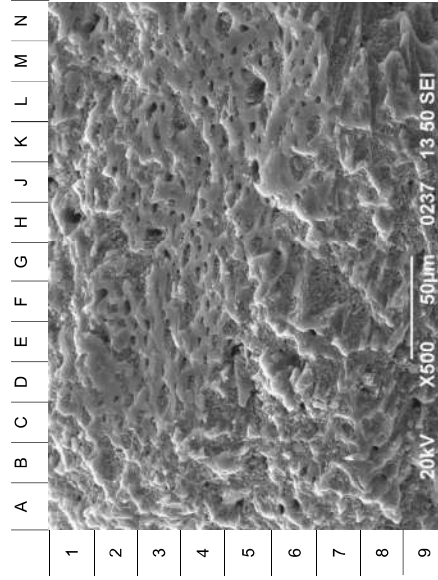
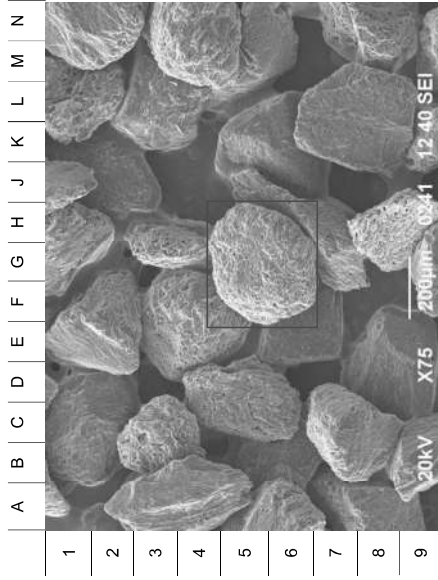
**Foto Mikro SEM Bagian Bawah**

Gambar detail SEM menunjukkan salah satu butiran yang menyusun percontto pada perbesaran 500X dengan bentuk membundar langgung dan morfologi tidak merata. Banyak ditemukan material halus pada permukaan butiran yang pada beberapa tempat terlihat seperti menutupi pori. Ukuran dari pori yang dijumpai adalah 0.7 µm sampai 7.5 µm. Unsur Seng (Zn) dan Klorin (Cl) menyusun butiran pada percontto ini (**EDX Plate E.08D**).

Perbesaran: x 500

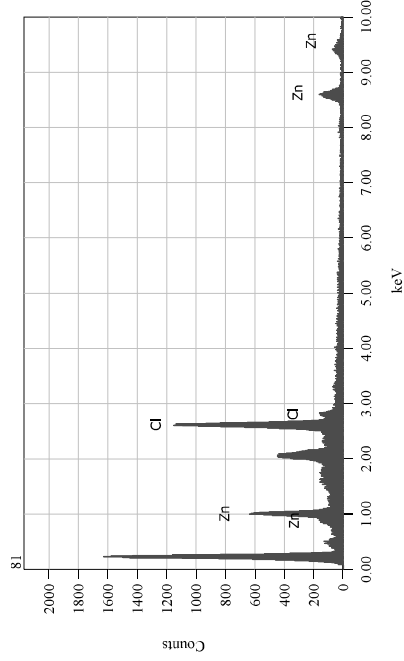
**PLATE: S.08**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 81



**PLATE E.08**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 81



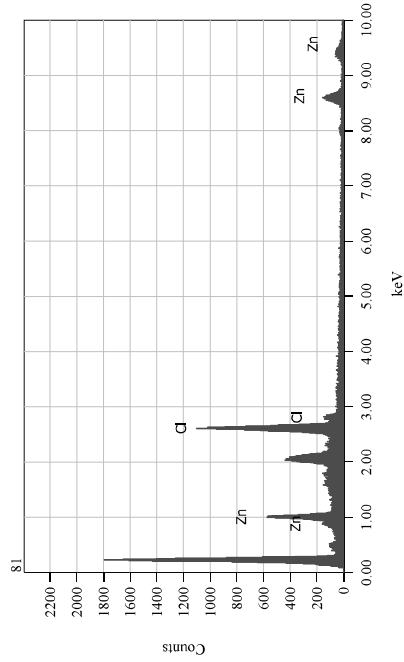
ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	9.87	9.87						
Cl	2.621	49.81	1.42	69.49	Cl	49.81	0.00	57.2549
Zn	8.630	40.32	15.03	30.51	ZnO	50.19	24.00	42.7451
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	



**PLATE E.08A**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 81

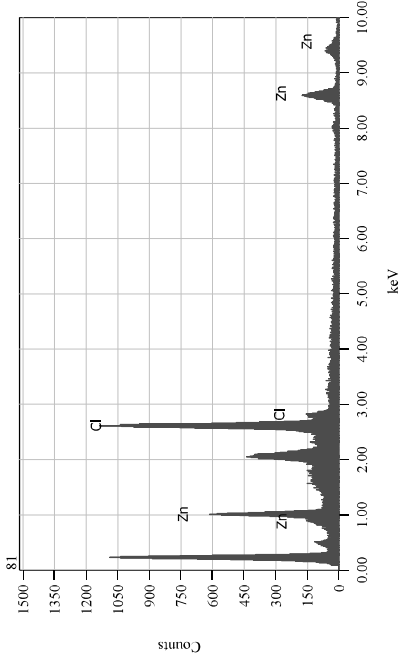
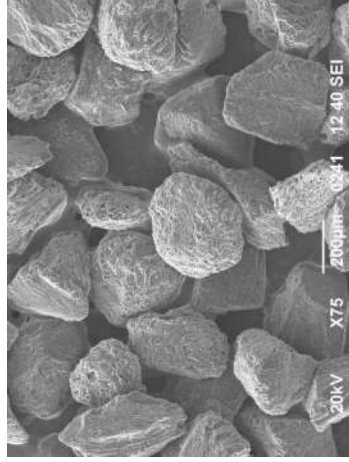


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	10.58	10.58	1.56	66.32	Cl	46.18	0.00	53.2947
Cl K	2.621	46.18	16.18	33.68	ZnO	53.82	24.00	46.7053
Zn K	8.630	43.24	1.56	66.32	Cl	46.18	0.00	53.2947
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	

**PLATE E.08B**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 81

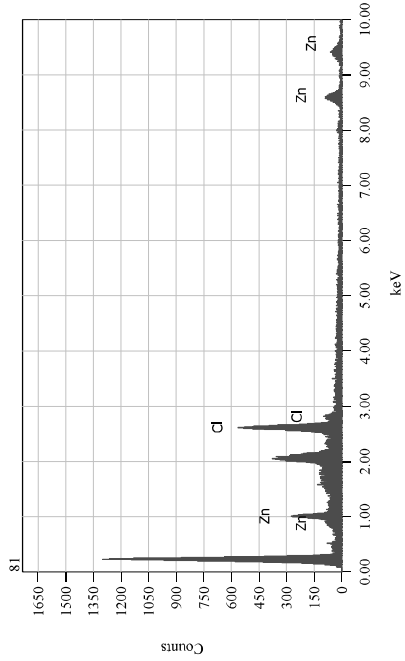


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	10.82	10.82	0.97	65.23	Cl	44.98	0.00	51.9669
Cl K	2.621	44.98	10.02	34.77	ZnO	55.02	24.00	48.0501
Zn K	8.630	44.20	10.02	34.77	ZnO	55.02	24.00	48.0501
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	

**PLATE E.08C**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 81

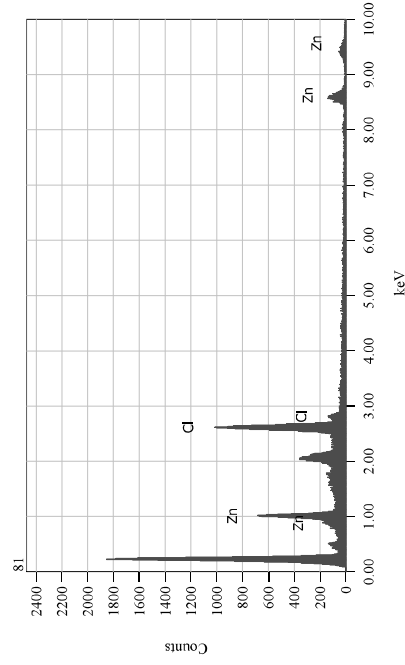
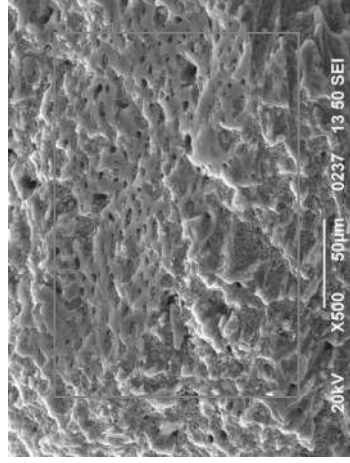


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	5.118	45.18	2.14	65.41	Cl	45.18	0.00	52.1871
Cl K	2.621	49.04	22.19	34.59	ZnO	54.82	24.00	47.8129
Zn K	8.630	4.04	22.19	34.59	ZnO	54.82	24.00	47.8129
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	

**PLATE E.08D**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 81



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	5.118	51.20	1.88	70.65	Cl	51.20	0.00	58.7505
Cl K	2.621	39.21	19.99	29.35	ZnO	48.80	24.00	41.2495
Zn K	8.630	9.60	19.99	29.35	ZnO	48.80	24.00	41.2495
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	

**PLATE: S.09**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 82

**Foto Mikro SEM Bagian Atas**

Kenampakan SEM secara umum menunjukkan butiran-butiran pada percontto serbuk dengan rentang ukuran butir 250 - 470 µm, tingkat kebundaran butiran menyudut hingga membuldar tanggung dengan pemilahan sedang - baik. Komposisi utama yang menyusun butiran dalam percontto adalah Seng (Zn) dengan persentase 40.43% – 46.84% dan Klorin (Cl) dengan persentase 41.70% - 49.68% (**EDX Plate E.09, E.09A, E09B, dan E.09C**).

Perbesaran: x 75

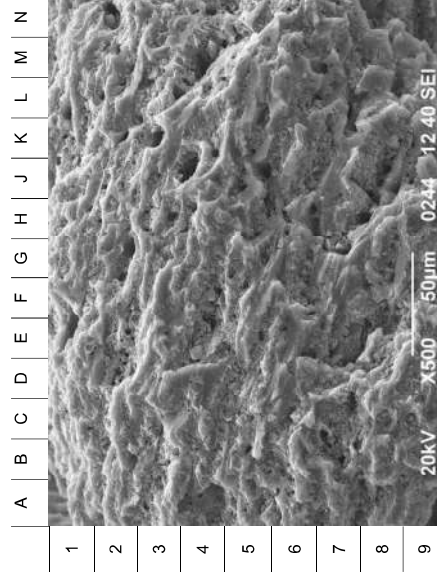
**Foto Mikro SEM Bagian Bawah**

Gambar detail SEM menunjukkan salah satu butiran yang menyusun percontto pada perbesaran 500X dengan bentuk membuldar tanggung dan morfologi bergelombang. Pori-pori ditemukan dengan bentuk dan ukuran bervariasi dari 0.5 µm sampai 20 µm. Pengotor seperti pecahan material halus banyak dijumpai pada permukaan dan pori butiran. Komposisi utama yang menyusun butiran ini adalah Seng (Zn) dan Klorin (Cl) (**EDX Plate E.09D**).

Perbesaran: x 500

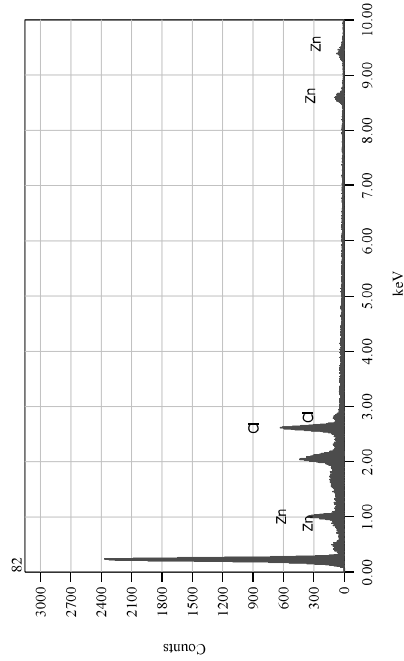
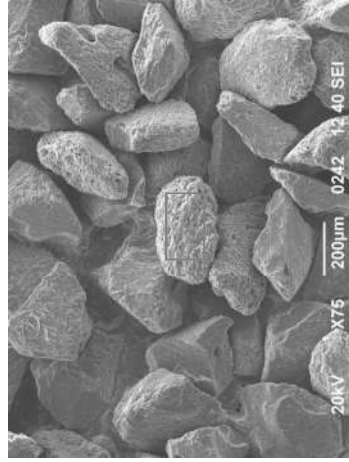
**PLATE: S.09**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 82



**PLATE E.09**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 82

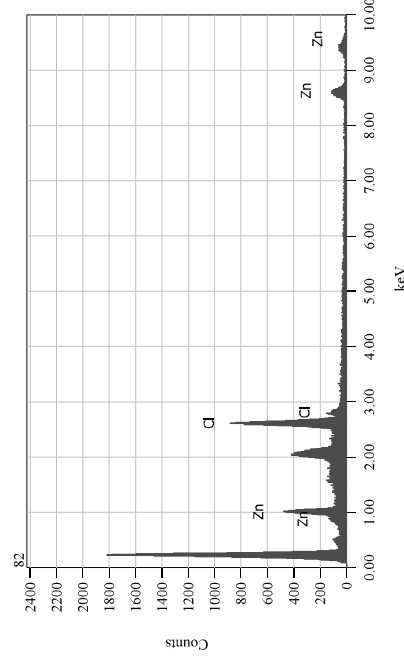
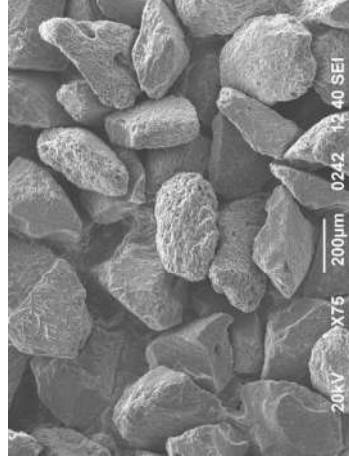


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		10.12						
Cl	2.621	48.52	3.95	68.39	Cl	48.52	0.00	55.8610
Zn	8.630	41.36	41.51	31.61	ZnO	51.46	24.00	44.1390
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	

**PLATE E.09A**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 82

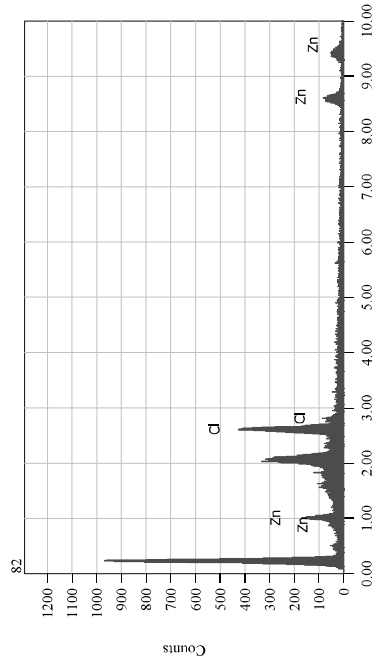
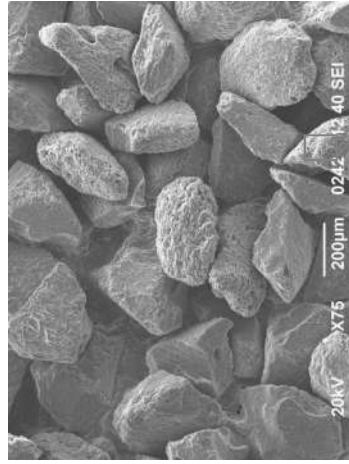


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		9.89						
Cl	2.621	49.68	2.09	69.38	Cl	49.68	0.00	57.1151
Zn	8.630	40.43	22.01	30.62	ZnO	50.32	24.00	42.8849
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	

**PLATE E.09B**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 82

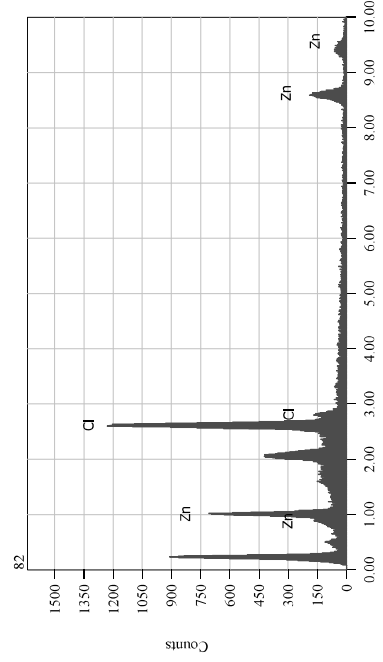


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		11.46						
Cl K	2.621	41.70	2.05	62.14	Cl	41.70	0.00	48.2931
Zn K	8.630	46.84	20.98	37.86	ZnO	58.30	24.00	51.7069
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	

**PLATE E.09C**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 82

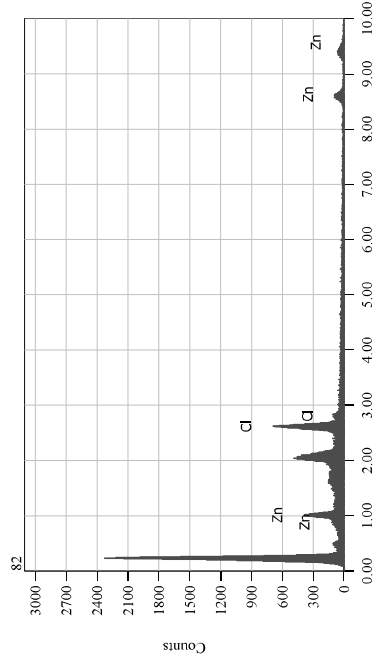
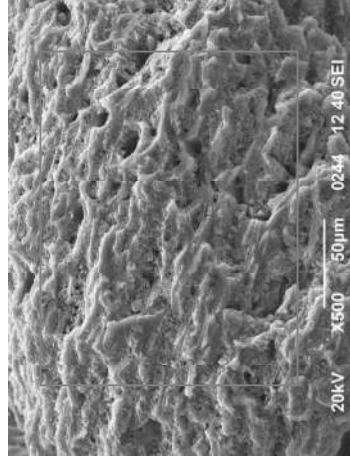


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		10.77						
Cl K	2.621	45.23	0.76	65.46	Cl	45.23	0.00	52.2477
Zn K	8.630	44.00	7.88	34.54	ZnO	54.77	24.00	47.7523
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	

**PLATE E.09D**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 82



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Moi%	Compound	mass%	Cation	K
O	10.25	10.25						
Cl	2.621	47.86	3.28	67.81	Cl	47.86	0.00	55.1407
Zn	8.630	41.89	34.34	32.19	ZnO	52.14	24.00	44.8593
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	

**PLATE: S.10**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 83

**Foto Mikro SEM Bagian Atas**

Kenampakan SEM secara umum menunjukkan butiran-butiran pada perconto serbuk dengan rentang ukuran butir 300 - 550 µm, tingkat kebundaran butiran menyudut hingga membuldar tanggung dengan permlahan sedang - baik. Komposisi utama yang menyusun butiran dalam perconto adalah Seng (Zn) dengan persentase 43.07% - 50.93% dan Klorin (Cl) dengan persentase 36.61% - 46.39% (**EDX Plate E.10, E.10A, E.10B, dan E.10C**).

Perbesaran: x 75

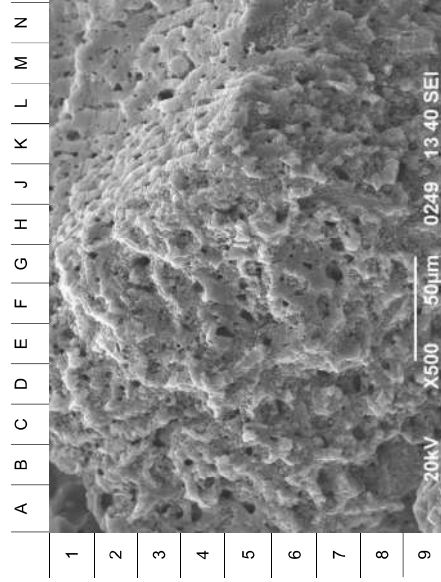
**Foto Mikro SEM Bagian Bawah**

Gambar detail SEM menunjukkan salah satu butiran yang menyusun perconto pada perbesaran 500X dengan bentuk membuldar tanggung dan morfologi tidak merata serta pada beberapa bagian terlihat sedikit rapuh. Terdapat pori dengan bentuk dan ukuran cukup bervariasi dari 1 µm sampai 10 µm. Butiran ini disusun oleh elemen Seng (Zn) dan Klorin (Cl) (**EDX Plate E.10D**).

Perbesaran: x 500

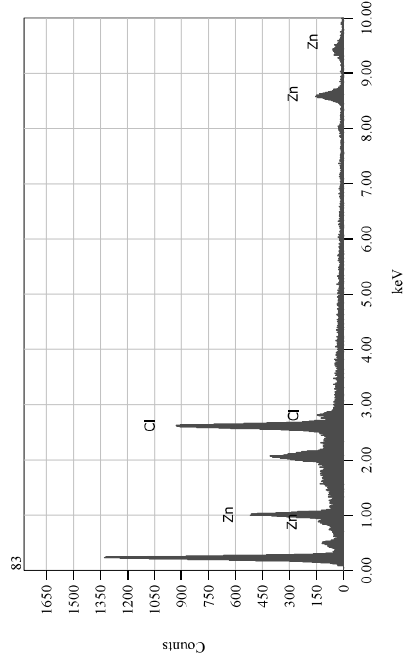
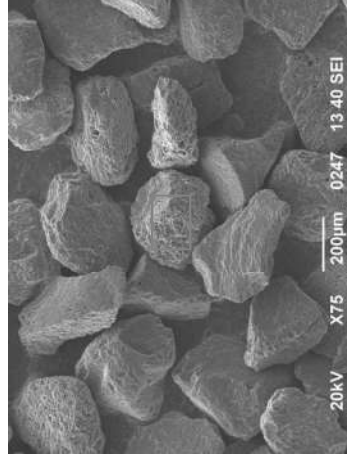
**PLATE: S.10**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 83



**PLATE E.10**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 83

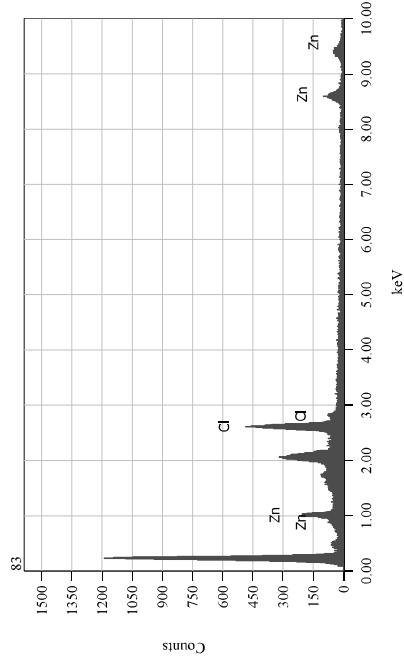
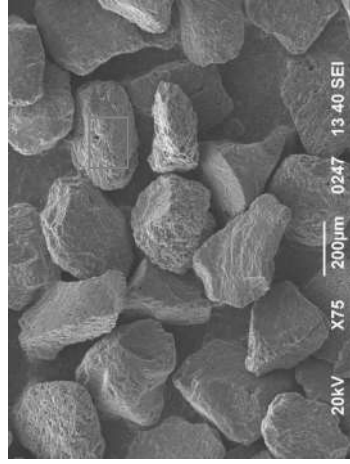


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	10.70	10.70						
Cl	2.621	43.56	1.30	65.77	Cl	45.56	0.00	52.6147
Zn	8.630	43.73	13.49	34.23	ZnO	54.44	24.00	47.3853
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	

**PLATE E.10A**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 83

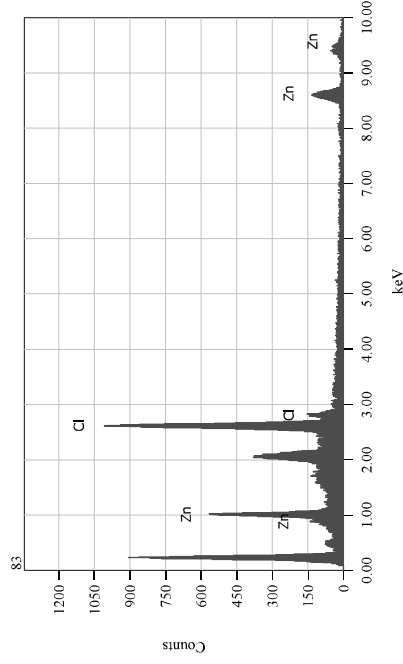


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		11.11						
Cl	2.621	43.51	2.32	63.87	Cl	43.51	0.00	50.3280
Zn	8.630	45.38	23.89	36.13	ZnO	56.49	24.00	49.6720
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	

**PLATE E.10B**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 83



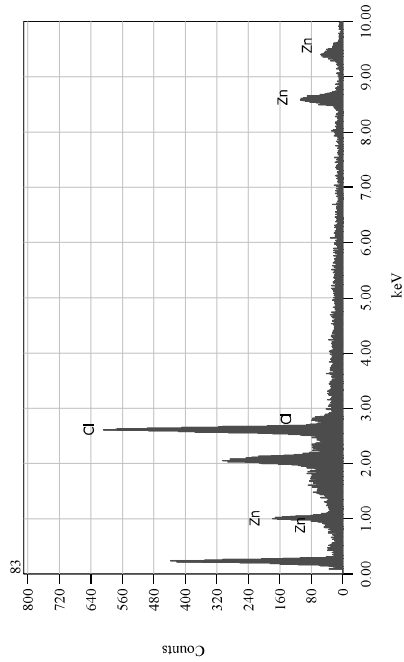
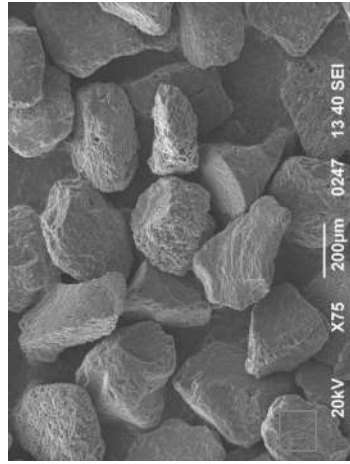
ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		10.54						
Cl	2.621	46.39	0.89	66.51	Cl	46.39	0.00	53.5254
Zn	8.630	43.07	9.29	33.49	ZnO	53.61	24.00	46.4746
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	



**PLATE E.10C**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 83

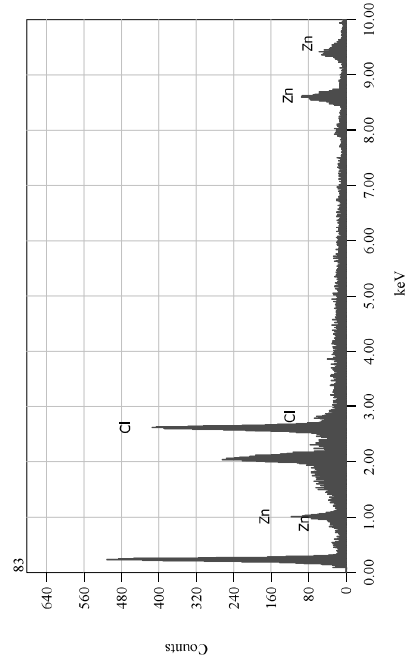
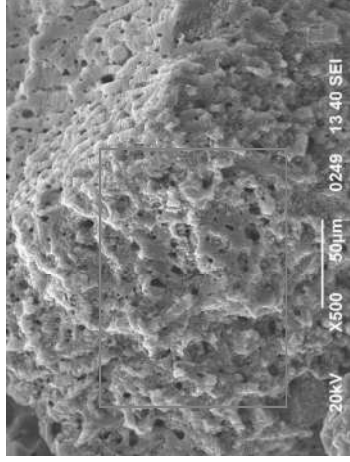


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		11.16						
Cl K	2.621	43.24	0.79	63.61	Cl	43.24	0.00	50.0233
Zn K	8.630	45.60	8.09	36.39	ZnO	56.76	24.00	49.9767
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	

**PLATE E.10D**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 83



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		12.46						
Cl K	2.621	36.61	0.98	57.00	Cl	36.61	0.00	42.4982
Zn K	8.630	50.93	9.80	43.00	ZnO	63.39	24.00	57.5018
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	

**PLATE: S.11**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
Kode Sampel : 84

**Foto Mikro SEM Bagian Atas**

Kenampakan SEM secara umum menunjukkan butiran-butiran pada percontto serbuk dengan rentang ukuran butir 220 - 525 µm, tingkat kebundaran butiran menyudut hingga membuldar tanggung dengan pemilahan sedang - baik. Komposisi utama yang menyusun butiran dalam percontto adalah Seng (Zn) dengan persentase 41,28% – 55,75% dan Klorin (Cl) dengan persentase 30,60% - 48,62% (**EDX Plate E.11, E.11A, E.11B, dan E.11C**).

Perbesaran: x 75

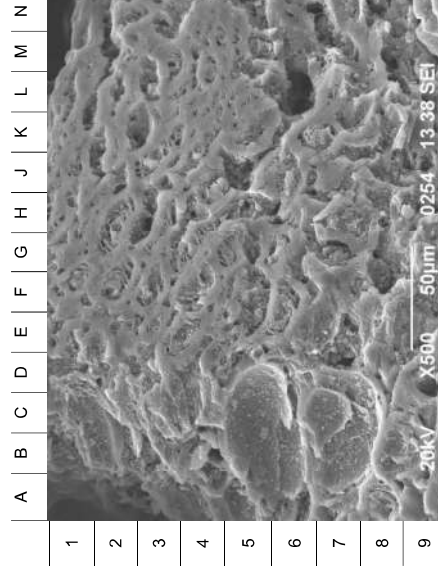
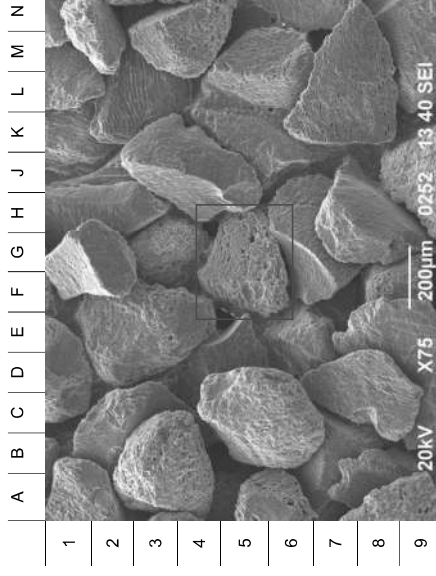
**Foto Mikro SEM Bagian Bawah**

Gambar detail SEM menunjukkan salah satu butiran yang menyusun percontto pada perbesaran 500X dengan bentuk menyudut tanggung dan morfologi bergelombang dipenuhi pori-pori yang cukup rapat karena tertutupi oleh material atau serat halus. Pori-pori terukur cukup bervariasi dari 1 µm sampai 23 µm. Komposisi utama butiran adalah Seng (Zn) dan Klorin (Cl) (**EDX Plate E.11D**).

Perbesaran: x 500

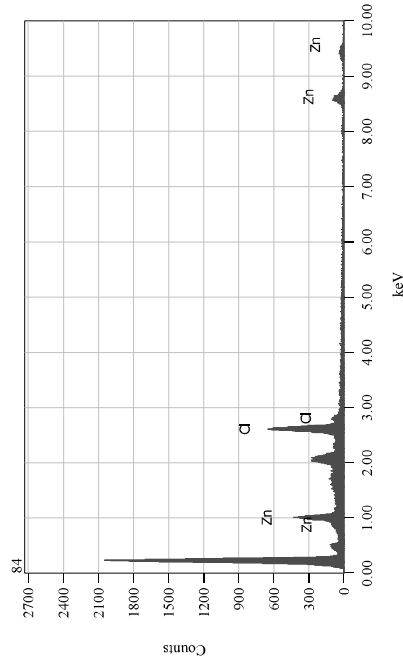
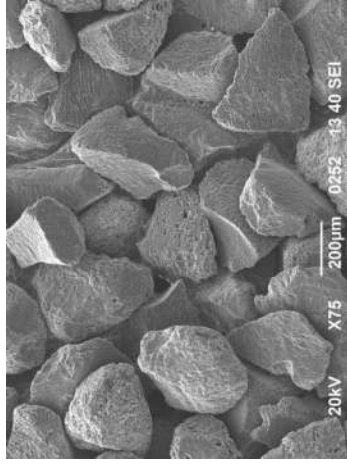
**PLATE: S.11**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
Kode Sampel : 84



**PLATE E.11**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 84

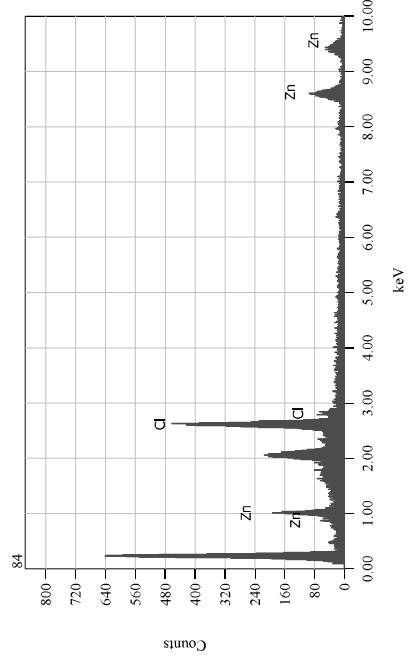
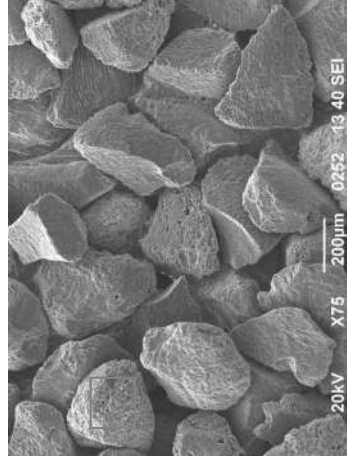


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis(Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	10.10	10.10	3.04	58.47	Cl	48.62	0.00	55.9652
Cl K	2.621	49.52	31.96	31.53	ZnO	51.38	24.00	44.0348
Zn K	8.630	41.28	100.00	100.00		100.00	24.00	
<b>Total</b>		<b>100.00</b>				<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	

**PLATE E.11A**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 84

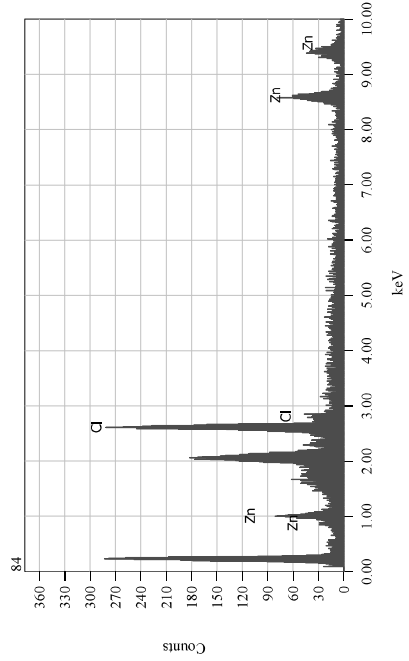


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis(Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	11.74	11.74	1.23	60.77	Cl	40.30	0.00	46.7036
Cl K	2.621	40.30	12.54	39.23	ZnO	59.70	24.00	53.2904
Zn K	8.630	47.96	100.00	100.00		100.00	24.00	
<b>Total</b>		<b>100.00</b>				<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	

**PLATE E.11B**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 84

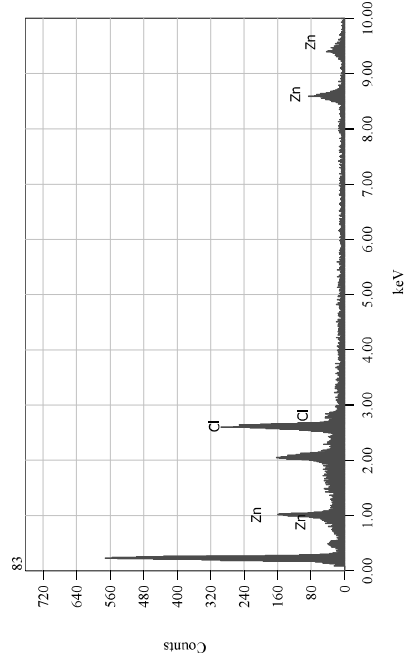


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		11.88						
Cl	2.621	39.56	0.94	60.03	Cl	39.56	0.00	45.8694
Zn	8.630	48.56	9.52	39.97	ZnO	60.44	24.00	54.1306
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	

**PLATE E.11C**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 84

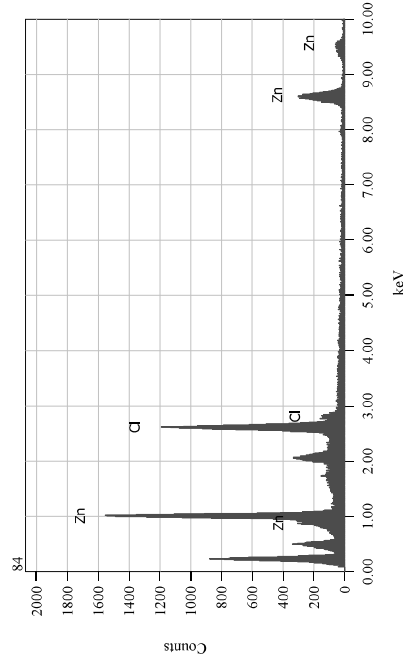
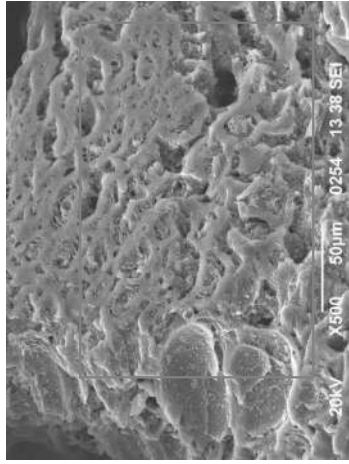


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O		12.78						
Cl	2.621	35.02	1.58	55.29	Cl	35.02	0.00	40.6610
Zn	8.630	52.21	15.71	44.71	ZnO	64.98	24.00	59.3390
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	

**PLATE E.11D**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : 84



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	13.64	13.64						
Cl	2.621	30.60	0.55	50.30	Cl	30.60	0.00	35.5334
Zn	8.630	55.75	5.37	49.70	ZnO	69.40	24.00	64.4666
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>24.00</b>	

**PLATE: S.12**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : D12

**Foto Mikro SEM Bagian Atas**

Kenampakan SEM secara umum menunjukkan butiran-butiran pada percontonya serbuk dengan rentang ukuran butir 270 - 570 µm, tingkat kebundaran butiran menyudut hingga membundar tanggung dengan perlihatkan sedang - baik. Komposisi yang menyusun butiran dalam percontonya (selain karbon) adalah Kalium (K) dengan kenampakan peak yang kecil pada spektrum EDX (**EDX Plate E.12, E.12A, E.12B, dan E.12C**).

Perbesaran: x 75

**Foto Mikro SEM Bagian Bawah**

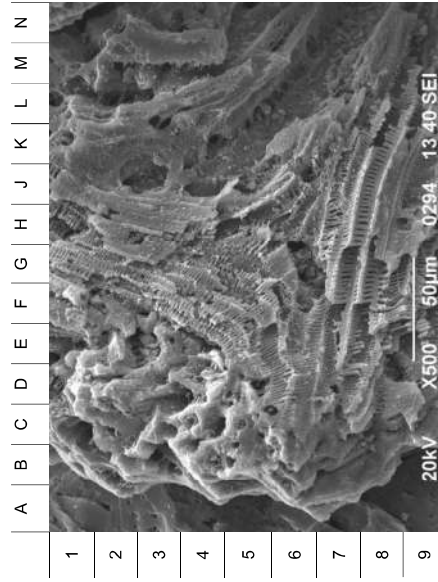
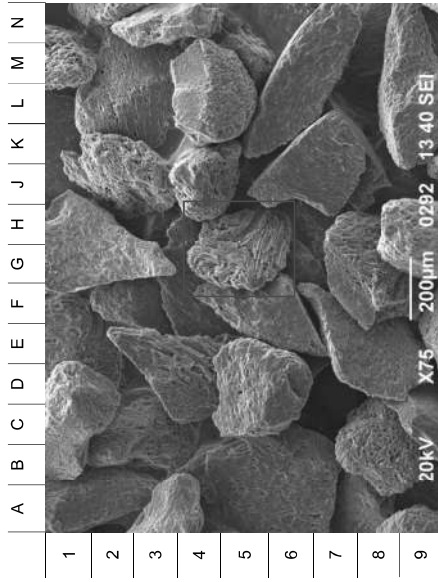
Gambar detail SEM menunjukkan salah satu butiran yang menyusun percontonya pada perbesaran 500X dengan bentuk menyudut tanggung serta morfologi dalam beberapa lekstur seperti serbuk rias-ruas bambu dan bergelombang. Terdapat pori dengan bentuk dan ukuran bervariasi dari 1 µm sampai 15 µm. Hasil analisis pada spektrum EDX menunjukkan Kalium (K) ditemukan dengan bentuk peak yang relatif kecil (**EDX Plate E.12D**).

Perbesaran: x 500

**PLATE: S.12**

Tipe Sampel  
Kode Sampel

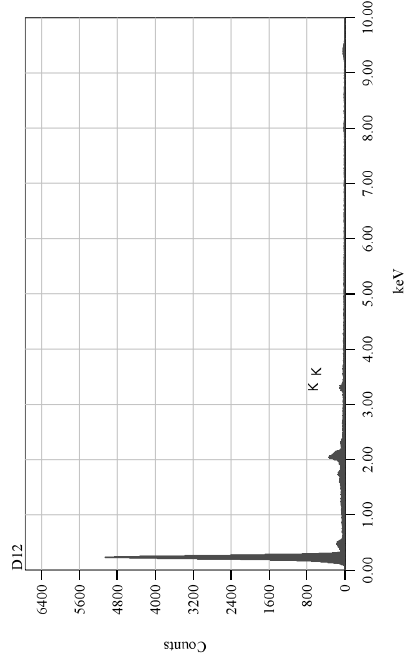
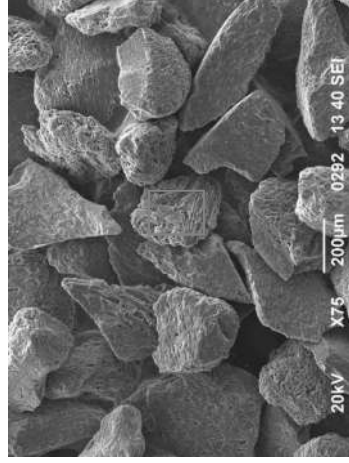
: Serbuk (karbon aktif)  
: D12



**PLATE E.12**

Tipe Sampel  
Kode Sampel

: Serbuk (karbon aktif)  
: D12

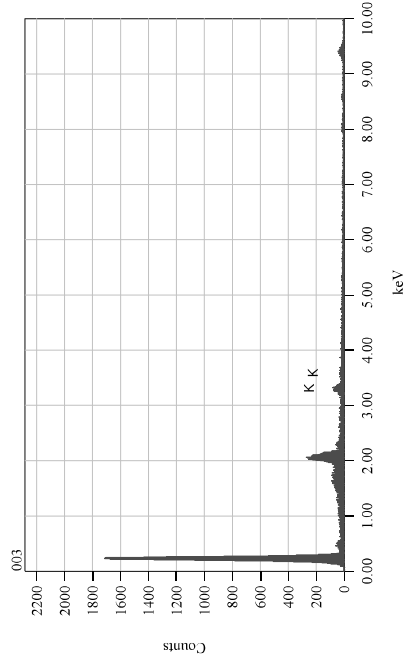
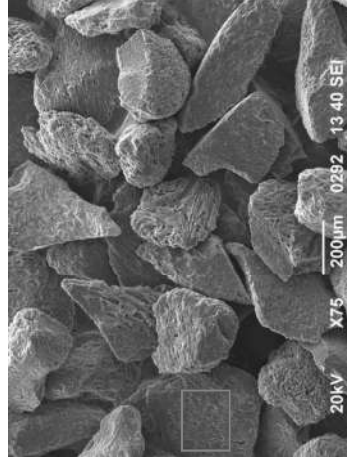


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	3.312	83.02	171.45	100.00	K2O	100.00	48.00	100.00000
K		16.98						
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>48.00</b>	<b>48.00</b>

**PLATE E.12A**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : D12

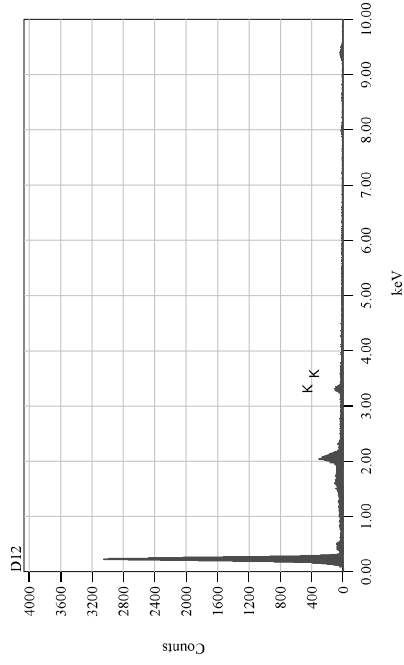
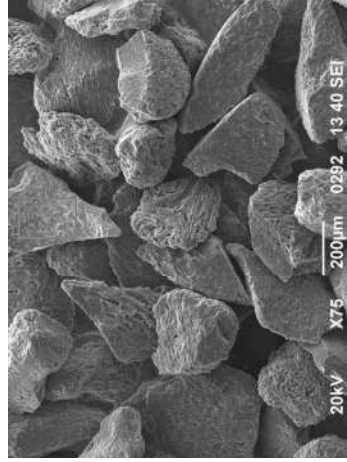


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	0.03	16.98						
K	2.46	83.02	73.94	100.00	K2O	100.00	48.00	100.00000
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>48.00</b>	

**PLATE E.12B**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : D12

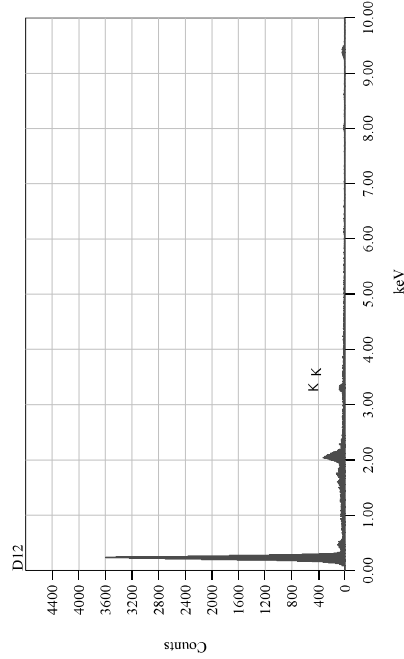
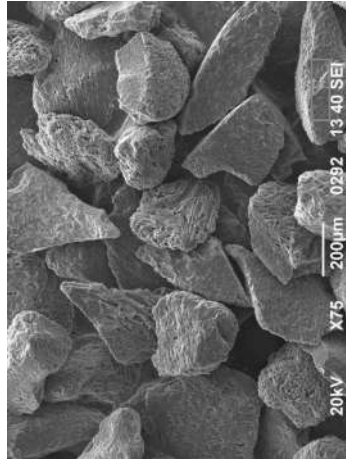


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation	K
O	0.03	16.98						
K	2.46	83.02	73.20	100.00	K2O	100.00	48.00	100.00000
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>48.00</b>	

**PLATE E.12C**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : D12

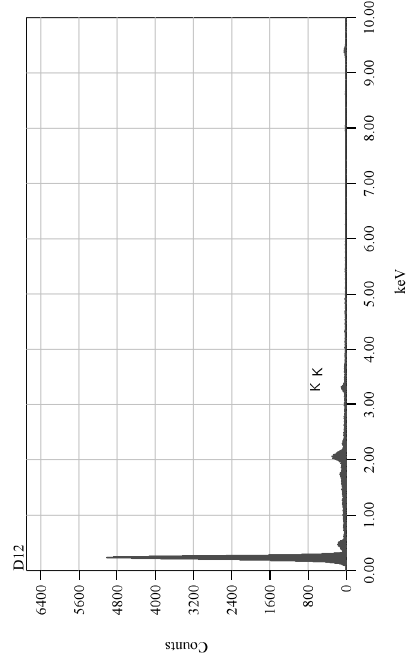
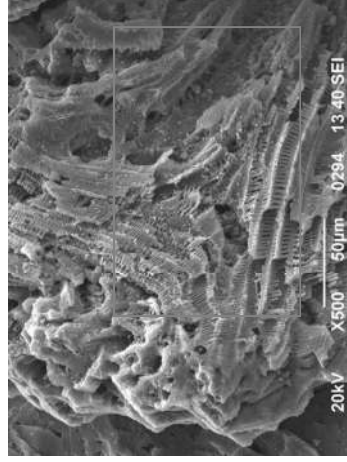


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation
O	0.02	83.02	126.88	100.00	K2O	100.00	48.00
K	0.25	16.98					
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>48.00</b>

**PLATE E.12D**

Tipe Sampel : Serbuk (karbon aktif)  
 Kode Sampel : D12



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)

Element	(keV)	mass%	Error%	Mol%	Compound	mass%	Cation
O	0.02	83.02	153.56	100.00	K2O	100.00	48.00
K	0.25	16.98					
<b>Total</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>		<b>100.00</b>	<b>48.00</b>