



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**UJI PERFORMA  $\text{TiO}_2$  - KARBON AKTIF BERBAHAN DASAR  
TEMPURUNG KELAPA SAWIT SEBAGAI ADSORBEN GAS  
KARBON MONOKSIDA DARI ASAP KEBAKARAN**

**SKRIPSI**

**MARIATUL QIBTHIYAH**

**0806 456 700**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA**

**DEPOK**

**JUNI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**UJI PERFORMA  $\text{TiO}_2$  - KARBON AKTIF BERBAHAN DASAR  
TEMPURUNG KELAPA SAWIT SEBAGAI ADSORBEN GAS  
KARBON MONOKSIDA DARI ASAP KEBAKARAN**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**MARIATUL QIBTHIYAH**

**0806 456 700**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA**

**DEPOK**

**JUNI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Mariatul Qibthiyah

NPM : 0806456700

Tanda Tangan : 

Tanggal : 4 Juli 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Mariatul Qibthiyah  
NPM : 0806368156  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul Skripsi : Uji Performa  $\text{TiO}_2$  - Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa Sawit sebagai Adsorben Gas Karbon Monoksida dari Asap Kebakaran.

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Yuliusman, M.Eng

(.....)

Penguji 1 : Eva Fathul Karamah, S.T., M.T.

(.....)

Penguji 2 : Ir. Dewi Tristantini M.T., PhD.

(.....)

Penguji 3 : Dr.-Ing. Donni Adinata, S.T., M. Eng. Sc

(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Juli 2012

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS  
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Mariatul Qibthiyah

NPM : 0806368156

Program Studi : Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Uji Performa Tio<sub>2</sub> – Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa Sawit Sebagai Adsorben Gas Karbon Monoksida Dari Asap Kebakaran.**

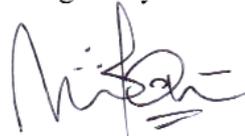
berserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia / formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : Juli 2012

Yang menyatakan



(Mariatul Qibthiyah)

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala, karena berkat rahmat dan petunjuk-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ungkapan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, mama dan ayah, atas segenap cinta dan kasih sayang yang tak pernah habis diberikan kepada penulis serta selalu memberikan dukungan moril dan materil sehingga skripsi ini dapat selesai.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI.
3. Bapak Ir. Yuliusman, M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini, serta selaku kordinator mata kuliah skripsi Teknik Kimia FTUI.
4. Ibu Eva Fathul Karamah, ST, MT, selaku pembimbing akademis.
5. Bapak Ir. Dijan Supramono M.Sc. yang telah memberikan izin untuk menggunakan alat *gas analyzer*.
6. Seluruh dosen Departemen Teknik Kimia FTUI yang telah mengajarkan dan memberikan ilmu pengetahuan dan wawasan di bidang ilmu teknik kimia.
7. Bapak Prof. Ir. Yulianto Sulistyono Nugroho M.Sc., Ph.D, Professor *Fire Safety Engineering* dari Departemen Teknik Mesin yang telah berkenan memberikan pinjaman opasitimeter untuk digunakan dalam penelitian ini.
8. Kakak penulis, Kak Syahrul, Kak Ucha, dan Kak Wildan, atas segenap dukungan moril, materil, dan motivasi yang telah diberikan sehingga skripsi ini dapat selesai.
9. Bang Nazar, yang telah memberikan motivasi dan mewarnai hari-hari penulis saat penelitian dan penulisan skripsi ini.
10. Pak Ali (GP04), Bu Morina, Pak Ibrahim, dan Pak Kardi yang telah membai<sup>vii</sup> penulis dalam pengujian adsorben di Lemigas, Jakarta.
11. Tito (Teknik Mesin 2008) yang telah memperkenalkan alat opasitimeter dan meluangkan waktunya untuk membantu penulis saat menggunakan alat tersebut.

12. Andry (TK08), Rendy (TK08), Diana (TK08), Ramly (ekstensi 09), dan Ray (ekstensi 09) sebagai teman sebimbangan dalam penelitian ini.
13. Akhowati jamilah, Ade, Fatimah, Indri, Khofiful, Nindya, Shofa, atas segala motivasi, dukungan, bantuan, dan candaan antiBETE dan antipenat yang telah diberikan.
14. Teman – teman Departemen Teknik Kimia UI, khususnya angkatan 2008, yang telah banyak membantu dalam berbagi informasi, diskusi, dan pencarian sumber-sumber referensi.
15. Pihak-pihak lain yang mendukung dan membantu yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Akhirnya penulis berharap agar skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Juli 2012

Penulis

## ABSTRAK

Nama : Mariatul Qibthiyah  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul : Uji Performa TiO<sub>2</sub> - Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa Sawit sebagai Adsorben Gas Karbon Monoksida dari Asap Kebakaran.

Pembuatan karbon aktif dari tempurung kelapa sawit terimpregnasi TiO<sub>2</sub> untuk menurunkan konsentrasi gas CO dan menjernihkan asap kebakaran telah dilakukan. Luas permukaan karbon aktif tertinggi sebesar 773,7 m<sup>2</sup>/gram diperoleh dengan suhu aktivasi 700°C dan setelah diimpregnasi TiO<sub>2</sub> meningkat menjadi 782,6 m<sup>2</sup>/gram. Karbon aktif dengan massa 5 gram dapat menurunkan konsentrasi gas CO sebesar 124 ppm dan waktu penjernihan asap 10% sebesar 28 menit, 31 menit, dan 32 menit. Karbon aktif terimpregnasi TiO<sub>2</sub> dengan massa 5 gram terbukti dapat memperbesar penurunan konsentrasi gas CO sebesar 139 ppm dari konsentrasi awalnya dan waktu penjernihan asap 10% dapat dipercepat untuk setiap titik pengamatan menjadi 25 menit, 26 menit, dan 26 menit.

Kata kunci:

Asap kebakaran, karbon monoksida, karbon aktif, TiO<sub>2</sub>

## ABSTRACT

Name : Mariatul Qibthiyah  
Study Program : Teknik Kimia  
Title : Performance Test of TiO<sub>2</sub> - Activated Carbon from Palm Oil Shell as Adsorbent of Carbon Monoxide Gas from Fire Smoke

Manufacture of activated carbon from palm oil shell impregnated TiO<sub>2</sub> to decrease the concentrations of CO gas and purify the fire smoke was done. The maximum value of BET surface area of activated carbon obtained is approximately 773.7 m<sup>2</sup>/gram with the activation temperature 700°C. The BET surface area of activated carbon increases with impregnated TiO<sub>2</sub>. The activated carbon of 5 grams decreases the CO gas concentration to 124 ppm, and the time of 10% smoke purification is 28 minutes, 31 minutes and 32 minutes. The activated carbon impregnated TiO<sub>2</sub> of 5 grams enlarges the decrease of CO gas concentration to 139 ppm from the initial concentration, and the time of 10% smoke purification accelerated for each point of observation to 25 minutes, 26 minutes and 26 minutes.

Key words:

Fire smoke, carbon monoxide, activated carbon, TiO<sub>2</sub>

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	iii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	vi
ABSTRAK .....	viii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xv
<b>1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Batasan Masalah .....	4
1.5 Sistematika Penulisan .....	4
<b>2. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>6</b>
2.1 Proses Pembakaran .....	6
2.1.1 Produksi dan Komposisi Asap .....	7
2.1.2 Karbon Monoksida (CO) .....	10
2.2 Penjernihan Asap .....	12
2.3 Adsorpsi .....	14
2.3.1 Isoterm Adsorpsi .....	15
2.3.1.1 Isoterm Adsorpsi Freundlich .....	16
2.3.1.2 Isoterm Adsorpsi Langmuir .....	16
2.3.1.3 Isoterm Adsorpsi Brunauer, Emmett, Teller (BET) .....	17
2.4 Adsorben Karbon Aktif .....	18

2.4.1 Karbon Aktif Tempurung Kelapa Sawit.....	20
2.4.2 Proses Produksi Karbon Aktif .....	22
2.4.3 Adsorpsi Karbon Monoksida (CO) pada Karbon Aktif.....	27
2.5 Titanium Dioksida (TiO <sub>2</sub> ).....	28
2.6 Preparasi Karbon Aktif Terimpregnasi TiO <sub>2</sub> .....	29
<b>3. METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>31</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	31
3.1.1 Diagram Alir Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa Sawit.....	31
3.1.2 Diagram Alir Preparasi Adsorben Karbon Aktif Terimpregnasi TiO <sub>2</sub> .....	32
3.2 Peralatan Penelitian .....	33
3.2.1 Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa Sawit.....	33
3.2.2 Preparasi Adsorben Karbon Aktif Terintegrasi TiO <sub>2</sub> dengan Metode Impregnasi.....	34
3.2.3 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran .....	34
3.3 Bahan Penelitian.....	35
3.3.1 Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa Sawit.....	35
3.3.2 Preparasi Adsorben Karbon Aktif Terintegrasi TiO <sub>2</sub> dengan Metode Impregnasi.....	35
3.3.3 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran .....	35
3.4 Prosedur Penelitian.....	36
3.4.1 Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa Sawit.....	36
3.4.2 Preparasi Adsorben Karbon Aktif Terintegrasi TiO <sub>2</sub> dengan Metode Impregnasi.....	37
3.4.3 Karakterisasi Adsorben .....	38
3.4.3.1 Karakterisasi Luas Permukaan (BET).....	38
3.4.3.2 Karakterisasi Komposisi (EDX).....	38
3.4.4 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran .....	38
3.5 Variabel Penelitian .....	39
3.6 Data Penelitian.....	40
3.7 Pengolahan Data Penelitian.....	40

<b>4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>41</b>
4.1 Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa Sawit .....	41
4.2 Preparasi Adsorben Karbon Aktif Terimpregnasi TiO <sub>2</sub> .....	46
4.3 Karakterisasi Adsorben .....	47
4.3.1 Karakterisasi Luas Perm..... Adsorben.....	47
4.3.2 Karakterisasi Komposisi Adsorben .....	50
4.4 Uji Adsorpsi Gas Karbon Monoksida dan Penjernihan Asap Kebakaran .	50
4.4.1 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran dengan Karbon Aktif.....	52
4.4.2 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran dengan Karbon Aktif Terimpregnasi TiO <sub>2</sub> .....	54
<b>5. KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>58</b>
5.1 Kesimpulan.....	58
5.2 Saran .....	58
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>60</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>64</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Produk Hasil Pembakaran (Porteous, 2008).....	6
Gambar 2.2	Struktur Kimia Karbon Monoksida (Ibadurrohman, 2008).....	10
Gambar 2.3	Persentase Opasitas Asap Ringelmann (Pamungkas, 2011) .....	13
Gambar 2.4	Tipe Adsorpsi Isotherm (Maron, 1965) .....	15
Gambar 2.5	Model Adsorpsi Langmuir (Hwang, 2011) .....	16
Gambar 2.6	Ilustrasi Adsorpsi Multilayer Menurut BET (Agustiar, 2011) ...	18
Gambar 2.7	Ilustrasi Adsorpsi Monolayer Gas pada Karbon Aktif (Manocha, 2003).....	18
Gambar 2.8	Struktur Fisik Karbon Aktif (Pujiyanto, 2010).....	19
Gambar 2.9	Struktur Pori Karbon Aktif (Setiawan, 2008) .....	19
Gambar 2.10	Struktur Karbon Aktif Sebelum dan Sesudah Aktivasi (Pujiyanto, 2010).....	27
Gambar 2.11	Perspektif Struktur Kristal (a) Anatase dan (b) Rutile (Alfat, 2009).....	28
Gambar 2.12	Skema Proses Impregnasi $TiO_2$ ke dalam Karbin Aktif (Basuki, 2007).....	30
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	31
Gambar 3.2	Diagram Alir Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa Sawit.....	32
Gambar 3.3	Diagram Alir Preparasi Adsorben Karbon Aktif Terimpregnasi $TiO_2$ .....	33
Gambar 3.4	Prototipe Ruang Uji.....	35
Gambar 3.5	Reaktor untuk Aktivasi .....	37
Gambar 4.1	Tempurung Kelapa Sawit yang Telah Dikeringkan .....	41
Gambar 4.2	(a) Proses Karbonisasi Menggunakan <i>Furnace</i> dan (b) Hasil Karbonisasi dari Tempurung Kelapa Sawit.....	42
Gambar 4.3	Arang Tempurung Kelapa Sawit yang Telah Dikeringkan dan Diayak.....	42
Gambar 4.4	Arang Tempurung Kelapa Sawit Setelah Proses Aktivasi Kimia	43
Gambar 4.5	Alat Proses Aktivasi .....	44
Gambar 4.6	Hasil Produk Karbon Aktif.....	46
Gambar 4.7	Pengaruh Suhu Aktivasi terhadap Luas Permukaan Karbon Aktif.....	48
Gambar 4.8	Pengaruh Suhu Aktivasi terhadap Volume Pori Karbon Aktif ..	49

Gambar 4.9 Pengaruh Suhu Aktivasi terhadap Diameter Pori Rata-rata Karbon Aktif .....	49
Gambar 4.10 Ruang Uji Saat Pengukuran Opasitas dengan Opasitimeter.....	50
Gambar 4.11 Wadah Pembakaran dan Pompa .....	51
Gambar 4.12 Pengukuran konsentrasi CO dengan Gas Analyzer.....	51
Gambar 4.13 Pengaruh Massa Adsorben terhadap Penurunan Konsentrasi Gas CO.....	52
Gambar 4.14 Tingkat Kejernihan Asap dengan Adsorben Karbon Aktif terhadap Waktu pada (a) Titik 1, (b) Titik 2, dan (c) Titik 3 ....	53
Gambar 4.15 Pengaruh Waktu terhadap Penurunan Konsentrasi Gas CO dengan Variasi Massa Adsorben .....	54
Gambar 4.16 Pengaruh Massa Adsorben terhadap Penurunan Konsentrasi Gas CO.....	55
Gambar 4.17 Tingkat Kejernihan Asap dengan Adsorben Karbon Aktif Terimpregnasi TiO <sub>2</sub> terhadap Waktu pada (a) Titik 1, (b) Titik 2, dan (c) Titik 3 .....	56
Gambar 4.18 Pengaruh Waktu terhadap Penurunan Konsentrasi Gas CO dengan Variasi Massa Adsorben .....	56
Gambar 4.19 Pengaruh Massa Adsorben terhadap Penurunan Konsentrasi Gas CO dengan Variasi Jenis Adsorben .....	57

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Komposisi Asap dari Pembakaran Kayu (Naehar, 2007).....	9
Tabel 2.2	Komposisi Asap dari Pembakaran Beberapa Benda (persen massa) (Gann, 2003).....	9
Tabel 2.3	Properties Karbon Monoksida (Alfat, 2009).....	10
Tabel 2.4	Konsentrasi CO terhadap Pembentukan COHb (Gondang, 2010)	11
Tabel 2.5	Perbandingan Bilangan Ringelmann, Opasitas, dan Fraksi Cahaya yang Dapat Ditransmisikan (Pamungkas, 2011) .....	14
Tabel 2.6	Perbandingan antara Adsorpsi Fisika dan Adsorpsi Kimia (Ruthven, 1984).....	15
Tabel 2.7	Ukuran Pori Karbon Aktif (Ruthven, 1984).....	19
Tabel 2.8	Karakteristik Berbagai Bahan Baku untuk Pembuatan Karbon Aktif (Manocha, 2003).....	21
Tabel 2.9	Komposisi Tempurung Kelapa Sawit (Lubis, 2008) .....	22
Tabel 2.10	Tahapan dalam Proses Karbonisasi (Prabowo, 2009) .....	23
Tabel 2.11	Perkembangan Penelitian Pembuatan Karbon Aktif .....	25
Tabel 4.1	<i>Yield</i> Proses Karbonisasi Tempurung Kelapa Sawit .....	42
Tabel 4.2	Persentase Penguapan Air pada Hasil Pencampuran Larutan <i>Activating Agent</i> dengan Arang Tempurung Kelapa Sawit.....	43
Tabel 4.3	Kondisi dan Hasil Pengamatan Proses Aktivasi Sampel .....	44
Tabel 4.4	Persentase Kehilangan Massa <i>Activating agent</i> /Bahan Baku pada Aktivasi.....	45
Tabel 4.5	Proses Pencucian Karbon Aktif dari Hasil Aktivasi .....	46
Tabel 4.6	Perubahan Massa pada Proses Impregnasi TiO <sub>2</sub> ke Karbon Aktif	47
Tabel 4.7	Hasil Karakterisasi Luas Permukaan (BET) Adsorben Karbon Aktif .....	48
Tabel 4.8	Nilai t <sub>10</sub> Menggunakan Adsorben Karbon Aktif dengan Variasi Massa .....	52
Tabel 4.9	Nilai t <sub>10</sub> Menggunakan Adsorben Karbon Aktif – TiO <sub>2</sub> dengan Variasi Massa .....	55

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Pengujian Luas Permukaan (BET) Karbon Tanpa Aktivasi.....	64
Lampiran 2. Hasil Pengujian Luas Permukaan (BET) Karbon Aktif dengan Suhu Aktivasi 500°C .....	66
Lampiran 3. Hasil Pengujian Luas Permukaan (BET) Karbon Aktif dengan Suhu Aktivasi 600°C .....	68
Lampiran 4. Hasil Pengujian Luas Permukaan (BET) Karbon Aktif dengan Suhu Aktivasi 700°C .....	70
Lampiran 5. Hasil Pengujian Luas Permukaan (BET) Karbon Aktif Terintegrasi TiO <sub>2</sub> .....	72
Lampiran 6. Hasil Pengujian Komposisi Karbon Aktif .....	74
Lampiran 7. Hasil Pengujian Komposisi Karbon Aktif Terintegrasi TiO <sub>2</sub> .....	75
Lampiran 8. Hasil Uji Adsorpsi dan Tingkat Kejernihan Asap .....	76



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kebakaran adalah peristiwa terbakarnya material, baik padat, cair, atau gas dalam skala besar yang disertai dengan terbentuknya asap dan gas berbahaya. Pada kasus kebakaran, seseorang yang terperangkap dalam asap yang tebal seringkali mengalami disorientasi sehingga memperlambat waktu penyelamatan diri. Akibatnya, orang tersebut akan lebih banyak menghirup asap yang beracun ke dalam paru-paru dan terkena pengaruh suhu asap yang meninggi. Keadaan inilah yang pada akhirnya menyebabkan seseorang meninggal (Saputra, 2007). Gas polutan yang paling berbahaya dari asap pembakaran adalah karbon monoksida (CO) dan oksida nitrogen ( $\text{NO}_x$ ) (Naehar, 2007), di mana gas CO yang dihasilkan dari pembakaran kayu adalah 0,046 fraksi volum, lebih banyak daripada gas  $\text{NO}_2$  yang dihasilkan dari pembakaran kayu yaitu sebesar 0,001 fraksi volum (Gann, 2003). Pada kasus kebakaran, 85% tingkat kematian disebabkan oleh keracunan asap yang mengandung gas beracun, seperti karbon monoksida (CO) (Gondang, 2010). Gas CO merupakan komponen gas yang sangat beracun karena akan menyebabkan penghambatan aliran oksigen untuk berikatan dengan hemoglobin sehingga akan menyebabkan sesak nafas dan resiko kematian (Apriawan, 2010). Oleh karena itu, menjadi suatu hal yang penting sekaligus merupakan solusi teknik yang tepat untuk melakukan usaha penurunan konsentrasi gas CO ke tingkat yang lebih rendah, sehingga dapat menurunkan paparan gas CO tersebut terhadap manusia dan dapat menurunkan resiko kematian pada kasus kebakaran.

Secara umum, reduksi polutan pada gas dilakukan dengan adsorpsi menggunakan adsorben. Salah satu adsorben yang dapat digunakan adalah karbon aktif karena karbon aktif mempunyai daya adsorpsi dan luas permukaan yang baik (Pujiyanto, 2010). Karbon aktif dapat dibuat dari material yang mengandung karbon, salah satunya adalah tempurung kelapa sawit. Tempurung

kelapa sawit dapat digunakan sebagai bahan dasar pembuatan karbon aktif karena mengandung lignoselulosa dalam jumlah yang cukup besar, di mana lignoselulosa mengandung karbon yang sangat banyak, serta kemudahan tempurung kelapa sawit untuk didapatkan secara komersial (Mulia, 2007). Namun, fungsi adsorben hanya dapat memindahkan polutan dari udara tetapi tidak dapat menghancurkannya. Pada suatu waktu tertentu, adsorben akan mengalami kejenuhan dan tidak dapat mengadsorpsi polutan kembali. Untuk mengembalikan keaktifannya, adsorben memerlukan proses pemanasan sehingga proses adsorpsi tidak dapat dilakukan secara kontinyu dan kurang ekonomis (Khan, 2003).

Salah satu cara degradasi polutan yang dapat dikembangkan adalah proses fotokatalisis dengan bahan semikonduktor.  $\text{TiO}_2$  merupakan bahan semikonduktor yang banyak digunakan sebagai fotokatalis karena keunggulannya dibandingkan jenis semikonduktor lain (Litter, 1996; Salmat, 2007). Dengan mengimpregnasi  $\text{TiO}_2$  ke dalam karbon aktif, diharapkan proses adsorpsi polutan menjadi lebih optimal. Selain itu, adsorben yang digunakan tidak perlu diregenerasi karena polutan yang menempel akan didegradasi oleh fotokatalis sehingga kejenuhan adsorben dapat dihindari (Slamet, 2007).

Pada penelitian terdahulu, evaluasi potensi adsorben partikel nano dan adsorben bubuk biasa untuk penjernihan asap kebakaran di ruang tertutup telah dilakukan dan hasilnya menunjukkan bahwa partikel nano merupakan adsorben yang paling baik untuk penjernihan asap kebakaran (Yadav et al, 2006). Proses penjernihan asap kebakaran menggunakan adsorben berukuran nano juga telah dilakukan dan hasilnya menunjukkan bahwa  $\text{TiO}_2$  dan  $\text{MgO}$  merupakan adsorben yang memberikan kinerja paling baik untuk menjernihkan asap kebakaran (Mulukutla et al, 2007). Proses adsorpsi menggunakan  $\text{TiO}_2$  dan karbon aktif sebagai penyangga telah digunakan untuk mengadsorpsi beberapa senyawa organik, seperti CO, nikotin, dan piridin dari asap rokok (Ibadurrohman, 2008 dan Alfat, 2009). Selain itu, telah dilakukan pula penurunan konsentrasi CO dan  $\text{NO}_2$  pada emisi gas buang menggunakan arang tempurung kelapa yang disisipi  $\text{TiO}_2$  dan hasilnya diketahui bahwa terjadi penurunan konsentrasi gas CO sebesar 91,50 % dan  $\text{NO}_2$  sebesar 95,40 %, dibandingkan media arang tempurung kelapa tanpa

penyisipan TiO<sub>2</sub> yang hanya bisa menurunkan CO sebesar 83,10 % dan NO<sub>2</sub> sebesar 93,60 % (Basuki, 2008).

Pada penelitian ini, akan dilakukan uji performa adsorben Karbon Aktif (KA) – TiO<sub>2</sub> dalam mengadsorpsi gas CO dan menjernihkan asap kebakaran dalam model ruang. Karbon aktif yang digunakan dalam penelitian ini berbahan dasar tempurung kelapa sawit dengan variasi suhu aktivasi sebesar 500°C, 600°C, dan 700°C. Variasi suhu aktivasi ini dilakukan untuk mengetahui suhu aktivasi optimal yang dapat menghasilkan karbon aktif dengan luas permukaan tinggi. Karbon aktif yang memiliki luas permukaan paling tinggi ini selanjutnya diimpregnasi dengan TiO<sub>2</sub> untuk mengetahui pengaruh keberadaan TiO<sub>2</sub> pada performa karbon aktif dalam mengadsorpsi gas CO dan menjernihkan asap kebakaran dalam model ruang. Selain itu, dilakukan pula variasi massa adsorben pada saat pengujian untuk mengetahui massa adsorben yang optimal dalam mengadsorpsi gas CO dan menjernihkan asap kebakaran. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan adsorben yang telah dibuat kelak dapat diaplikasikan untuk pemurnian gas polutan pada unit purifikasi asap kebakaran atau masker pernapasan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini, permasalahan yang dipelajari adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh suhu aktivasi dalam pembuatan karbon aktif terhadap luas permukaan karbon aktif yang dihasilkan?
2. Apakah pengimpregnasian TiO<sub>2</sub> pada adsorben karbon aktif dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi dalam menurunkan konsentrasi gas CO dan mempercepat waktu penjernihan asap kebakaran?
3. Bagaimana pengaruh massa adsorben yang disemprotkan ke dalam ruang uji terhadap penurunan konsentrasi gas CO dan waktu penjernihan asap kebakaran?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui suhu aktivasi optimum dalam membuat karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa sawit yang memiliki luas permukaan tinggi (lebih besar dari  $700 \text{ m}^2/\text{gram}$ ).
2. Membuat adsorben yang memiliki kapasitas adsorpsi tinggi dalam menurunkan konsentrasi gas CO dan menjernihkan asap kebakaran.
3. Mengetahui massa adsorben yang efektif dalam menurunkan konsentrasi gas CO dan menjernihkan asap kebakaran.

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Material adsorben yang digunakan adalah  $\text{TiO}_2$  Degussa P-25 dan karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa sawit yang sudah tua. Pembuatan karbon aktif dilakukan dalam sistem *batch* dengan menggunakan  $\text{ZnCl}_2$  sebagai *activating agent*. *Activating agent* merupakan zat pengaktivasi dalam pembuatan karbon aktif. Gas inert yang dipakai pada proses aktivasi adalah  $\text{N}_2$ .
2. Proses impregnasi  $\text{TiO}_2$  ke dalam karbon aktif dilakukan dengan metode impregnasi.
3. Analisis yang dilakukan hanya pada proses adsorpsi karbon monoksida dan penjernihan asap dari pembakaran serbuk kayu, potongan kabel, dan kertas dalam suhu ruang.

### 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam makalah ini adalah sebagai berikut :

#### **BAB I : PENDAHULUAN**

Berisi latar belakang sebagai dasar penelitian dilakukan, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

**BAB II : TINJAUAN PUSTAKA**

Berisi landasan teori umum yang digunakan untuk menjelaskan masalah yang dibahas.

**BAB III : METODE PENELITIAN**

Berisi tentang metode penelitian serta langkah-langkah yang dilakukan dalam menjalankan penelitian untuk mencapai tujuan.

**BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN**

Menjelaskan tentang hasil yang didapat selama penelitian, hasil pengolahan, serta analisis dari hasil yang didapatkan selama penelitian, terdiri atas : data mengenai pembuatan adsorben, karakterisasi adsorben, serta uji adsorben dalam mengadsorpsi gas CO.

**BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN**

Menjelaskan mengenai kesimpulan yang didapat selama penelitian dan beberapa hal yang disarankan untuk kepentingan pengembangan penelitian.

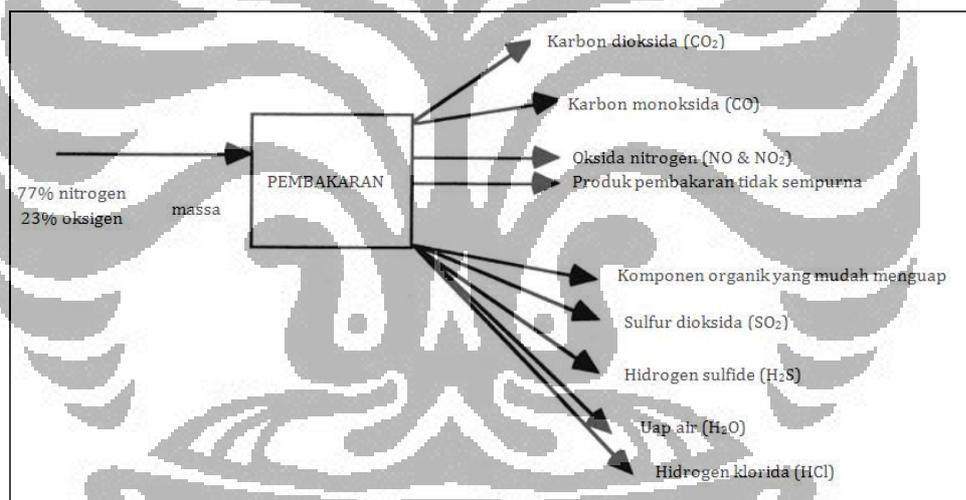
**DAFTAR PUSTAKA**

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Proses Pembakaran

Pembakaran dapat didefinisikan sebagai suatu reaksi kimia kompleks yang isotermik antara suatu bahan bakar (biasanya hidrokarbon) dengan suatu zat pengoksidasi yang dapat menghasilkan panas atau terkadang bersamaan dengan dihasilkannya cahaya dan asap. Dalam suatu reaksi pembakaran lengkap, suatu senyawa bereaksi dengan *oxidizing agent*, seperti oksigen, dan menghasilkan berbagai produk sebagai hasil dari reaksi pembakaran tersebut (Apriawan, 2010). Secara umum, produk hasil reaksi pembakaran dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Produk Hasil Pembakaran (Porteous, 2008)

Reaksi pembakaran dipengaruhi oleh jumlah *oxidizing agent* dan komponen bahan bakarnya. Apabila jumlah bahan bakar lebih kecil daripada jumlah oksigen, maka reaksi kesetimbangan kimia akan tercapai dan akan dihasilkan  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  yang disebut sebagai pembakaran sempurna. Namun, apabila terdapat jumlah bahan bakar yang lebih besar daripada jumlah oksigen, maka akan dihasilkan  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , dan  $\text{CO}$  sebagai hasil pembakaran tidak sempurna (Porteous, 2008). Reaksi kimia yang dapat terjadi pada proses pembakaran adalah sebagai berikut :

- 1) Pembakaran tidak sempurna C menjadi CO



- 2) Pembakaran sempurna C menjadi CO<sub>2</sub>



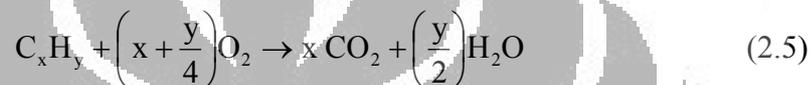
- 3) Pembakaran CO menjadi CO<sub>2</sub>



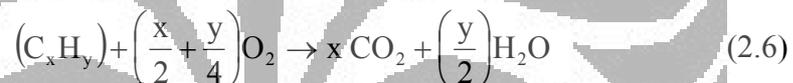
- 4) Pembakaran H<sub>2</sub> menjadi H<sub>2</sub>O



Secara umum, reaksi kimia untuk stoikiometri pembakaran dari hidrokarbon dan oksigen adalah sebagai berikut :



dan reaksi kimia untuk stoikiometri pembakaran dari hidrokarbon dan oksigen yang tidak lengkap adalah sebagai berikut :



dengan x adalah jumlah atom karbon (C) dan y adalah jumlah atom hidrogen (H). Salah satu indikator untuk mengetahui suatu reaksi pembakaran adalah terbentuknya asap dan nyala. Kedua hal ini dipengaruhi oleh jumlah bahan bakar, *oxidizing agent*, dan waktu pembakaran. Semakin besar jumlah bahan bakar, *oxidizing agent*, dan waktu pembakaran, maka kemungkinan terbentuknya gas beracun juga semakin besar (Apriawan, 2010).

### 2.1.1 Produksi dan Komposisi Asap

Asap merupakan gas-gas serta partikulat padat dan cair yang berterbangan yang timbul pada waktu suatu bahan mengalami proses pembakaran, bersama dengan sejumlah udara yang terperangkap atau tercampur di dalamnya. Hasil pembakaran biasanya berupa partikel mikro, bahan yang belum habis terbakar, karbon monoksida, karbon dioksida, uap air, serta berbagai gas yang bersifat toksik maupun korosif. Bahaya asap terutama diperhatikan dari segi toksisitas, visibilitas, dan suhunya (Saputra, 2007).

Densitas dan toksisitas asap yang diproduksi akan bergantung pada bahan yang dibakar, baik jumlah maupun kandungannya, dan lamanya waktu pembakaran. Jumlah dan karakter asap juga dipengaruhi oleh kondisi pembakaran, seperti *flaming* (nyala), pirolisis, atau *smoldering* (membara) (Saputra 2007; Apriawan, 2010). Asap yang dihasilkan dari sebuah penyalaan (*flame*) ditunjukkan dengan adanya keseimbangan antara proses pertumbuhan dalam nyala bahan bakar dengan penurunan tingkat oksigen, dan akan dihasilkan asap dalam jumlah yang banyak. Pirolisis terjadi pada permukaan bahan bakar sebagai hasil dari kenaikan suhu dan asap yang dihasilkan lebih sedikit dari pada proses *flaming*. Kondisi pembakaran *smoldering* (pembaraan) akan menghasilkan jumlah asap yang cenderung lebih sedikit dibandingkan dengan kondisi pembakaran *flaming* dan pirolisis untuk jenis dan jumlah bahan bakar yang sama (Saputra, 2007).

Jika seseorang terperangkap dalam asap yang tebal seringkali menimbulkan disorientasi sehingga memperlambat waktu penyelamatan diri. Akibatnya, orang akan lebih banyak menghirup asap yang beracun ke dalam paru-paru dan terkena pengeruh suhu asap yang tinggi. Keadaan ini pada akhirnya yang menyebabkan seseorang meninggal (Saputra, 2007).

Dalam suatu ruangan, terdapat beberapa benda yang umum ditemukan, antara lain rak buku, karpet, sofa, dan kabel listrik. Komposisi asap dari pembakaran kayu, rak buku, karpet, sofa, dan kabel listrik dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan 2.2 berikut :

**Tabel 2.1.** Komposisi Asap dari Pembakaran Kayu (Naehler, 2007)

<b>Komponen</b>	<b>Partikel (mg/kg pembakaran kayu)</b>	<b>Gas (mg/kg pembakaran kayu)</b>
Karbon monoksida	–	130.000
Alkana (C <sub>2</sub> – C <sub>7</sub> )	0,47 – 570	1,01 – 300
Alkena (C <sub>2</sub> – C <sub>7</sub> )	0,58 – 280	92 – 1.300
Hidrokaron aromatik polisiklik	5,1 – 32.000	43,4 – 355
Metana	–	4.100
Hidrokarbon (C <sub>2</sub> – C <sub>7</sub> ) nonmetana	–	390 – 4.000
Alkanol	0,24 – 5.400	120 – 9.200
Aldehid dan keton	–	0,94 – 4.450
Asam karboksilat	6.200 – 775.000	2,4
Alkil ester	0,37 – 4.450	–
Phenol metoksilat	28 – 1.000	1.200 – 1.500
Substituen aromatik lainnya	5 – 120.000	110 – 3.600
Derivat gula	1,4 – 12.600	–
Kompleks tidak terbakar	1,2 – 120	20 – 600

**Tabel 2.2.** Komposisi Asap dari Pembakaran Beberapa Benda dalam Persen Massa (Gann, 2003)

<b>Gas</b>	<b>Sofa (poliester)</b>	<b>Rak buku (kayu)</b>	<b>Karpét (PVC lembaran)</b>	<b>Kabel (PVC dan nilon)</b>
CO	$5,1 \times 10^{-2}$	$4,6 \times 10^{-2}$	–	$1,48 \times 10^{-1}$
HCN	$1,5 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-3}$	–	$4,0 \times 10^{-3}$
HCl	$6,0 \times 10^{-3}$	$2,2 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-1}$
NO <sub>2</sub>	$< 7 \times 10^{-3}$	$< 1 \times 10^{-3}$	–	$< 1 \times 10^{-3}$
Acrolein	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-4}$	–	$< 1 \times 10^{-4}$
Formaldehid	$< 8 \times 10^{-4}$	$< 4 \times 10^{-4}$	–	$< 7 \times 10^{-4}$

Gas polutan yang paling berbahaya dari asap pembakaran adalah karbon monoksida (CO) dan oksida nitrogen (NO<sub>x</sub>) (Naehler, 2007), di mana CO yang dihasilkan dari pembakaran kayu adalah  $4,6 \times 10^{-2}$  fraksi massa dan NO<sub>2</sub> yang dihasilkan adalah  $1 \times 10^{-3}$  fraksi massa (Gann, 2003). Dari informasi ini, diketahui bahwa komposisi terbesar pada asap kebakaran adalah gas karbon monoksida (CO). Gas CO ini merupakan gas beracun dan perlu direduksi konsentrasinya.

### 2.1.2 Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida adalah senyawa kimia yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa. Karbon monoksida memiliki densitas yang lebih rendah dari udara dan sulit larut dalam air. Karbon monoksida dikenal sebagai polutan yang sangat berbahaya bagi manusia sehingga kandungannya di udara sangat perlu untuk dikurangi.



Gambar 2.2. Struktur Kimia Karbon Monoksida (Ibadurrohman, 2008)

Tabel 2.3. Properties Karbon Monoksida (Alfat, 2009)

Sifat	Keterangan
Rumus molekul	CO
Penampakan	Gas tidak berwarna
Berat molekul	28,0101 gram/mol
Densitas	1,145 gram/liter pada 25 <sup>0</sup> C, 1 atm
Titik beku	-205 °C
Titik didih	-192 °C
Kelarutan dalam air	0,0026 gram/100 mL (20 ° C)

Karbon monoksida dapat terbentuk dari berbagai sumber dengan konsentrasi yang bervariasi. Di bawah ini adalah berbagai sumber CO beserta konsentrasinya:

- 0,1 ppm : tingkat alami pada udara atmosfer
- 0,5 - 5 ppm : rata-rata pada rumah tangga
- 5 - 15 ppm : konsentrasi pada gas perapian
- 100 - 200 ppm : daerah padat kendaraan
- 5.000 ppm : cerobong asap pada pembakaran kayu rumah tangga
- 7.000 ppm : gas buang kendaraan pada converter katalitik
- 30.000 ppm : asap rokok

Pemaparan karbon monoksida dapat menyebabkan kerusakan pada sistem saraf dan hati. Konsentrasi pada 35 ppm dapat menyebabkan sakit kepala dan

konsentrasi sekitar 667 ppm dapat menyebabkan 50% hemoglobin terkonversi menjadi karboksi hemoglobin. Karboksi hemoglobin ini tidak dapat menghantarkan oksigen dengan baik sehingga asupan oksigen bagi tubuh manusia menjadi terganggu. Pengaruh konsentrasi CO terhadap pembentukan COHb dan indikasi yang ditimbulkan disajikan dalam Tabel 2.4.

**Tabel 2.4.** Konsentrasi CO terhadap Pembentukan COHb (Gondang, 2010)

<b>Konsentrasi CO (ppm)</b>	<b>Tingkat COHb (%)</b>	<b>Indikasi</b>
35	<10	Sakit kepala dan pusing
100	>10	Sakit kepala dalam 2–3 jam
200	20	Sakit kepala dalam 2–3 jam, hilang kesadaran
400	25	Sakit kepala sangat dalam 1–2 jam
800	30	Pusing, mual, hilang kesadaran dalam 45 menit, mati rasa dalam 2 jam
1.600	40	Sakit kepala, kontraksi jantung cepat, pusing dan mual dalam 20 menit, dan dapat menyebabkan kematian dalam waktu kurang dari 20 jam
3.200	50	Sakit kepala, pusing, dan mual dalam 5 hingga 10 menit, dan dapat menyebabkan kematian dalam waktu 30 menit
6.400	60	Sakit kepala, pusing, dan mual dalam 1–2 menit, hilang kesadaran, pernapasan terhenti, dan dapat menyebabkan kematian dalam waktu kurang dari 20 jam
12.800	>70	Kematian dalam waktu kurang dari 3 menit

Karbon monoksida merupakan senyawa yang sangat beracun. Oleh karena itu, perlu dilakukan penurunan konsentrasi CO ke tingkat yang lebih rendah, sehingga dapat menurunkan paparan gas CO terhadap manusia, salah satunya dengan cara adsorpsi. Proses adsorpsi tidak hanya digunakan untuk menurunkan kadar CO dalam asap, tetapi dapat juga digunakan untuk menjernihkan asap itu sendiri, sehingga proses evakuasi dalam suatu kasus kebakaran dapat dilakukan dengan cepat.

## 2.2 Penjernihan Asap

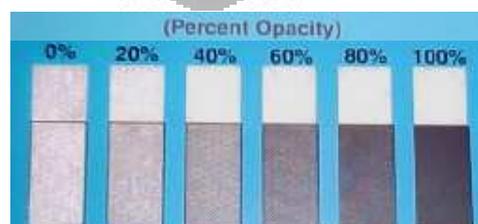
Asap terdiri dari partikel-partikel halus, baik padat maupun cair, yang terbang di udara. Partikel tersebut tersebar dan menyerap gelombang elektromagnetik yang berbeda. Asap, seperti aerosol lain, merupakan partikel yang tidak stabil, maksudnya adalah konsentrasi dan komposisinya berubah terhadap waktu. Perubahan tersebut dapat dihasilkan dari gaya luar, baik proses kimia maupun fisika. Proses tersebut yaitu koagulasi, kondensasi, evaporasi, adsorpsi, absorpsi, dan reaksi kimia. Dengan memakai satu atau kombinasi dari proses tersebut, penjernihan asap dapat ditingkatkan. Berdasarkan proses-proses tersebut, prinsip penjernihan asap dapat dikategorikan menjadi (Yadav et. al., 2006):

1. Meningkatkan koagulasi dengan memakai partikel penyerap, muatan
2. elektrostatis atau gelombang suara
3. Meningkatkan kondensasi dengan memakai inti higroskopis
4. Meningkatkan evaporasi melalui pemanasan
5. Menipiskan asap dengan mencampurnya dengan air

Salah satu cara yang mudah untuk mengukur apakah suatu adsorben efektif menjernihkan asap adalah dengan merasiokan waktu yang diperlukan asap untuk jernih memakai adsorben dan jernih secara alami dengan tingkat kejernihan tertentu. Tingkat kejernihan ini diukur dengan mentransmisikan cahaya. Nilai rasio biasanya di bawah 1. Semakin kecil rasio, semakin efektif adsorben dalam menyerap asap. Jika sama dengan 1, adsorben tidak memberikan dampak sama sekali. Jika lebih besar 1, adsorben malah ikut membuat gelap ruangan. Yadav et. al., 2007, melakukan evaluasi potensi partikel nano dalam penjernihan asap di ruang tertutup. Penelitian dilakukan memakai ruangan berukuran 2,4 m x 2,4 m x 3,6 m yang berisi generator asap, filter, dan transmissometer. Sebagai simulasi asap digunakan aerosol glikol. Adsorben yang digunakan ada dua jenis, yaitu partikel nano (NA TiO<sub>2</sub>, NA MgO, NA MgO plus, NA Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan NA Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> plus) dan bubuk biasa (NaHCO<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub>, Ca(OH)<sub>2</sub>, dan TiO<sub>2</sub>). Mula-mula ruang dipenuhi asap sampai opasitas 100% (transmisi cahaya 0%). Lalu diukur waktu sampai transmisi cahaya sebesar 10% dan 20% tercapai secara alami akibat gaya

gravitasi dan evaporasi. Transmisi 10% dan 20% dipakai karena manusia dapat melihat melewati asap pada transmisi cahaya sebesar itu. Dengan cara yang sama, berikutnya digunakan adsorben dengan cara disemprotkan. Hasilnya menunjukkan bahwa NA MgO plus memiliki rasio terkecil, yaitu 0,1 pada transmisi cahaya 10% ( $t^*_{10} = 0,1$ ). Artinya, asap dapat jernih 10 kali lebih cepat dengan memakai adsorben ini. Tabel 2.5 menunjukkan keefektifan beberapa adsorben dalam menjernihkan asap. Dengan prinsip yang hampir sama, paten penjernihan asap telah dikeluarkan oleh Mulukutla, dkk, 2007. Seperti yang telah disinggung di bab sebelumnya bahwa NA TiO<sub>2</sub>-07 dan NA MgO plus merupakan adsorben yang paling efektif untuk menjernihkan asap. Selain itu, diketahui bahwa semakin kecil ukuran partikel semakin baik kinerja oksida logam. Jumlah adsorben yang disemprotkan juga ikut mempengaruhi efektifitas penjernihan.

Opasitas merupakan derajat ketidaktambusan permukaan benda terhadap cahaya (kegelapan). Pada banyak kasus, opasitas diartikan sebagai pengukuran seberapa banyak radiasi elektromagnet, yaitu sinar, yang dapat melewati sistem yang tersusun dari molekul gas, atom, ion, dan kumpulan debu (Jonathan, 2002). Opasitas dapat memberi informasi jenis material apa yang ada dan berapa banyak kemungkinan kandungan material itu. Opasitas dinyatakan dalam persen dengan rentang 0 sampai 100. Sebagai contoh, jika suatu keadaan dikatakan memiliki opasitas 25%, hal ini berarti debu, jelaga, atau asap hanya menahan 25% cahaya yang lewat dan meneruskan 75% sisanya (Jennifer et. al., 2007). Untuk keadaan yang benar-benar gelap opasitas diberi persentase 100 dan keadaan jernih diberi persentase 0. Gambar 2.3 merupakan persentase opasitas Asap Ringelmann, yaitu gambar yang menunjukkan opasitas (kejernihan) suatu benda.



**Gambar 2.3.** Persentase Opasitas Asap Ringelmann (Pamungkas, 2011)

Tabel 2.5. menunjukkan perbandingan antara Bilangan Ringelmann, opasitas, dan fraksi cahaya yang dapat ditransmisikan.

**Tabel 2.5.** Perbandingan Bilangan Ringelmann, Opasitas, dan Fraksi Cahaya yang Dapat Ditransmisikan (Pamungkas, 2011)

<b>Fraksi Transmisi Cahaya</b>	<b>Bilangan Ringelmann</b>	<b>Opasitas</b>
1,0	0	0 %
0,8	1	20 %
0,6	2	40 %
0,4	3	60 %
0,2	4	80 %
0	5	100 %

### 2.3 Adsorpsi

Adsorpsi adalah proses yang terjadi apabila sejumlah gas atau cairan (adsorbat) terkonsentrasi pada suatu permukaan padatan atau cairan (adsorben) dan membentuk lapisan molekular atau atom. Molekul-molekul zat padat ataupun cairan memiliki gaya molekular yang tidak stabil atau tidak jenuh sehingga permukaan padatan atau cairan tersebut memiliki kecenderungan untuk tertarik ke arah dalam dan menarik zat-zat lain yang melakukan kontak dengannya (Maron, 1965; Yang, 1987). Adsorben yang saat ini dikenal anantara lain adalah karbon aktif, silika gel, dan zeolit.

Adsorpsi biasanya dinyatakan dalam isotherm. Banyaknya adsorbat yang teradsorp pada permukaan adsorben dipengaruhi oleh jenis adsorbat, sifat adsorben, suhu, dan tekanan (Slamet, 2007). Secara umum, adsorpsi dibedakan menjadi dua jenis, yaitu (Maron, 1965) :

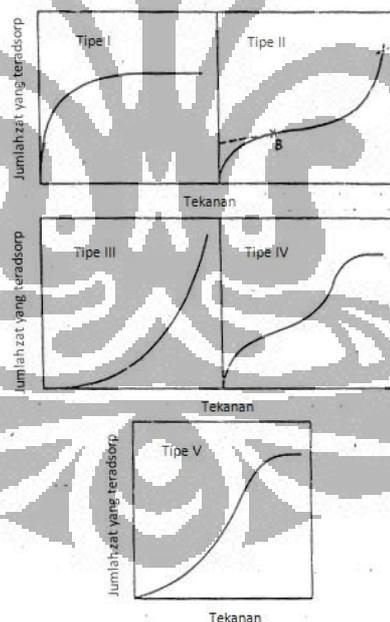
1. Adsorpsi fisika (fisorpsi) → tanpa reaksi kimia, cepat, reversible, dan dikategorikan berenergi rendah.
2. Adsorpsi kimia (kemisorpsi) → melibatkan reaksi kimia, irreversible, dan dikategorikan berenergi tinggi.

**Tabel 2.6.** Perbandingan antara Adsorpsi Fisika dan Adsorpsi Kimia (Ruthven, 1984)

<b>Adsorpsi Fisika</b>	<b>Adsorpsi Kimia</b>
Panas adsorpsi rendah (kurang dari 2-3 kali panas penguapan)	Panas adsorpsi tinggi (lebih dari 2-3 kali panas penguapan)
Non-spesifik	Sangat spesifik
Monolayer dan multilayer	Monolayer
Tidak ada disosiasi adsorbat	Ada disosiasi adsorbat
Signifikan hanya pada suhu relatif rendah	Signifikan pada rentang suhu yang tinggi

### 2.3.1 Isoterm Adsorpsi

Adsorpsi biasanya dijelaskan secara isotermal, yaitu hubungan antara jumlah substansi yang diadsorpsi oleh suatu adsorben pada tekanan atau konsentrasi kesetimbangan pada suhu konstan. Secara umum, terdapat lima tipe adsorpsi isotherm yang telah diamati pada adsorpsi gas pada padatan. Lima tipe adsorpsi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.4.

**Gambar 2.4.** Tipe Adsorpsi Isotherm (Maron, 1965)

Adsorpsi isotherm tipe I dijelaskan oleh Freundlich dan Langmuir, tipe II dan III dijelaskan oleh Brunauer, Emmett, dan Teller (BET), sedangkan tipe IV dan V diusulkan untuk substansi yang mengalami adsorpsi multilayer dan kondensasi gas pada pori dan kapiler adsorben.

### 2.3.1.1 Isoterm Adsorpsi Freundlich

Isoterm adsorpsi tipe I menunjukkan bahwa jumlah gas yang diadsorp per jumlah adsorben akan meningkat dengan cepat seiring dengan meningkatnya tekanan, kemudian akan meningkat dengan perlahan seiring dengan meningkatnya permukaan yang telah terlapisi oleh molekul gas. Hal ini dirumuskan secara matematis oleh Freundlich sebagai berikut :

$$y = kP^{\frac{1}{n}} \quad (2.7)$$

di mana  $y$  adalah massa atau volum gas yang teradsorp per satuan luas atau satuan massa adsorben,  $P$  adalah tekanan kesetimbangan adsorbat,  $k$  dan  $n$  adalah konstanta yang nilainya bergantung pada suhu dan karakteristik gas dan padatan. Namun, persamaan ini hanya dapat digunakan untuk kondisi pada tekanan rendah.

### 2.3.1.2 Isoterm Adsorpsi Langmuir

Langmuir menyatakan bahwa gas yang diadsorp oleh permukaan padatan tidak dapat membentuk sebuah lapisan lebih dari satu molekul pada arah vertikal, atau lebih jelasnya digambarkan pada Gambar 2.5 berikut :



Gambar 2.5. Model Adsorpsi Langmuir (Hwang, 2011)

Selain itu, Langmuir memvisualisasikan proses adsorpsi sebagai dua aksi yang berlawanan, yaitu kondensasi molekul dari fasa gas ke permukaan dan evaporasi molekul dari permukaan padatan kembali ke fasa gas. Pada awalnya, model adsorpsi ini dikembangkan untuk menjelaskan adsorpsi gas pada permukaan padat dari karbon aktif. Namun, sekarang penggunaan model adsorpsi ini lebih luas untuk berbagai adsorben (Suraputra, 2011). Jumlah gas yang teradsorp per satuan luas atau satuan massa adsorben,  $y$ , dinyatakan sebagai Persamaan Langmuir

$$y = k \theta = \frac{k b P}{1 + b P} = \frac{a P}{1 + b P} \quad (2.8)$$

di mana  $a = kb$ . Nilai  $a$  dan  $b$  didapatkan dari data eksperimen dan bergantung pada suhu.  $\theta$  adalah fraksi permukaan yang terlapisi oleh molekul adsorbat pada waktu tertentu dan  $P$  adalah tekanan adsorbat.

$$\frac{P}{y} = \frac{1}{a} + \left(\frac{b}{a}\right)P \quad (2.9)$$

Karena  $a$  dan  $b$  adalah suatu konstanta, maka plot antara  $\frac{P}{y}$  vs  $P$  akan menghasilkan suatu garis lurus, di mana kemiringannya sama dengan  $\frac{b}{a}$  dan intersepnya sama dengan  $\frac{1}{a}$  (Maron, 1965). Hal ini merupakan prosedur yang umum digunakan untuk menguji kecocokan model Langmuir dengan data percobaan (Agustiar, 2011).

### 2.3.1.3 Isoterm Adsorpsi Brunauer, Emmett, dan Teller (BET)

BET memperluas pendekatan persamaan Langmuir untuk adsorpsi multilayer.

$$\frac{P}{v(P^0 - P)} = \frac{1}{v_m c} + \left(\frac{c-1}{v_m c}\right) \frac{P}{P^0} \quad (2.10)$$

di mana  $v$  adalah volum,  $P$  dan  $T$  adalah tekanan dan suhu adsorbat,  $P^0$  adalah tekanan uap jenuh adsorbat pada suhu  $T$ , dan  $v_m$  adalah volum gas.

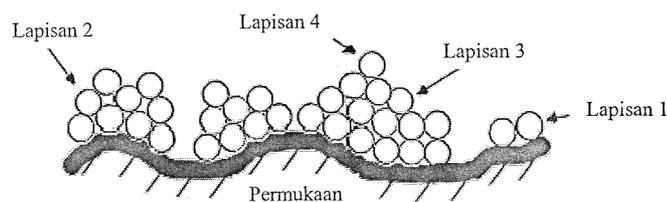
$$c = e^{(E_1 - E_L)/RT} \quad (2.11)$$

di mana  $E_1$  adalah panas adsorpsi pada lapisan pertama dan  $E_L$  adalah panas kondensasi adsorbat. Untuk isotherm adsorpsi tipe II  $E_1 > E_L$  dan tipe III  $E_1 < E_L$ .

Persamaan (2.9) dapat diuji dengan cara mengplot  $\frac{P}{v(P^0 - P)}$  vs  $\frac{P}{P^0}$  sehingga

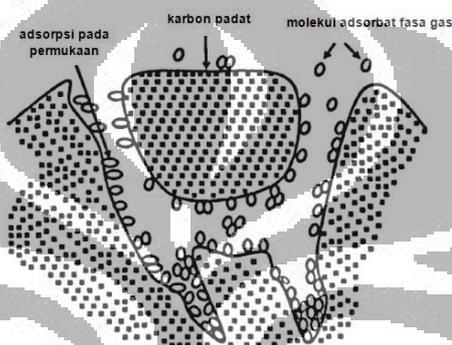
dihasilkan suatu garis lurus dengan kemiringan sama dengan  $\frac{c-1}{v_m c}$  dan intersep

sama dengan  $\frac{1}{v_m c}$  (Maron, 1965).



**Gambar 2.6.** Ilustrasi Adsorpsi Multilayer Menurut BET (Agustiar, 2011)

Pada penelitian ini, akan digunakan karbon aktif sebagai adsorben gas CO. Adapun proses adsorpsi gas pada karbon aktif diilustrasikan pada Gambar 2.7.



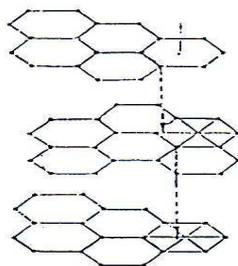
**Gambar 2.7.** Ilustrasi Adsorpsi Monolayer Gas pada Karbon Aktif (Manocha, 2003)

Pada proses adsorpsi, terjadi transfer molekul adsorbat dari fasa gas ke permukaan padatan dan difusi ke permukaan dalam pada pori adsorben. Oleh karena itu, kapasitas adsorpsi pada karbon aktif bergantung pada tipe pori dan luas permukaannya (Manocha, 2003).

#### 2.4 Adsorben Karbon Aktif

Karbon aktif merupakan salah satu adsorben yang paling sering digunakan pada proses adsorpsi. Hal ini disebabkan karena karbon aktif mempunyai daya adsorpsi dan luas permukaan yang lebih baik dibandingkan adsorben lainnya. Karbon aktif yang baik haruslah memiliki luas area permukaan yang besar sehingga daya adsorpsinya juga akan besar (Pujiyanto, 2010).

Karbon aktif mempunyai bentuk yang amorf yang terdiri dari pelat-pelat datar di mana atom-atom karbonnya tersusun dan terikat secara kovalen dalam kisi heksagonal, seperti pada Gambar 2.8.

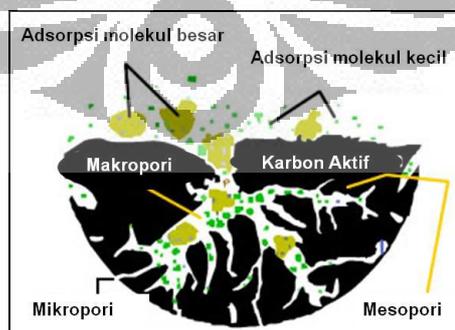


**Gambar 2.8.** Struktur Fisik Karbon Aktif (Pujiyanto, 2010)

Karbon aktif adalah senyawa karbon yang telah ditingkatkan daya adsorpsinya dengan proses aktivasi. Pada proses aktivasi ini terjadi penghilangan hidrogen, gas-gas, dan air dari permukaan karbon sehingga terjadi perubahan fisik pada permukaannya. Aktivasi ini terjadi karena terbentuknya gugus aktif akibat adanya interaksi radikal bebas pada permukaan karbon dengan atom-atom seperti oksigen dan nitrogen. Pada proses aktivasi juga terbentuk pori-pori baru karena adanya pengikisan atom karbon melalui oksidasi ataupun pemanasan. Adapun ukuran pori karbon aktif ditunjukkan pada Tabel 2.7.

**Tabel 2.7.** Ukuran Pori Karbon Aktif (Ruthven, 1984)

	Mikropori	Mesopori	Makropori
Diameter (Å)	< 20	20–500	> 500
Volume pori (cm <sup>3</sup> /g)	0,15–0,5	0,02– 0,1	0,2–0,5
Luas permukaan (cm <sup>2</sup> /g)	100–1000	10–100	0,5–2
(Densitas partikel 0,6-0,9 g/cm <sup>3</sup> ; porositas 0,4–0,6)			



**Gambar 2.9.** Struktur Pori Karbon Aktif (Setiawan, 2008)

Karbon aktif terdiri dari 87 – 97 % karbon dan sisanya berupa hidrogen, oksigen, sulfur dan nitrogen serta senyawa-senyawa lain yang terbentuk dari proses pembuatan karbon aktif. Volume pori-pori karbon aktif biasanya lebih besar dari 0,2 cm<sup>3</sup>/gram dan bahkan terkadang melebihi 1 cm<sup>3</sup>/gram. Luas permukaan internal karbon aktif yang telah diteliti umumnya lebih besar dari 500 m<sup>2</sup>/gram dan bisa mencapai 1.908 m<sup>2</sup>/gram.

Karbon aktif dapat dibuat dari berbagai macam bahan dasar yang mengandung karbon. Ada tiga kriteria bahan dasar yang dapat dibuat sebagai karbon aktif, yaitu:

- bahan dasar harus mengandung karbon
- pengotor pada bahan dasar harus dijaga seminimal mungkin

Bahan dasar yang digunakan akan memberikan pengaruh terhadap struktur permukaan pori dari karbon aktif yang dapat dilihat dari *Scanning Electron Micrographs (SEM)*. Perubahan bahan dasar juga mempunyai efek terhadap kapasitas adsorpsi dan kinetik dari karbon aktif. Bahan yang biasa dipakai sebagai bahan dasar karbon aktif antara lain batu bara, tempurung kelapa, tempurung kelapa sawit, *petrol coke*, limbah pinus, dan kayu (Pujiyanto, 2010). Pada penelitian ini, akan digunakan tempurung kelapa sawit sebagai bahan dasar pembuatan karbon aktif.

#### **2.4.1 Karbon Aktif Tempurung Kelapa Sawit**

Bahan baku yang dapat digunakan untuk pembuatan karbon aktif berbeda-beda sesuai dengan aplikasi yang diinginkan. Bahan baku konvensional yang paling sering digunakan adalah kayu, batubara, lignit, tempurung kelapa, gambut, dan lain-lain, seperti yang terdapat pada Tabel 2.8.

**Tabel 2.8.** Karakteristik Berbagai Bahan Baku untuk Pembuatan Karbon Aktif (Manocha, 2003)

<b>Bahan Baku</b>	<b>Karbon (%)</b>	<b>Bahan Volatil (%)</b>	<b>Densitas (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Abu (%)</b>	<b>Tekstur Karbon Aktif</b>	<b>Aplikasi</b>
Kayu lunak	40-45	55-60	0,4-0,5	0,3-1,1	lunak, volum pori besar	adsorpsi larutan
Kayu	40-42	55-60	0,55-0,8	0,3-1,2	lunak, volum pori besar	adsorpsi larutan
Lignin	35-40	58-60	0,3-0,4	-	lunak, volum pori besar	adsorpsi larutan
Tempurung kelapa	40-45	55-60	1,4	0,5-0,6	keras, volum multipori besar	adsorpsi gas
Lignit	55-70	25-40	1,0-1,35	5-6	keras, volum pori kecil	penanganan limbah cair
Batu bara lunak	65-80	25-30	1,25-1,50	2,12	cukup keras, volum mikropori tidak terlalu besar	adsorpsi gas dan cairan
Batu bara petroleum	70-85	15-20	1,35	0,5-0,7	cukup keras, volum mikropori tidak terlalu besar	adsorpsi gas
Batu bara semikeras	70-75	1-15	1,45	5-15	keras, volum pori besar	adsorpsi gas
Batu bara keras	85-95	5-10	1,5-2,0	2,15	keras, volum pori besar	adsorpsi gas

Tempurung kelapa sawit memiliki beberapa alasan untuk digunakan sebagai bahan dasar karbon aktif antara lain karena kandungan karbonnya yang sangat banyak serta kemudahan bahan tersebut untuk didapatkan secara komersial (Pujiyanto, 2010). Tempurung kelapa sawit merupakan material yang mengandung lignoselulosa yang berkadar karbon tinggi (Mulia, 2007). Komposisi tempurung kelapa sawit disajikan pada Tabel 2.9.

**Tabel 2.9.** Komposisi Tempurung Kelapa Sawit (Lubis, 2008)

Komposisi	Kadar (%)
Abu	15
Hemiselulosa	24
Selulosa	40
Lignin	21

Banyaknya kandungan lignoselulosa inilah yang menjadikan tempurung kelapa sawit cocok dijadikan sebagai bahan baku untuk pembuatan karbon aktif (Mulia, 2008).

#### 2.4.2 Proses Produksi Karbon Aktif

Secara umum, proses pembuatan karbon aktif terdiri dari proses karbonisasi pirolitik bahan dasar serta proses aktivasi. Selama proses karbonisasi, komponen yang mudah menguap akan terlepas dan karbon mulai membentuk struktur pori-pori di mana proses pembentukan pori-pori ini akan ditingkatkan pada proses aktivasi. Pada proses aktivasi, terjadi pembukaan pori-pori yang masih tertutup dan peningkatan ukuran dari pori-pori kecil yang telah terbentuk (Pujiyanto, 2010).

Proses pembuatan karbon aktif dibedakan menjadi dua, yaitu metode langsung dan tidak langsung. Pada metode langsung, bahan dasar dibentuk sesuai ukuran yang diinginkan kemudian akan melalui proses karbonisasi serta aktivasi, lalu produk yang didapatkan kemudian disaring. Metode langsung ini biasa dipakai untuk karbon aktif yang berbahan dasar tempurung kelapa sawit, batu bara yang relatif padat, dan bahan dasar lainnya yang digunakan untuk membuat karbon aktif yang berbentuk serbuk atau *Powdered Activated Carbon (PAC)*. Metode tidak langsung digunakan untuk karbon aktif yang berbahan dasar batu bara muda, *peat*, serta *petrol coke*. Untuk karbon aktif dengan bahan dasar seperti ini diperlukan proses *reconstitution* dan *pretreatment* selain proses-proses pada metode langsung di atas (Pujiyanto, 2010). Secara garis besar, tahapan produksi karbon aktif adalah sebagai berikut :

## 1. Karbonisasi

Karbonisasi atau pengarangan adalah proses pembakaran yang menyebabkan terdekomposisinya bahan dan mengeluarkan pengotor seperti tar, metanol, aseton, gas hidrogen,  $\text{CH}_4$  dan unsur non karbon yang lain. Pada proses karbonisasi, tahapan untuk tiap tingkatan suhunya dapat dilihat pada Tabel 2.10.

**Tabel 2.10.** Tahapan dalam Proses Karbonisasi (Prabowo, 2009)

Suhu	Tahap
100-150°C	Penguapan $\text{H}_2\text{O}$
150°C	Mulai terbentuk $\text{CO}$ dan $\text{CO}_2$ Sisa $\text{H}_2\text{O}$ ikut terbawa
200-300°C	Pembentukan destilat $\text{CO}$ dan $\text{CO}_2$ bertambah Mulai terbentuk destilat asam asetat, asam formiat dan methanol Mulai terbentuk karbon Dekomposisi lignin, selulosa, dan hemiselulosa Mulai terbentuk mikropori Reaksi endotermik
300-400°C	Terbentuk gas $\text{CH}_4$ dan hidrogen Pembentukan mikropori berkurang diiringi pembentukan mesopori Reaksi eksotermik
310-500°C	Menghasilkan tar dalam jumlah terbanyak Lignin terurai Mesopori makin banyak, pembentukan karbon makin sempurna
500-600°C	Pemurnian karbon Kadar karbon dapat mencapai 90%

Penambahan temperatur saat karbonisasi akan membuat pembentukan karbon semakin cepat, namun tetap saja diperlukan pembatasan temperatur yaitu tidak melebihi  $1.000^\circ\text{C}$ . Hal ini disebabkan karena karbonisasi pada kondisi tersebut dapat mengakibatkan banyaknya terbentuk abu sehingga menutupi pori-pori yang berfungsi untuk mengadsorpsi, yang pada akhirnya mengakibatkan daya serap karbon aktif akan menurun (Prabowo, 2009).

## 2. Aktivasi

Pada proses produksi karbon aktif, proses aktivasi merupakan proses yang terpenting karena proses ini sangat menentukan kualitas karbon aktif yang dihasilkan, baik luas area permukaan maupun daya adsorpsinya. Pada prakteknya, karbon aktif diproduksi dengan aktivasi kimiawi atau aktivasi fisis.

- Aktivasi kimiawi digunakan untuk bahan dasar yang mengandung selulosa dan menggabungkan antara tahap karbonisasi dan tahap aktivasi. Zat kimia yang dapat mendehidrasi seperti seng (II) klorida ( $ZnCl_2$ ) atau *phosporic acid* ( $H_3PO_4$ ) ditambahkan ke bahan dasar pada temperatur yang telah dinaikkan. Produk ini kemudian dipanaskan secara pirolisis sehingga menyebabkan degradasi selulosa. Kemudian produk tersebut didinginkan dan *activating agent* kemudian diekstrak. Karbon aktif yang diproduksi dengan cara ini adalah karbon aktif serbuk dengan densitas rendah, tanpa proses *treatment* yang khusus, mempunyai proporsi pori-pori kecil yang rendah, sehingga kurang cocok digunakan pada proses penghilangan *micropollutants* dan zat-zat yang menyebabkan bau tidak sedap. Aktivasi kimiawi ini bertujuan mengurangi pembentukan pengotor dan produk samping dengan cara merendam bahan mentah (contohnya kayu) dalam senyawa aktivasi kimiawi (Pujiyanto, 2010).
- Aktivasi fisis biasa digunakan untuk memproduksi karbon aktif yang akan digunakan untuk *water treatment* dan prosesnya adalah endotermis. Proses endotermis ini melibatkan kontak antara *activating agent* berfasa gas, biasanya *steam*, walaupun  $CO_2$  dan air juga terkadang digunakan, dengan arang pada temperatur  $850 - 1.000^\circ C$ . Pada proses ini seringkali terjadi reduksi dari ukuran adsorben yang disebabkan karena kelebihan oksidasi eksternal selama gas pengoksidasi berdifusi ke dalam karbon yang tidak teraktivasi (Pujiyanto, 2010).

Perkembangan penelitian dalam pembuatan karbon aktif dalam skala laboratorium dapat dilihat pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11. Perkembangan Penelitian Pembuatan Karbon Aktif

No.	Judul Penelitian (Penulis)	Proses Pembuatan	Hasil
1.	<i>Production of activated carbon from palm oil shell: activated by superheated steam</i> (Panyawatanakit, 1997)	Tempurung kelapa sawit dikarbonisasi pada suhu 400°C selama 1 jam, kemudian diaktivasi menggunakan superheated steam pada suhu 900°C.	Surface area adalah 670,1 m <sup>2</sup> /g.
2	<i>Production of Activated Carbon from Palm-oil shell by pyrolysis and steam activation in a fixed bed reactor</i> (Vitidsant, 1999)	Pirolisis bahan baku dengan laju alir udara 0.72 ml/min selama 30 menit dengan menggunakan steam pada suhu 750°C selama 3 jam.	Surface area adalah 669,75 m <sup>2</sup> /g
3.	<i>Preparation and Examination of Activated Carbon from Date Pits Impregnated with KOH</i> (Banat, 2003)	Dengan mencampur 30 wt% KOH dan kemudian dipanaskan hingga suhu 600°C selama 2 jam.	Surface area adalah 470 m <sup>2</sup> /g.
4.	<i>Effect of Two-Stage Process on the Preparation and Characterization of Porous Carbon Composite from Rice Husk by Phosphoric Acid Activation</i> (Kennedy, 2004)	Precarbonized karbon dengan dicampur 250 g yang mengandung 85% berat H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> pada suhu 85°C selama 4 jam. Suhu yang digunakan adalah dari 700-900°C selama 1 jam lalu didinginkan.	Surface area pada suhu 900°C adalah 438,9 m <sup>2</sup> /g.
5.	<i>Activated Carbon from Bamboo - Technology Development towards Commercialisation</i> (Baksi,2006)	Dicampur asam fosfat (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ) dan Zinc Klorid (ZnCl <sub>2</sub> ) di <i>fluidised bed reactor</i> pada 900-1100°C dengan adanya steam atau CO <sub>2</sub> .	Surface area (900°C) adalah 1.250 m <sup>2</sup> /g.
6.	<i>Textural Characteristics of Activated Carbons Prepared from Oil Palm Shells Activated with ZnCl<sub>2</sub> and Pyrolysis Under Nitrogen and Carbon Dioxide</i> (Allwar, et al, 2008)	Tempurung kelapa sawit dikarbonisasi pada suhu 110°C, kemudian diaktivasi menggunakan ZnCl <sub>2</sub> pada suhu 400°C-800°C selama 3 jam melalui dua tahap pirolisis (mengalirkan gas nitrogen dan karbondioksida).	Surface area yang dihasilkan adalah 1.148,18–1.429,71 m <sup>2</sup> /g. Surface area terbaik (500°C) 1.429,71 m <sup>2</sup> /g.

Tabel 2.11. Perkembangan Penelitian Pembuatan Karbon Aktif (Lanjutan)

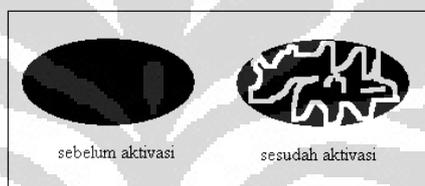
No.	Judul Penelitian (Penulis)	Proses Pembuatan	Hasil
7.	Pembuatan Karbon Aktif dari Tongkol Jagung serta Aplikasinya untuk Adsorpsi Cu, Pb dan Amonia (Prabowo, 2009)	Dikarbonisasi pada suhu 500 <sup>0</sup> C selama ± 2 jam dengan sedikit oksigen, kemudian diaktivasi menggunakan KOH pada suhu 800 <sup>0</sup> C selama 30 menit.	<i>Surface area</i> adalah 406,9 m <sup>2</sup> /g.
8.	Pembuatan Karbon Aktif dari Tongkol Jagung dan Aplikasinya dalam Pemisahan Campuran Etanol dan Air (Rahman, 2009)	Dikarbonisasi pada suhu 500 <sup>0</sup> C selama ± 2 jam dengan sedikit oksigen, kemudian diaktivasi menggunakan ZnCl <sub>2</sub> pada suhu 105 <sup>0</sup> C selama 24 jam. Dilakukan variasi karbon aktif 800µm, 500µm, dan 300µm.	Daya adsorpsi terbesar dtunjukkan oleh karbon aktif yang berukuran 300µm.
9.	<i>Nano-Tungsten Carbide Prepared from Palm Kernel Shell for Catalytic Decomposition of Hydrazine</i> (Yacob, 2009)	<i>Activating agent</i> yang digunakan divariasikan, yaitu untuk ZnCl <sub>2</sub> , H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , dan melalui proses fisika pada suhu aktivasi 800 <sup>0</sup> C.	<i>Surface area</i> terbaik (ZnCl <sub>2</sub> ) adalah 1.100 m <sup>2</sup> /g.
10.	Pembuatan Karbon Aktif Super dari Batu Bara dan Tempurung Kelapa (Pujiyanto, 2010)	Tempurung kelapa dikarbonisasi pada suhu 400 <sup>0</sup> C selama 2jam kemudian diaktivasi menggunakan KOH pada suhu 700-900 <sup>0</sup> C. Sedangkan batu bara langsung diaktivasi menggunakan KOH pada suhu 700-900 <sup>0</sup> C.	<i>Surface area</i> terbaik untuk batu bara (suhu 900 <sup>0</sup> C) adalah 1.882 m <sup>2</sup> /g, dan <i>surface area</i> terbaik untuk tempurung kelapa (suhu 700 <sup>0</sup> C) adalah 684 m <sup>2</sup> /g.

*Activating agent* yang biasa digunakan untuk menghasilkan karbon aktif dengan luas permukaan yang besar adalah H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> dan ZnCl<sub>2</sub> (Allwar, et al, 2008). Kedua bahan ini merupakan oksidator kuat yang mampu mengoksidasi dan merusak permukaan karbon aktif sehingga dapat membuka pori pada permukaan karbon aktif yang mula-mula masih tertutup serta memperbesar pori yang ada pada karbon aktif. Proses ini dapat menambah luas permukaan karbon aktif dan memperbesar kemampuan karbon aktif untuk proses adsorpsi (Rahman, 2009). Namun, penggunaan ZnCl<sub>2</sub> sebagai *activating agent* lebih ekonomis bila dibandingkan dengan H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (Allwar, et al, 2008). Dari Tabel 2.10 di atas, dapat dilihat bahwa karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa sawit yang memiliki

luas permukaan terbesar dihasilkan dari proses aktivasi menggunakan  $\text{ZnCl}_2$  sebagai *activating agent*. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan digunakan  $\text{ZnCl}_2$  sebagai *activating agent* pada suhu aktivasi  $500^\circ\text{C}$  selama tiga jam.

Masalah yang timbul jika menggunakan  $\text{H}_3\text{PO}_4$  sebagai zat kimia pendehidrasi adalah diperlukannya proses tambahan, yaitu *leaching* ion fosfat dari karbon.

Pada proses aktivasi kimia, karbon bereaksi dengan *oxidizing agent* dan menghasilkan karbon dioksida yang berdifusi pada permukaan karbon. *Amorphous carbon* yang menghalangi pori bereaksi pada tahap oksidasi awal dan sebagai hasilnya *closed pore* akan terbuka. Selanjutnya reaksi akan berlanjut dengan mengikis dinding karbon untuk membentuk pori-pori baru seperti pada Gambar 2.10.



**Gambar 2.10.** Struktur Karbon Aktif Sebelum dan Sesudah Aktivasi (Pujiyanto, 2010)

Dengan adanya pori baru pada karbon aktif, maka luas permukaan karbon aktif semakin besar sehingga daya adsorpsinya juga akan semakin besar.

#### 2.4.3 Adsorpsi Karbon Monoksida (CO) pada Karbon Aktif

Adsorpsi molekul gas pada karbon aktif didominasi oleh gaya van der Waals. Muatan listrik pada karbon aktif sangat lemah dibandingkan dengan jenis adsorben lainnya, atau dengan kata lain gradien muatan positif dan negatif pada permukaan karbon aktif sangat kecil. Dengan demikian, pori yang kecil dan luas permukaan yang besar pada karbon aktif memegang peranan penting dalam proses adsorpsi gas. Oleh karena itu, gugus pada permukaan karbon aktif memiliki pengaruh yang cukup signifikan pada adsorpsi gas. Pada molekul polar yang mempunyai momen dipol yang kuat, adsorpsi dapat terjadi dengan adanya gugus oksigen pada permukaan (Yang, 2003).

Pada penelitian ini, digunakan gas CO sebagai adsorbat dan karbon aktif sebagai adsorben. CO adalah molekul polar, maka proses adsorpsi dapat terjadi

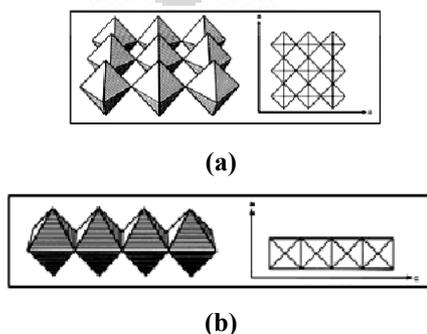
pada gugus oksigen pada permukaan karbon aktif. Selain itu, diameter gas CO (1,13 Å) lebih kecil daripada ukuran mikropori dari karbon aktif (< 20 Å), sehingga gas CO dapat teradsorpsi dengan baik pada karbon aktif.

## 2.5 Titanium Dioksida (TiO<sub>2</sub>)

TiO<sub>2</sub> termasuk salah satu jenis oksida logam yang merupakan katalis semikonduktor pada proses fotokatalisis. Di antara sekian banyak jenis semikonduktor, hingga saat ini TiO<sub>2</sub> memegang peranan utama dalam proses fotokatalisis karena berbagai kelebihan sifat kimia fisiknya, seperti aktivitas fotokatalisisnya tinggi, stabil, dan tidak beracun. Secara komersil, TiO<sub>2</sub> juga memiliki kelebihan karena mudah didapat dan diproduksi dalam jumlah besar. Hal ini dapat dibandingkan dengan oksida logam lainnya seperti ZnO yang aktivitasnya berkurang seiring dengan berjalannya waktu, CdS yang beracun, ataupun Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang daya oksidasinya lemah. Adapun kelebihan TiO<sub>2</sub> dibandingkan bahan semikonduktor lainnya antara lain :

1. Secara umum memiliki aktivitas fotokatalisis yang lebih tinggi daripada fotokatalis lain, seperti ZnO dan CdS
2. Tidak beracun dan tidak larut dalam kondisi eksperimen
3. Bersifat inert dalam reaksi
4. Mempunyai sifat stabil terhadap cahaya (fotostabil)
5. Mampu menyerap dengan baik cahaya ultraviolet
6. Memiliki kemampuan oksidasi yang tinggi
7. Relatif murah jika digunakan dalam jumlah besar.

Ada tiga jenis struktur kristal TiO<sub>2</sub>, yaitu anatase, rutile, dan brookite. Perspektif struktur kristal anatase dan rutile ditunjukkan pada Gambar 2.11.



**Gambar 2.11.** Perspektif Struktur Kristal (a) Anatase dan (b) Rutile (Alfat, 2009)

Anatase merupakan bentuk alotrofik yang paling aktif dibandingkan bentuk lainnya. Secara termodinamika, bentuk anatase lebih stabil dan pembentukannya secara kinetik lebih baik pada suhu rendah. Suhu rendah ini dapat menjelaskan luas permukaan yang tinggi untuk adsorpsi dan untuk katalis (Gondang, 2010).

## 2.6 Preparasi Karbon Aktif Terimpregnasi TiO<sub>2</sub>

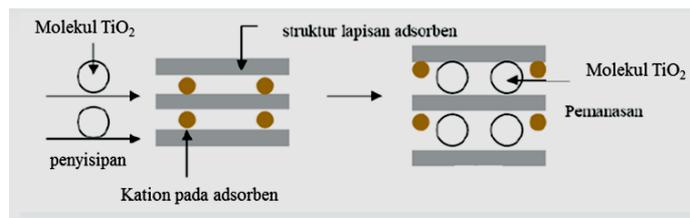
Pada penelitian ini, TiO<sub>2</sub> akan diimpregnasi pada penyangga. Secara umum, manfaat penggunaan adsorben sebagai penyangga katalis adalah :

1. Meningkatkan kemampuan adsorpsi katalis. Apabila kemampuan adsorpsi meningkat, maka kinetika katalitik juga akan meningkat.
2. Luas permukaan katalis menjadi lebih besar dan katalis menjadi lebih aktif karena adsorben dapat mendispersikan katalis.

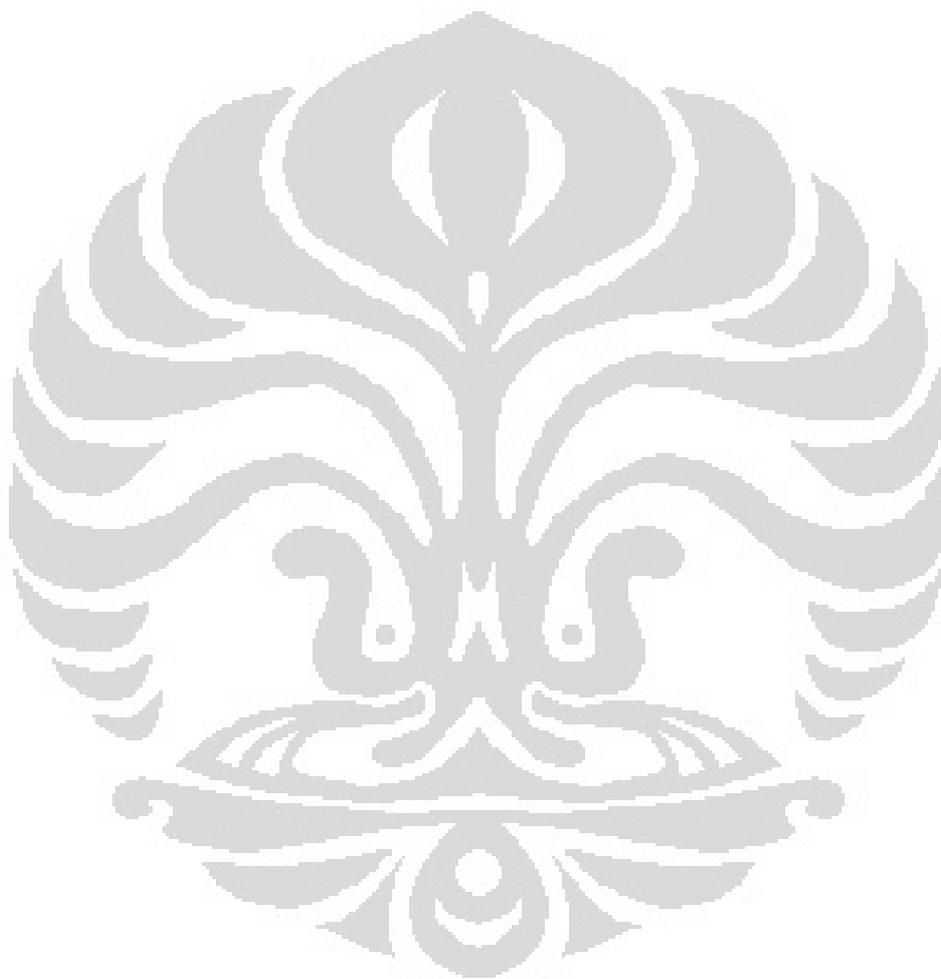
Pada penelitian ini, metode impregnasi dipilih karena metode ini lebih mudah dilakukan. Impregnasi adalah salah satu metode untuk mendispersikan komponen aktif ke permukaan penyangga. Impregnasi ini dapat meningkatkan luas permukaan spesifik penyangga, dalam hal ini adalah karbon aktif. Semakin tinggi daya adsorpsi adsorben, maka laju adsorpsi gas CO juga akan meningkat (Suraputra, 2011).

Menyisipnya TiO<sub>2</sub> dalam ruang antarlapis karbon aktif terjadi pada saat dilakukannya pengadukan dengan sonikator. Pengadukan ini bertujuan untuk mencampur rata serbuk TiO<sub>2</sub> dengan karbon aktif hingga keduanya homogen. Molekul TiO<sub>2</sub> yang telah menyisip akan menggeser kation-kation yang ada pada ruang antarlapis karbon aktif. Kation pada antarlapis karbon aktif umumnya tidak kuat terikat sehingga sangat mudah digeser oleh molekul TiO<sub>2</sub>.

Setelah homogen, struktur lapisan karbon aktif yang terbentuk setelah menyisipnya molekul TiO<sub>2</sub> masih rapuh, sehingga media perlu dipanaskan. Proses pemanasan ini selain bertujuan untuk menstabilkan struktur lapisan karbon aktif dan menghilangkan molekul air dalam karbon aktif. Pemanasan dilakukan pada suhu 100°C selama dua jam. Melalui pemanasan, molekul air yang juga menempati ruang antarlapis karbon aktif akan hilang. Dengan demikian volume ruang antarlapis karbon aktif setelah proses penyisipan TiO<sub>2</sub> akan bertambah besar.



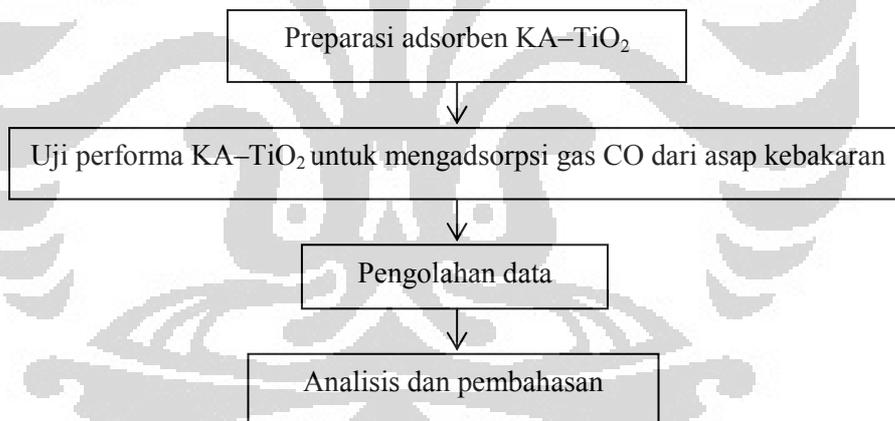
**Gambar 2.12.** Skema Proses Impregnasi  $\text{TiO}_2$  ke dalam Karbon Aktif (Basuki, 2007)



## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dibagi menjadi dua tahap, yaitu tahap preparasi adsorben KA-TiO<sub>2</sub> dan tahap uji performa KA-TiO<sub>2</sub> dalam mengadsorpsi gas CO dari asap kebakaran (Pamungkas, 2010). Preparasi adsorben KA-TiO<sub>2</sub> terdiri atas dua tahap, yaitu tahap pembuatan karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa sawit dan tahap impregnasi TiO<sub>2</sub> ke dalam karbon aktif (Suraputra, 2011). Pembuatan karbon aktif mengacu pada penelitian Pujiyanto yang menggunakan tempurung kelapa. Adapun prototipe ruang uji yang akan digunakan dalam penelitian ini menggunakan ruang uji yang telah dibuat oleh peneliti terdahulu (Pamungkas, 2011). Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.

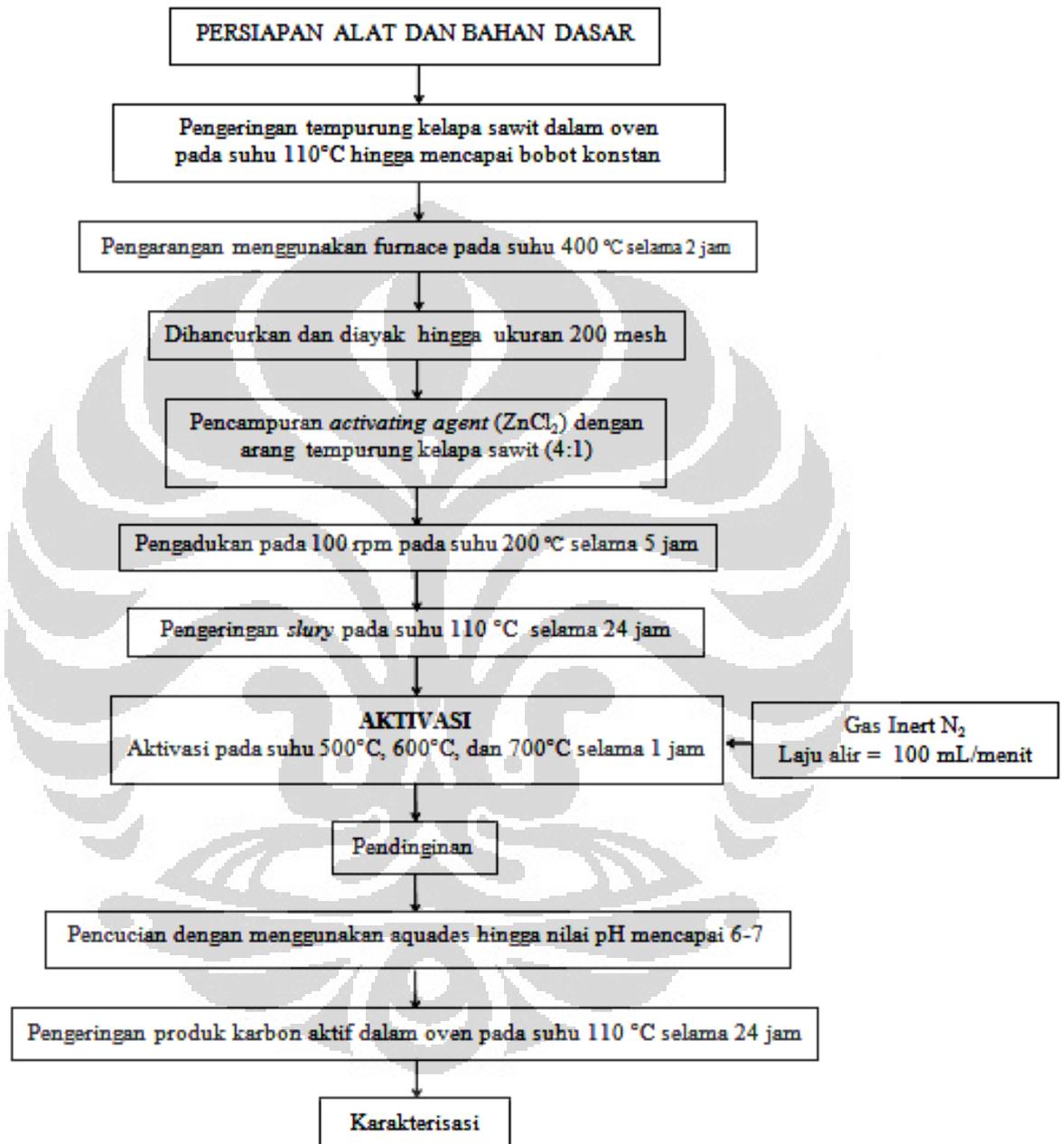


Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

#### 3.1.1 Diagram Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa Sawit

Pada penelitian terdahulu, Pujiyanto telah membuat karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa dengan *activating agent* KOH dan variasi suhu aktivasi 700°C, 800°C, dan 900°C. Pada penelitian ini, akan dibuat karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa sawit dengan *activating agent* ZnCl<sub>2</sub> dan variasi suhu

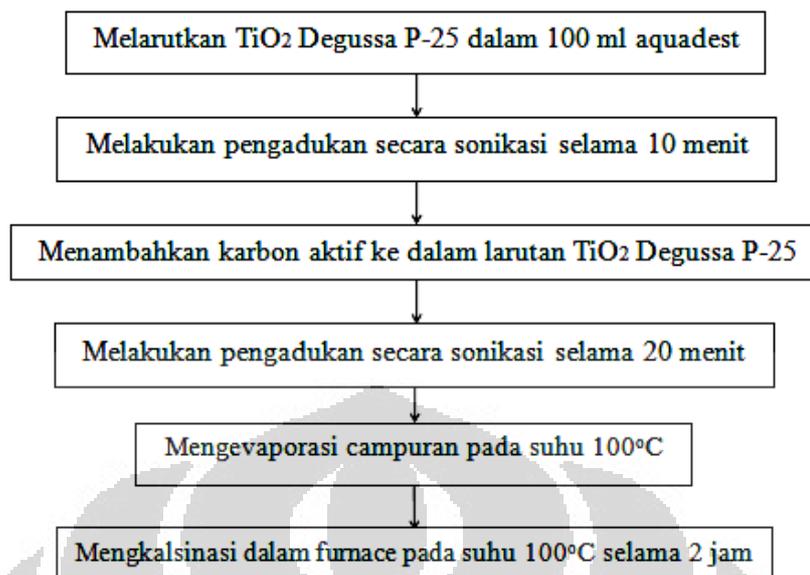
aktivasi 500°C, 600 °C, dan 700 °C untuk menghasilkan karbon aktif dengan luas permukaan yang lebih tinggi. Diagram alir pembuatan karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa sawit ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Diagram Alir Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa Sawit

### 3.1.2 Diagram Alir Preparasi Adsorben Karbon Aktif Terimpregnasi TiO<sub>2</sub>

Diagram alir preparasi adsorben karbon aktif terimpregnasi TiO<sub>2</sub> ditunjukkan pada Gambar 3.3.



**Gambar 3.3.** Diagram Alir Preparasi Adsorben Karbon Aktif Terimpregnasi TiO<sub>2</sub>  
(Suraputra, 2011)

## 3.2 Peralatan Penelitian

### 3.2.1 Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa Sawit

Peralatan yang digunakan dalam pembuatan karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa sawit adalah sebagai berikut :

1. Peralatan penggiling (alu dan mortar)
2. Ayakan ukuran 200 *mesh*
3. Spatula atau sendok
4. Cawan Porselen
5. Pengaduk Kaca
6. Kaca Arloji
7. Cawan petri
8. Beaker *Glass* 250 mL dan 1000 mL
9. Timbangan analitik
10. Reaktor aktivasi yang dilengkapi dengan pengontrol suhu dan laju alir
11. Tabung gas N<sub>2</sub>
12. *Furnace*
13. *Oven* Mermert
14. *Magnetic stirrer* dan *Hot Plate - Stirrer*

### 3.2.2 Preparasi Adsorben Karbon Aktif Terimpregnasi TiO<sub>2</sub>

Peralatan yang digunakan dalam preparasi adsorben karbon aktif terimpregnasi TiO<sub>2</sub> adalah sebagai berikut :

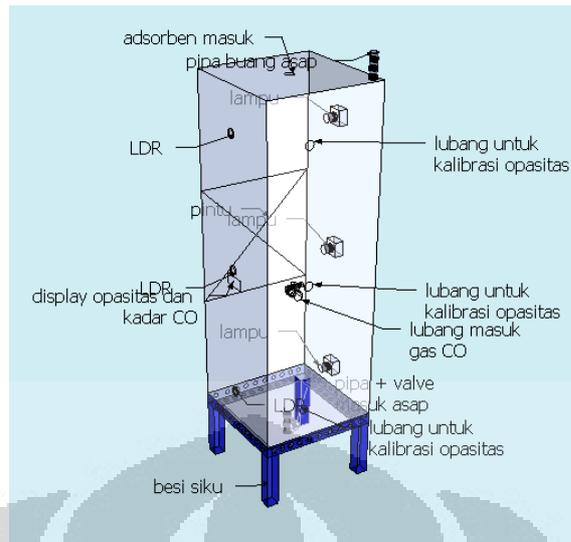
1. Gelas ukur
2. Gelas beaker 50 mL dan 100 mL
3. Alat ultrasonikasi
4. *Hot plate*
5. *Furnace*

### 3.2.3 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran

Peralatan yang digunakan untuk uji adsorpsi gas CO dan penjernihan asap kebakaran adalah sebagai berikut :

1. Wadah dan ruang uji pembakaran
2. *Stopwatch*
3. *Sprayer* adsorben
4. Neraca digital
5. *CO analyzer*
6. Opasitimeter

Ruang uji kinerja adsorben karbon aktif – TiO<sub>2</sub> memiliki ukuran 40 cm × 40 cm × 120 cm dengan bahan akrilik. Pada bagian tengah samping kiri ruang uji terdapat pintu berukuran 40 cm × 40 cm yang bisa dibuka untuk membersihkan dinding dan dasar akrilik dari sisa adsorben yang disemprotkan ke dalam ruang uji. Bagian atas ruang uji terdapat lubang untuk asap keluar dan lubang untuk menyemprotkan adsorben. Bagian bawah ruang uji terdapat lubang untuk memasukkan asap yang dihasilkan dari wadah pembakaran. Ruang uji dibuat kedap udara dan dilakukan uji kebocoran agar tidak ada asap yang keluar selama proses adsorpsi berlangsung. Adapun visualisasi ruang uji dapat dilihat pada Gambar 3.4.



**Gambar 3.4.** Prototipe Ruang Uji (Suraputra, 2011)

### 3.3 Bahan Penelitian

#### 3.3.1 Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa Sawit

Bahan yang digunakan dalam pembuatan dan aktivasi karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa adalah sebagai berikut :

1. Tempurung kelapa sawit tua
2. Larutan  $ZnCl_2$  65%. Larutan ini digunakan sebagai *activating agent*.
3. Aquadest
4. Gas Nitrogen
5. Indikator pH

#### 3.3.2 Preparasi Adsorben Karbon Aktif Terimpregnasi $TiO_2$

Bahan yang digunakan dalam preparasi adsorben karbon aktif terimpregnasi  $TiO_2$  adalah sebagai berikut :

1. Karbon aktif yang telah dipreparasi
2. Serbuk  $TiO_2$  komersial Degussa P-25 (79,23% anatase, 20,77% rutile)
3. Aquadest

#### 3.3.3 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran

Bahan yang digunakan untuk uji adsorpsi gas CO dan penjernihan asap kebakaran dalam ruang uji adalah sebagai berikut :

1. Adsorben karbon aktif dan karbon aktif terimpregnasi  $\text{TiO}_2$
2. Serbuk kayu, kertas, dan potongan kabel
3. Minyak tanah
4. Lap
5. *Stopwatch*

### 3.4 Prosedur Penelitian

#### 3.4.1 Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa Sawit

Pembuatan karbon aktif dilakukan sebagai berikut :

- 1) Preparasi bahan baku
  - a. Mencuci tempurung kelapa sawit dengan air untuk menghilangkan pengotor
  - b. Tempurung kelapa sawit dihancurkan hingga menjadi bagian kecil-kecil
  - c. Mengeringkan tempurung kelapa sawit dalam oven pada suhu  $110^\circ\text{C}$  hingga mencapai bobot konstan
- 2) Pengarangan/karbonisasi
  - a. Pengarangan tempurung kelapa sawit menggunakan *furnace* pada suhu  $400^\circ\text{C}$  selama 2 jam
  - b. Arang tempurung kelapa sawit dihancurkan dan diayak menggunakan penyaring mesh hingga mencapai ukuran 200 mesh.
- 3) Aktivasi
  - Aktivasi kimia, dengan prosedur sebagai berikut :
    - a. Sebanyak 100 gram arang yang didapatkan dari proses karbonisasi dicampur dengan *activating* berupa larutan  $\text{ZnCl}_2$  65% (persen massa) dengan perbandingan 1:4.
    - b. Campuran tersebut diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada 100 rpm suhu  $200^\circ\text{C}$  selama 5 jam.
    - c. *Slurry* dikeringkan menggunakan oven pada suhu  $110^\circ\text{C}$  selama 24 jam.
  - Aktivasi dengan metode pemanasan (pirolisis) tanpa penambahan *activating agent*, dengan prosedur sebagai berikut :

Campuran dialirkan gas  $N_2$  dengan laju alir 100 mL/menit. Sebelum digunakan, reaktor harus diperiksa untuk memastikan bahwa oksigen telah dikeluarkan dari reaktor tersebut. Lalu, campuran yang berisi arang dan *activating agent* dipanaskan sehingga tercapai suhu aktivasi selama 1 jam dengan proses kenaikan suhu bertahap. Suhu aktivasi divariasikan, yaitu  $500^\circ\text{C}$ ,  $600^\circ\text{C}$ , dan  $700^\circ\text{C}$ .

#### 4) Pendinginan

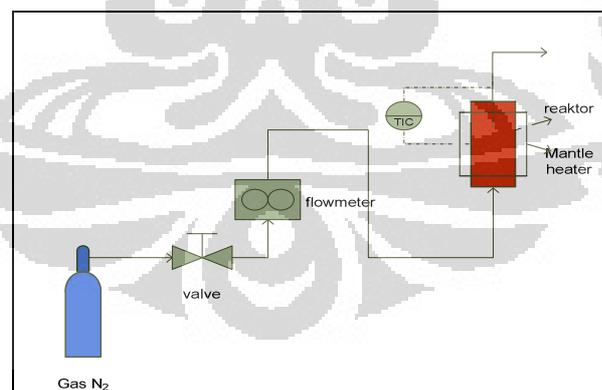
Setelah proses aktivasi dilakukan, sampel karbon aktif yang diperoleh didinginkan dengan tetap mengalirkan  $N_2$ . Sampel tersebut masih terdapat di dalam reaktor dimana pemanas dalam keadaan mati.

#### 5) Pencucian

Setelah didinginkan, sampel dicuci dengan menggunakan air distilasi hangat hingga pH mencapai 6–7. Nilai pH diketahui dengan cara mengukur pH filtrat menggunakan kertas indikator pH.

#### 6) Pengeringan Sampel

Setelah melalui proses di atas, sampel dikeringkan dalam oven pada suhu  $110^\circ\text{C}$  selama 24 jam. Sampel karbon aktif yang didapatkan kemudian disimpan di dalam desikator untuk menjaga agar karbon aktif tetap kering.



**Gambar 3.5.** Reaktor untuk Aktivasi

### 3.4.2 Preparasi Adsorben Karbon Aktif Terimpregnasi $TiO_2$

Preparasi adsorben karbon aktif terimpregnasi  $TiO_2$  dilakukan sebagai berikut:

1. Sejumlah  $\text{TiO}_2$  Degussa P-25 dilarutkan dalam 100 ml air demin dan diaduk secara sonikasi selama 10 menit.
2. Larutan  $\text{TiO}_2$  dicampurkan dengan karbon aktif dengan perbandingan karbon aktif: $\text{TiO}_2$  Degussa P-25 adalah 80:20) dan dilanjutkan dengan sonikasi selama 20 menit.
3. Mengevaporasikan campuran karbon aktif- $\text{TiO}_2$  hingga tidak mengandung air.
4. Adsorben yang terbentuk kemudian dimasukkan ke dalam *furnace* untuk dikalsinasi pada suhu  $100^\circ\text{C}$  selama 2 jam. Kalsinasi pada suhu  $100^\circ\text{C}$  dilakukan untuk mendispersikan  $\text{TiO}_2$  secara merata pada seluruh permukaan karbon aktif. Adsorben yang telah terbentuk dibiarkan hingga suhunya kembali normal, diayak kemudian ditimbang.

### **3.4.3 Karakterisasi Adsorben**

#### **3.4.3.1 Karakterisasi Luas Permukaan (BET)**

Karakterisasi yang dilakukan adalah pengukuran luas permukaan karbon aktif dan karbon aktif –  $\text{TiO}_2$ , serta karbon yang belum diaktivasi sebagai pembanding. Selain itu, karakterisasi ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh keberadaan  $\text{TiO}_2$  dalam karbon aktif. Karakterisasi BET ini dilakukan di Laboratorium Preparasi dan Karakterisasi Katalis, Lemigas, Jakarta.

#### **3.4.3.2 Karakterisasi Komposisi (EDX)**

Karakterisasi EDS, EDX, atau EDAX (*Energy Dispersive X-Ray*) dilakukan untuk mengidentifikasi komposisi karbon aktif yang telah diaktivasi dan karbon aktif –  $\text{TiO}_2$ . Karakterisasi ini dilakukan di Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok.

#### **3.4.4 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran**

Bahan yang akan dibakar (kertas, serbuk kayu, kabel, dan arang) ditimbang masing-masing 20 gram kemudian dibakar dalam wadah pembakaran. Jenis pembakaran yang dilakukan adalah *smoldering* yaitu terbentuk bara sehingga asap terbentuk. Uji adsorpsi gas CO dilakukan tanpa adsorben, dengan karbon aktif, dan karbon aktif- $\text{TiO}_2$ .

- 1) Uji adsorpsi tanpa adsorben
  - a. Membakar bahan dan memasukkan asapnya ke dalam ruang uji.
  - b. Memompa asap sampai opasitas dalam ruang uji 0 atau asap jenuh dalam ruang uji.
  - c. Mencatat nilai opasitas dan konsentrasi CO awal.
  - d. Mencatat nilai opasitas tiap menit sampai didapat nilai t10 dan konsentrasi CO tiap menit selama 20 menit.
- 2) Uji adsorpsi dengan adsorben
  - a. Membakar bahan dan memasukkan asapnya ke dalam ruang uji.
  - b. Memompa asap sampai asap jenuh dalam ruang uji.
  - c. Mencatat nilai opasitas dan konsentrasi CO awal.
  - d. Menyemprotkan adsorben pada bagian atas ruang uji.
  - e. Mencatat nilai opasitas tiap menit sampai didapat nilai t10 dan konsentrasi CO tiap menit selama 20 menit.
  - f. Mengeluarkan asap dan membersihkan ruang uji.
  - g. Melakukan hal yang sama untuk variasi massa adsorben.
- 3) Prosedur pembuatan asap
  - a. Memasukkan bahan yang akan dibakar ke dalam wadah pembakaran.
  - b. Membakar bahan selama 2 menit lalu menutup wadah pembakaran.
  - c. Memasukkan selang yang berada pada bagian atas wadah pembakaran ke dalam bagian samping ruang uji.
  - d. Memompa asap pembakaran selama 5 menit dan sampai opasitas dalam ruang uji 0 atau asap jenuh.
  - e. Menutup valve dan mengeluarkan selang dari ruang uji.

### 3.5 Variabel Penelitian

#### 1. Suhu Aktivasi Pembuatan Karbon Aktif

Suhu aktivasi yang digunakan dalam pembuatan karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa sawit adalah 500°C, 600°C, dan 700°C. Variasi ini dilakukan untuk mengetahui suhu aktivasi yang dapat menghasilkan karbon aktif dengan luas yang besar.

## 2. Jenis Adsorben

Jenis adsorben yang digunakan adalah karbon aktif dan karbon aktif terimpregnasi  $\text{TiO}_2$ .

## 3. Massa Adsorben

Massa adsorben yang disemprotkan ke dalam ruang uji adalah 1 gram, 3 gram, dan 5 gram. Hal ini dilakukan untuk mengetahui massa yang paling optimum untuk proses adsorpsi gas CO dan penjernihan asap kebakaran.

### 3.6 Data Penelitian

Data yang diperoleh dalam penelitian ini adalah:

1. Luas permukaan karbon yang belum diaktivasi, karbon aktif, dan karbon aktif –  $\text{TiO}_2$  dengan BET.
2. Penurunan opasitas dan nilai t10 tanpa adsorben, dengan karbon aktif, dan karbon aktif –  $\text{TiO}_2$ .
3. Penurunan konsentrasi gas CO tanpa adsorben, dengan karbon aktif, dan karbon aktif –  $\text{TiO}_2$ .

### 3.7 Pengolahan Data Penelitian

Banyaknya gas CO yang teradsorpsi dapat dihitung berdasarkan selisih konsentrasi gas CO awal dengan konsentrasi gas CO pada menit 20. Kapasitas adsorpsi ini merupakan fungsi dari waktu dan ketinggian ruangan.

$$\% \text{ Adsorpsi} = \frac{\text{CO}_0 - \text{CO}_{20}}{\text{CO}_0} \times 100\% \quad (3.1)$$

dengan

$\text{CO}_0$  = konsentrasi gas CO awal (ppm)

$\text{CO}_{20}$  = konsentrasi gas CO pada menit 20

Untuk efektivitas adsorben karbon aktif –  $\text{TiO}_2$  dalam menjernihkan asap kebakaran dilihat dari nilai rasio t10, di mana t10 adalah waktu yang dibutuhkan untuk dapat membuat opasitas sepuluh kali lebih jernih dibandingkan kondisi awal (menit nol). Nilai rasio t10 diperoleh dari perbandingan nilai kondisi t10 tanpa adsorben dengan kondisi t10 dengan adsorben.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok. Proses penelitian ini meliputi tahap pembuatan karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa sawit, tahap impregnasi TiO<sub>2</sub> ke karbon aktif, dan tahap adsorpsi gas CO dan tahap penjernihan asap kebakaran dalam ruang uji. Tahap karakterisasi luas permukaan menggunakan metode analisa BET dilakukan di Laboratorium Preparasi dan Karakterisasi Katalis, Lemigas, Jakarta dan karakterisasi komposisi dengan EDS dilakukan di Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI, Depok.

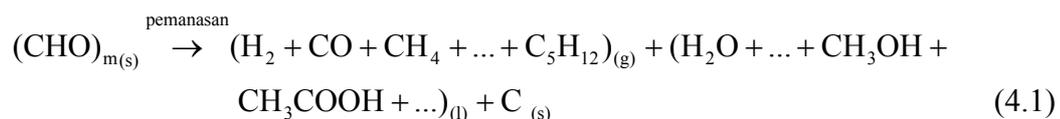
### 4.1 Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa Sawit

Pembuatan karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa sawit dimulai dengan pembersihan dan pencucian tempurung kelapa sawit dari pengotornya dengan menggunakan air, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 24 jam. Hasil proses ini ditunjukkan pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1.** Tempurung Kelapa Sawit yang Telah Dikeringkan

Setelah itu, dilakukan proses karbonisasi yang dilakukan di dalam *furnace* pada suhu 400°C selama 2 jam. Reaksi pada proses karbonisasi ini sebagai berikut (*The Japan Institute of Energy, 2008*):



Dari proses karbonisasi ini, didapatkan arang tempurung kelapa sawit yang dapat dilihat pada Gambar 4.2, dan *yield* arang dari proses karbonisasi dapat dilihat pada Tabel 4.1.



**Gambar 4.2.** (a) Proses Karbonisasi Menggunakan *Furnace* dan (b) Hasil Karbonisasi dari Tempurung Kelapa Sawit

**Tabel 4.1.** *Yield* Proses Karbonisasi Tempurung Kelapa Sawit

Massa Awal (gram)	Massa Akhir (gram)	Massa Kehilangan (gram)	Kehilangan Massa (%)	<i>Yield</i> Arang (%)
1000	275	725	72,5	27,5

Dari proses karbonisasi, didapatkan hasil rata-rata arang tempurung kelapa sawit yang terbentuk adalah sebesar 27,50% dari massa awal tempurung kelapa sawit yang dikarbonisasi dalam *furnace*. Hasil tersebut (27,50%) berbeda dengan persentase karbon pada tempurung kelapa sawit secara teoritis, yaitu 18,29% (Vitidsant, 1999). Hal ini menandakan bahwa pada proses ini air dan material mudah menguap belum diuapkan secara sempurna.

Setelah proses karbonisasi, dilanjutkan dengan proses penghalusan arang dan pengayakan hingga ukuran 200 mesh. Hasil preparasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.3.



**Gambar 4.3.** Arang Tempurung Kelapa Sawit Setelah Dihaluskan dan Diayak

Serbuk arang tempurung kelapa sawit selanjutnya diaktivasi secara kimia, yaitu dengan cara penambahan *activating agent* pada bahan baku pembuatan karbon aktif. *Activating agent* yang digunakan adalah  $ZnCl_2$  65% dengan perbandingan *activating agent*/bahan dasar karbon aktif adalah 4/1. Aktivasi dengan *activating agent*  $ZnCl_2$  tidak menimbulkan reaksi antara *activating agent*

dengan karbon.  $ZnCl_2$  yang bersifat asam bereaksi dengan gugus fungsi yang mengandung oksigen. Oleh karena itu, material lignoselulosa yang mengandung oksigen lebih banyak umumnya menggunakan *activating agent*  $ZnCl_2$  (Lydia, 2012). Campuran diaduk dan dipanaskan menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu  $200^\circ C$  hingga terbentuk slurry, dan dilakukan pengeringan dengan *oven* sehingga terbentuk padatan untuk menguapkan kandungan air yang masih tersisa. Persentase penguapan air dan asil akhir padatan arang tempurung kelapa sawit yang telah terimpregnasi  $ZnCl_2$  ditunjukkan pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.4.



**Gambar 4.4.** Arang Tempurung Kelapa Sawit Setelah Proses Aktivasi Kimia

**Tabel 4.2.** Persentase Penguapan Air pada Hasil Pencampuran Larutan *Activating Agent* dengan Arang Tempurung Kelapa Sawit

Massa $ZnCl_2$ (gram)	Massa Bahan Baku (gram)	Massa Larutan $ZnCl_2$ (gram)	Massa Bahan Baku + Larutan $ZnCl_2$ (gram)	Massa Padatan yang terbentuk (gram)	Air yang Menguap (%)
400	100	615,4	738	468	36,6 %

Dari Tabel 4.2 terlihat persentase air yang menguap setelah proses pemanasan belum sempurna, yaitu hanya 36,6%. Hal ini terjadi karena proses pembentukan padatan yang kurang sempurna pada saat proses pengeringan di dalam *oven*.

Proses selanjutnya adalah aktivasi karbon aktif yang dilakukan dengan pemanasan pada suhu tinggi tanpa kehadiran oksigen bebas, yaitu dengan dialiri gas  $N_2$  ke dalam reaktor selama proses aktivasi. Tidak adanya oksigen bebas dapat mencegah kerusakan struktur pori bahan baku yang akan mengakibatkan terjadi *losses* (hilangnya bahan baku) pada hasil akhir karbon aktif. Peralatan yang digunakan untuk proses aktivasi ditunjukkan pada Gambar 4.5.



**Gambar 4.5.** Reaktor Aktivasi untuk Proses Aktivasi

Proses aktivasi dilakukan pada suhu 500°C, 600°C, dan 700°C. Variasi suhu ini mengacu pada penelitian mengenai pembuatan karbon aktif dari sekam padi dengan *activating agent* ZnCl<sub>2</sub>, suhu aktivasi optimum dengan *activating agent* ZnCl<sub>2</sub> tidak boleh melebihi suhu 700°C (Kalderis et al., 2008). Suhu aktivasi optimum dengan *activating agent* ZnCl<sub>2</sub> tidak boleh lebih dari 700°C dikarenakan *boiling point* dari ZnCl<sub>2</sub> ialah 732°C sehingga jika digunakan suhu aktivasi yang lebih tinggi lagi, maka besar kemungkinan aktivasi tidak berjalan dengan baik karena *activating agent* yang digunakan telah menguap. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan variasi suhu aktivasi dibawah 700°C agar proses aktivasi dapat berjalan optimum. Tabel 4.3 menggambarkan hasil pengamatan kondisi proses aktivasi.

**Tabel 4.3.** Kondisi dan Hasil Pengamatan Proses Aktivasi Sampel

Suhu (°C)	Waktu (menit)	Kondisi dan Hasil Pengamatan
0	5	Dialirkan gas N <sub>2</sub> pada reaktor
0 - 100	15	Menaikkan suhu secara bertahap hingga mencapai suhu 100°C
100 - 200	15	Uap air mulai keluar dari <i>tube</i> kuarsa
200 - 300	15	Keluar asap putih sedikit kecoklatan dan uap air
300 - 400	10	Keluar asap putih dan uap air berkurang
400 - 500	15	Timbul asap dan sedikit letupan pada selang keluaran
500 - 600	10	Uap air dan asap putih mulai menghilang
600 - 700	10	Pemanasan stabil dengan tidak adanya uap air dan asap putih
700	60	Pemanasan stabil
700 - 30	60	Dilakukan penurunan suhu dengan tetap dialirkan gas N <sub>2</sub>
30		Setelah mencapai 30 °C reaktor dimatikan

Keluaran asap putih mulai menghilang saat pemanasan pada suhu 600°C. Hal ini dapat menandakan bahwa proses aktivasi pada bahan baku mulai berjalan. Persentase kehilangan massa pada saat aktivasi ditunjukkan pada Tabel 4.4.

**Tabel 4.4.** Persentase Kehilangan *Activating agent*/Bahan Baku pada Aktivasi

Suhu (°C)	Massa Awal (gram)	Massa Akhir (gram)	Massa Hilang (gram)	Kehilangan Massa (%)
500	107	98	9	8,41
600	105	95,5	9,5	9,05
700	107	95	12	11,21

Dari hasil pemanasan padatan campuran, terjadi kehilangan massa. Besarnya persentase kehilangan massa ini merupakan representasi dari kadar air (pengotor) yang terdapat pada padatan campuran *activating agent*/bahan baku dan senyawa-senyawa volatil yang masih ada sehingga dapat hilang selama proses pemanasan.

Pada proses aktivasi ini, *activating agent* membentuk pori-pori baru (melubangi permukaan karbon) serta menghasilkan karbon dioksida yang berdifusi pada permukaan karbon. *Amorphous* karbon yang menghalangi pori bereaksi pada tahap oksidasi awal dan sebagai hasilnya *closed pore* akan terbuka dan tercipta pori-pori baru. Pori-pori yang terbentuk inilah yang dapat memperbesar luas permukaan karbon aktif.

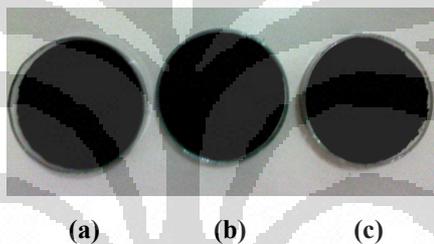
Persentase kehilangan massa cenderung menurun seiring dengan menurunnya suhu aktivasi. Hal ini disebabkan pada suhu aktivasi 400°C, hanya molekul volatil ringan yang keluar dari pori-pori karbon. Seiring dengan meningkatnya suhu aktivasi, molekul volatil yang lebih berat akan ikut teruapkan/keluar sehingga kehilangan massa menjadi lebih besar (Allwar, 2008).

Produk karbon aktif yang telah diaktivasi selanjutnya dicuci dengan menggunakan aquadest untuk menghilangkan sisa-sisa ion  $Cl^-$  yang masih terdapat pada produk karbon aktif setelah aktivasi. Pencucian dilakukan dengan cara mengaduk campuran produk karbon aktif dan aquadest. Proses pencucian dihentikan apabila pH telah di atas 6. Pengukuran pH dilakukan dengan cara mencelupkan kertas indikator pH ke dalam filtrat.

Setelah itu, produk dikeringkan pada oven pada suhu 110°C selama 24 jam untuk menguapkan airnya. Kehilangan massa pada saat pencucian dan pengeringan dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan produk karbon aktif hasil penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.6.

**Tabel 4.5.** Proses Pencucian Karbon Aktif dari Hasil Aktivasi

Suhu (°C)	Massa Sebelum Pencucian (gram)	Massa Setelah Pencucian (gram)	Massa Setelah Pengeringan (gram)	Yield Karbon Aktif (%)
500	98	63,20	24,874	25,38
600	95,50	56,40	22,602	23,67
700	95	52,03	16,211	17,06



**Gambar 4.6.** Produk Karbon Aktif pada Suhu Aktivasi (a) 500°C, (b) 600°C, dan (c) 700°C

Dapat dilihat pada Tabel 4.6 bahwa persentase *yield* karbon aktif cenderung menurun seiring dengan meningkatnya suhu aktivasi dari 500°C ke 700°C. Hal ini dapat disebabkan pemanasan yang semakin meningkat dapat menyebabkan kerusakan karbon pada arang tempurung kelapa sawit dan semakin meningkatnya molekul volatil yang hilang sehingga persentase *yield* karbon aktif cenderung menurun.

#### 4.2 Preparasi Adsorben Karbon Aktif Terimpregnasi TiO<sub>2</sub>

Pada tahap ini, karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa sawit yang memiliki luas permukaan paling besar diimpregnasi dengan TiO<sub>2</sub> untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi adsorben tersebut.

Karbon aktif dicampurkan dengan larutan TiO<sub>2</sub> Degussa P-25 yang sebelumnya telah diaduk secara sonikasi selama 10 menit. Perbandingan karbon

aktif:TiO<sub>2</sub> adalah 80:20. Setelah itu, campuran ini disonikasi selama 20 menit. Campuran yang terbentuk dievaporasi untuk menghilangkan kandungan airnya, kemudian dimasukkan ke dalam *furnace* untuk dikalsinasi pada suhu 100°C selama 2 jam. Kalsinasi pada suhu 100°C dilakukan untuk mendispersikan TiO<sub>2</sub> secara merata pada seluruh permukaan karbon aktif dan menguapkan kandungan air yang masih tersisa. Kalsinasi untuk karbon aktif tidak boleh melebihi suhu 150°C karena struktur karbon aktif akan rusak (Basuki, 2007). Adsorben yang telah terbentuk dibiarkan hingga suhunya kembali normal, diayak, kemudian ditimbang. Penurunan massa campuran pada proses impregnasi TiO<sub>2</sub> dapat dilihat pada Tabel 4.6.

**Tabel 4.6.** Perubahan Massa pada Proses Impregnasi TiO<sub>2</sub> ke Karbon Aktif

Karbon Aktif (gram)	TiO <sub>2</sub> (gram)	KA + TiO <sub>2</sub> (gram)	Sebelum Evaporasi (gram)	Setelah Evaporasi (gram)	Sebelum Kalsinasi (gram)	Setelah Kalsinasi (gram)
8	2	10	35,956	21,957	21,957	10,977

Pada tabel 4.6 dapat dilihat bahwa terjadi sedikit penambahan massa kering campuran karbon aktif – TiO<sub>2</sub>. Hal ini disebabkan proses pemanasan yang belum sempurna sehingga masih ada molekul air yang terperangkap dalam ruang pori karbon aktif.

### 4.3 Karakterisasi Adsorben

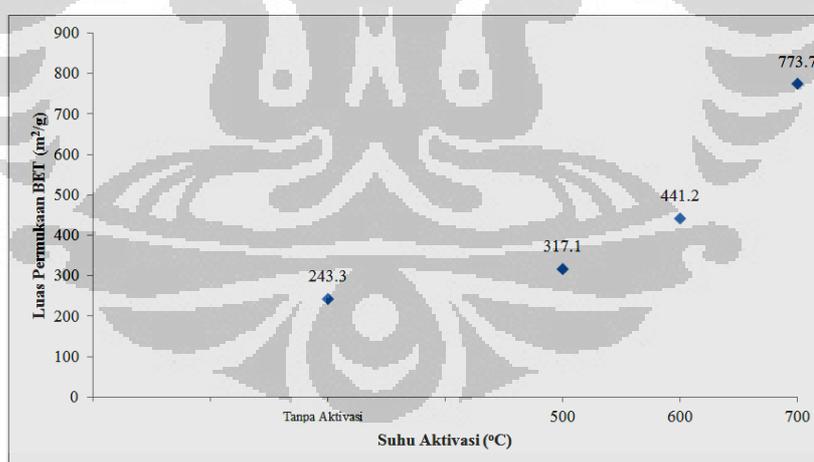
#### 4.3.1 Karakterisasi Luas Permukaan Adsorben

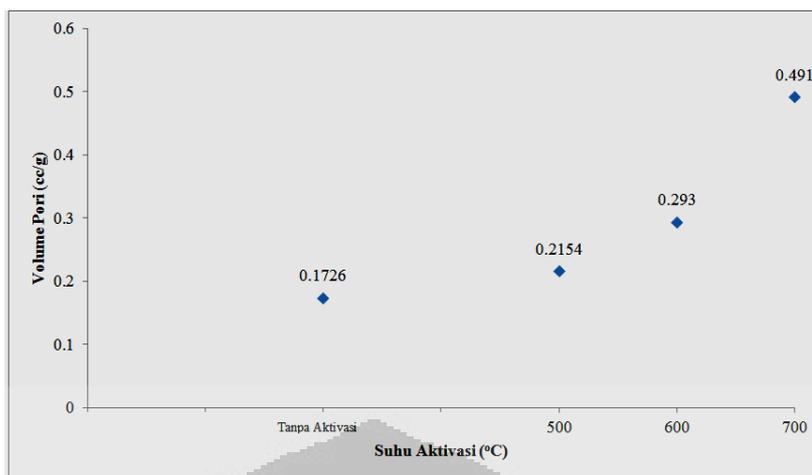
Karakterisasi pengukuran luas permukaan (BET), volume pori, dan diameter pori karbon ditunjukkan pada Tabel 4.7.

**Tabel 4.7.** Hasil Karakterisasi Luas Permukaan (BET) Adsorben Karbon Aktif

Suhu Aktivasi (°C)	Luas Permukaan BET (m <sup>2</sup> /gram)	Volume Pori (cc/gram)	Diameter Pori Rata-rata (Å)
Tanpa Aktivasi	243,3	0,1726	28,37
500	317,1	0,2154	27,18
600	441,2	0,2930	26,56
700	773,7	0,4910	25,39

Dari Tabel 4.7 dapat dilihat bahwa luas permukaan karbon aktif meningkat dari 317,1 m<sup>2</sup>/gram menjadi 773,7 m<sup>2</sup>/gram seiring dengan meningkatnya suhu aktivasi dari 500°C menjadi 700°C. Hal ini disebabkan pada suhu aktivasi 500°C, hanya molekul volatil ringan yang keluar dari pori-pori karbon sehingga pembentukan pori-pori baru lebih sedikit atau masih cukup banyak pori yang belum terbuka. Seiring dengan meningkatnya suhu aktivasi, molekul volatil yang lebih berat akan ikut teruapkan/keluar dari pori sehingga akan membentuk pori-pori baru dan meningkatkan luas permukaan dan volume pori, serta menurunkan diameter pori rata-rata.

**Gambar 4.7.** Pengaruh Suhu Aktivasi terhadap Luas Permukaan Karbon Aktif



**Gambar 4.8.** Pengaruh Suhu Aktivasi terhadap Volume Pori Karbon Aktif



**Gambar 4.9.** Pengaruh Suhu Aktivasi terhadap Diameter Pori Rata-rata Karbon Aktif

Karbon Aktif dengan luas permukaan paling besar diimpregnasi  $\text{TiO}_2$  untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi adsorben tersebut. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa luas permukaan (BET) KA –  $\text{TiO}_2$  meningkat menjadi  $782,6 \text{ m}^2/\text{gram}$ , volume pori meningkat menjadi  $0,4902 \text{ cc}/\text{gram}$  dan diameter pori rata-rata menurun menjadi  $25,29 \text{ \AA}$ .

Peningkatan luas permukaan karbon aktif setelah penambahan  $\text{TiO}_2$  tidak terlalu signifikan. Peningkatan luas permukaan ini disebabkan oleh adanya pemanasan pada saat pengintegrasian  $\text{TiO}_2$  ke karbon aktif sehingga ada molekul volatil yang keluar dari pori dan membentuk pori baru.

### 4.3.2 Karakterisasi Komposisi Adsorben

Karakterisasi yang dilakukan adalah Energi Dispersif X-Ray (EDS atau EDX) untuk mengidentifikasi komposisi unsur dari karbon aktif dan karbon aktif terintegrasi TiO<sub>2</sub>. Hasil yang diperoleh dari karakterisasi ini menunjukkan bahwa terdapat kandungan Ti sebesar 31,92%. Hal ini menunjukkan bahwa molekul TiO<sub>2</sub> telah menyisip ke dalam struktur pori karbon aktif.

### 4.4 Uji Adsorpsi Gas Karbon Monoksida dan Penjernihan Asap Kebakaran

Telah dilakukan uji adsorpsi gas CO dan penjernihan asap kebakaran menggunakan adsorben karbon aktif dan karbon aktif diimpregnasi TiO<sub>2</sub>.

Rentang nilai tingkat kejernihan asap adalah 0 - 100, dengan 0 adalah saat cahaya dari *light source* (sumber cahaya) tidak ada yang diterima oleh *light-measuring device* (perangkat penerima) atau ruang uji dalam keadaan gelap. Sedangkan 100 adalah saat cahaya dari *light source* diterima semua oleh *light-measuring device* atau ruang uji dalam keadaan jernih.

Uji adsorpsi asap dilakukan pada tiga titik berbeda pada ruang uji. Titik 1 adalah titik pengujian atas yang berjarak ±105 cm dari dasar ruang uji. Titik 2 adalah titik tengah, yaitu pada ketinggian ±60 cm dari dasar ruang uji. Titik 3 adalah titik pengujian paling bawah, yaitu berjarak ±15 cm dari bawah ruang uji. Sedangkan letak sensor *gas analyzer* berada di sekitar titik 2 pengujian opasitas, menempel pada dinding, berjarak ±60 cm. Uji adsorpsi dilakukan dengan menggunakan arang karbon yang belum diaktivasi, karbon aktif, dan karbon aktif yang telah diimpregnasi TiO<sub>2</sub>, dengan variasi massa masing-masing adsorben adalah 1 gram, 3 gram, dan 5 gram. Hal ini dilakukan untuk menemukan kondisi terbaik adsorben dalam menjernihkan asap dan adsorpsi gas CO.



**Gambar 4.10.** Ruang Uji Saat Pengukuran Opasitas dengan Opasitimeter



**Gambar 4.11.** Wadah Pembakaran dan Pompa



**Gambar 4.12.** Pengukuran konsentrasi CO dengan *Gas Analyzer*

Uji adsorpsi asap dilakukan sampai ke tiga titik menunjukkan persen opasitas sebesar 10. Nilai 10% di ambil karena pada saat opasitas tersebut, seseorang telah dapat melihat menembus kepulan asap (Yadav et. al., 2007). Sedangkan uji adsorpsi CO dilakukan selama 20 menit dengan rentang pengambilan kandungan CO setiap 1 menit.

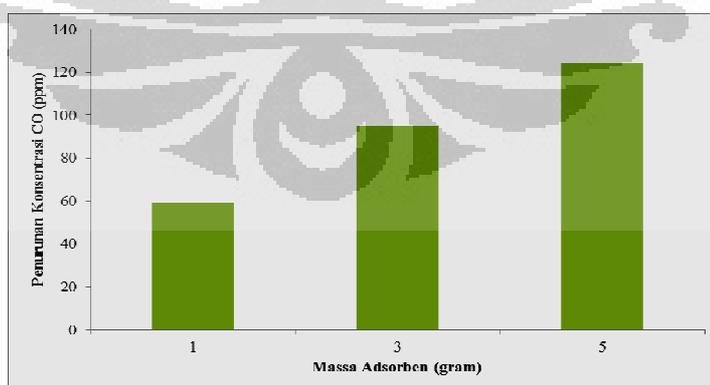
Sebelum dilakukan uji adsorpsi, asap didiamkan di dalam ruang uji tanpa perlakuan apapun. Waktu yang dibutuhkan asap untuk mencapai opasitas 10 untuk masing-masing titik adalah seperti yang diperlihatkan pada Lampiran. Jika dibiarkan, asap akan mengalami penjernihan sendiri walaupun berada dalam ruangan tertutup. Hal ini karena asap selalu bergerak dan bertabrakan satu sama lain, sehingga mengalami koagulasi dan membuat ukuran partikelnya semakin membesar (Yadav et.al., 2007) dan jatuh ke bawah akibat gaya gravitasi. Waktu yang dibutuhkan asap untuk mencapai tingkat kejernihan sebesar 10% (t10) untuk titik 1 adalah 41 menit, titik 2 adalah 50 menit, dan titik 3 adalah 53 menit. Sedangkan untuk gas CO, terjadi penurunan konsentrasi sebesar 14 ppm hingga menit ke 20. Kecilnya penurunan konsentrasi gas CO dalam ruang uji menandakan bahwa ruang uji yang digunakan cukup baik.

#### 4.4.1 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran dengan Karbon Aktif

Adsorpsi gas CO dan penjernihan asap kebakaran dilakukan dengan variasi massa adsorben yang disemprotkan ke ruang uji, yaitu 1 gram, 3 gram, dan 5 gram. Adapun material yang dibakar untuk menghasilkan asap adalah kertas, kabel, dan sebuk kayu dengan massa masing-masing material 20 gram. Asap yang dihasilkan dari proses pembakaran ini dipompakan ke dalam ruang uji hingga opasitasnya 0 dan konsentrasi gas CO awal pada *gas analyzer* cukup stabil atau perubahan konsentrasi tidak terlalu besar. Setelah itu, adsorben disemprotkan ke ruang uji melalui lubang yang terletak di bagian atas ruang uji. Data yang diambil adalah perubahan nilai opasitas setiap menit pada 3 titik yang terdapat pada ruang uji hingga didapat nilai t10 dan penurunan konsentrasi gas CO setiap menit selama 20 menit. Nilai opasitas pada masing-masing titik dan penurunan konsentrasi gas CO dapat dilihat pada Tabel 4.8 dan Gambar 4.13.

**Tabel 4.8.** Nilai t10 Menggunakan Adsorben Karbon Aktif dengan Variasi Massa

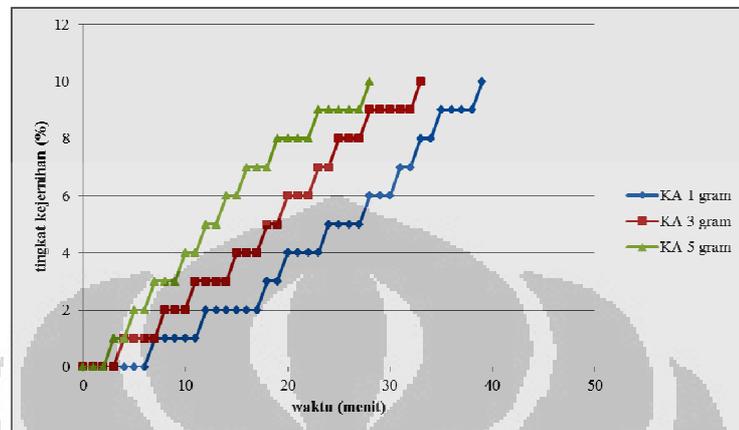
Adsorben	t10 (menit)		
	titik 1	titik 2	titik 3
KA 1 gram	38	40	42
KA 3 gram	33	36	37
KA 5 gram	28	31	32



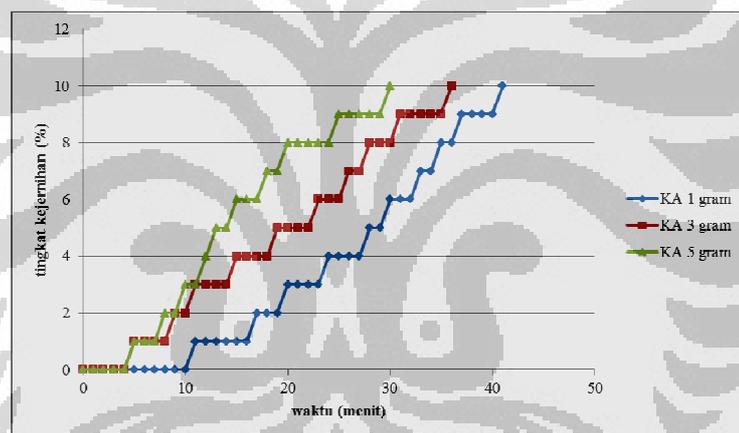
**Gambar 4.13.** Pengaruh Massa Adsorben terhadap Penurunan Konsentrasi Gas CO

Dari Tabel 4.11 dan Grafik 4.18, dapat dilihat bahwa KA dengan massa 5 gram memiliki rasio akhir atau persentasi penurunan konsentrasi CO yang paling

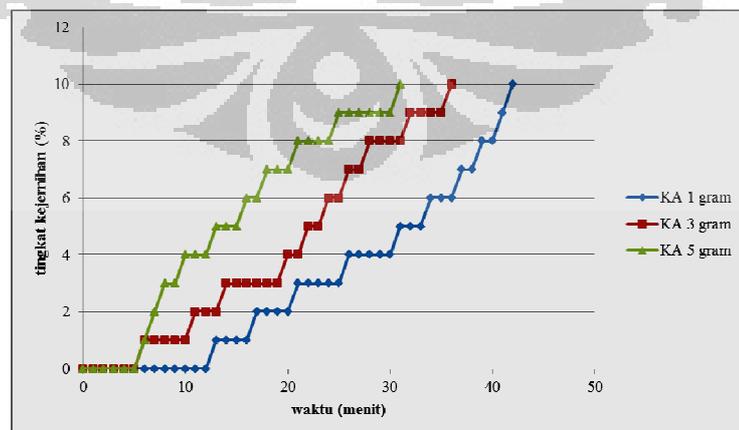
besar, yaitu sebesar 124 ppm hingga menit ke 20. Pengaruh massa adsorben yang disemprotkan ke dalam ruang uji terhadap nilai opasitas dapat dilihat pada Gambar 4.14.



(a)



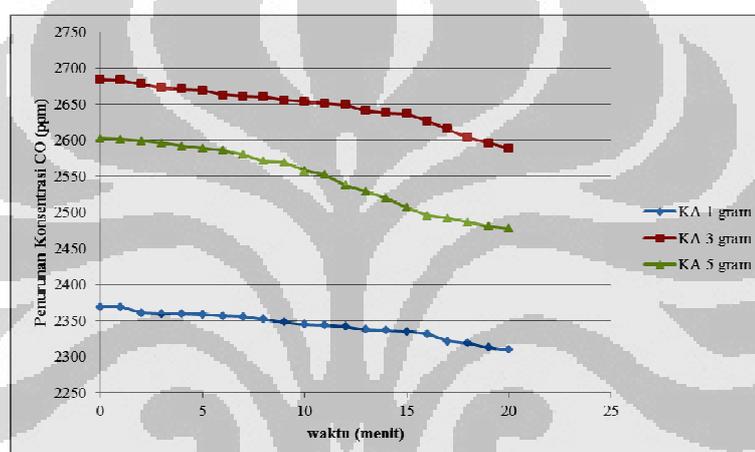
(b)



(c)

**Gambar 4.14.** Tingkat Kejernihan Asap dengan Adsorben Karbon Aktif terhadap Waktu pada (a) Titik 1, (b) Titik 2, dan (c) Titik 3

Dari Gambar 4.14 terlihat bahwa karbon aktif dengan massa yang lebih besar ( $1 \text{ gram} < 3 \text{ gram} < 5 \text{ gram}$ ) memiliki kemampuan menjernihkan asap lebih baik. Hal ini ditandai waktu yang paling cepat untuk mencapai tingkat kejernihan 10%. Hal ini disebabkan daerah kontak antara karbon aktif dengan partikel asap semakin banyak sehingga kemungkinan partikel karbon aktif yang bertabrakan dan berkoagulasi dengan partikel asap semakin banyak pula. Banyaknya partikel ini juga berarti luas permukaan yang kontak dengan asap semakin banyak. Untuk ukuran yang sama, kemampuan karbon aktif dalam menurunkan konsentrasi gas CO ditunjukkan pada Gambar 4.15.



**Gambar 4.15.** Pengaruh Waktu terhadap Penurunan Konsentrasi Gas CO dengan Variasi Massa Adsorben

Gas CO dapat diadsorpsi karena memiliki ukuran partikel yang lebih kecil dari ukuran pori karbon aktif. Ukuran partikel CO adalah  $0,113 \text{ nm}$  dan menurut hasil BET pada Tabel 4.7 diketahui bahwa karbon aktif memiliki ukuran diameter pori sebesar  $25,39 \text{ \AA}$  atau  $2,539 \text{ nm}$ . Hal ini sesuai dengan teori bahwa molekul yang dapat diadsorpsi adalah molekul yang berdiameter sama atau lebih kecil dari diameter pori adsorben.

#### 4.4.2 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran dengan Karbon Aktif Terimpregnasi $\text{TiO}_2$

Pada bagian ini, akan dibahas daya adsorpsi karbon aktif terimpregnasi  $\text{TiO}_2$  dalam menjernihkan asap berdasarkan massa adsorben yang disemprotkan ke

dalam ruang uji. Nilai  $t_{10}$  pada masing-masing titik dan penurunan konsentrasi gas CO dapat dilihat pada Tabel 4.9 dan Gambar 4.16.

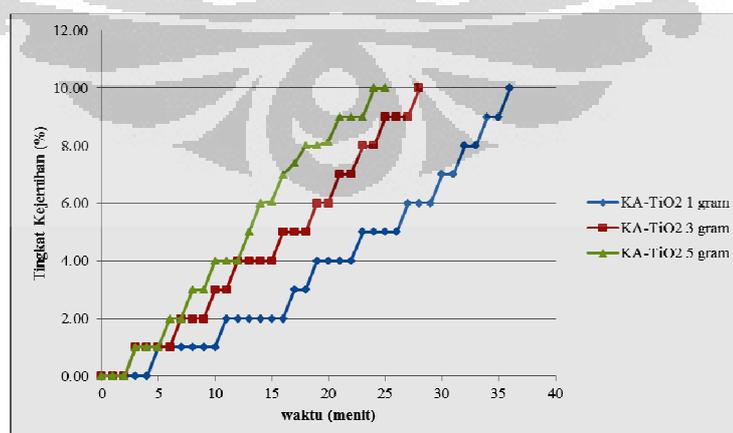
**Tabel 4.9.** Nilai  $t_{10}$  Menggunakan Adsorben Karbon Aktif –  $\text{TiO}_2$  dengan Variasi Massa

Adsorben	$t_{10}$ (menit)		
	titik 1	titik 2	titik 3
KA – $\text{TiO}_2$ 1 gram	36	37	40
KA – $\text{TiO}_2$ 3 gram	28	31	31
KA – $\text{TiO}_2$ 5 gram	25	26	26

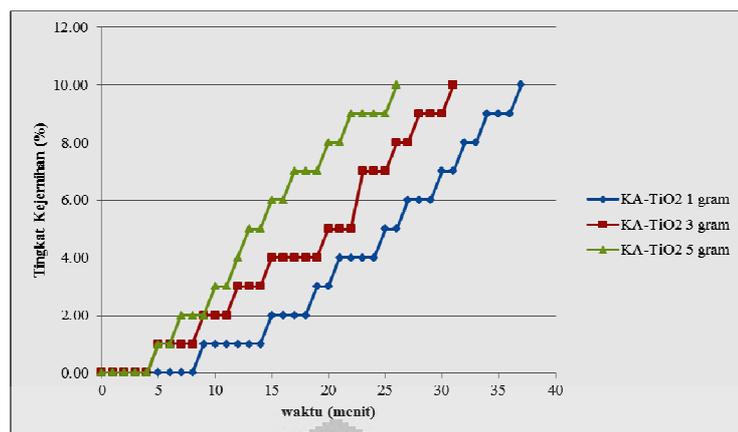


**Gambar 4.16.** Pengaruh Massa Adsorben terhadap Penurunan Konsentrasi Gas CO

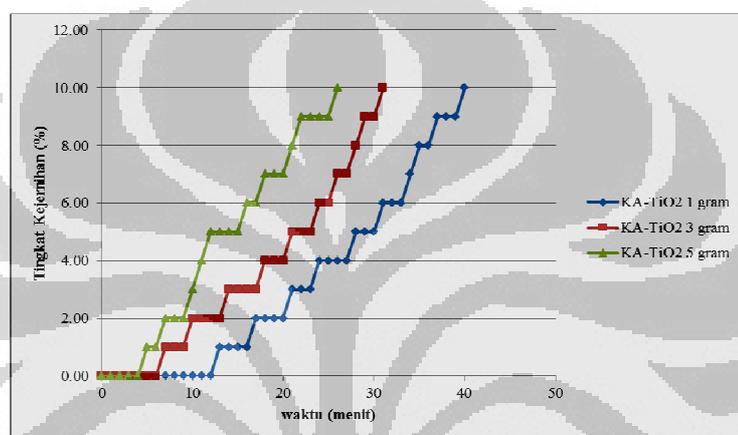
Dari Gambar 4.16, dapat dilihat bahwa KA- $\text{TiO}_2$  dengan massa 5 gram menurunkan konsentrasi gas CO lebih besar, yaitu sebesar 139 ppm hingga menit ke 20.



(a)

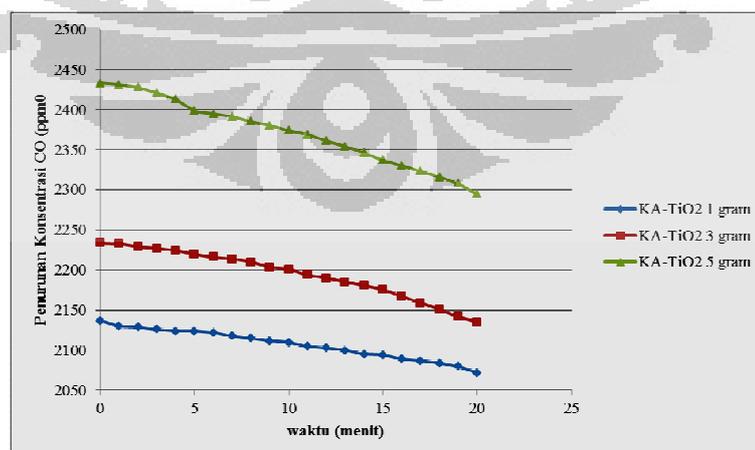


(b)



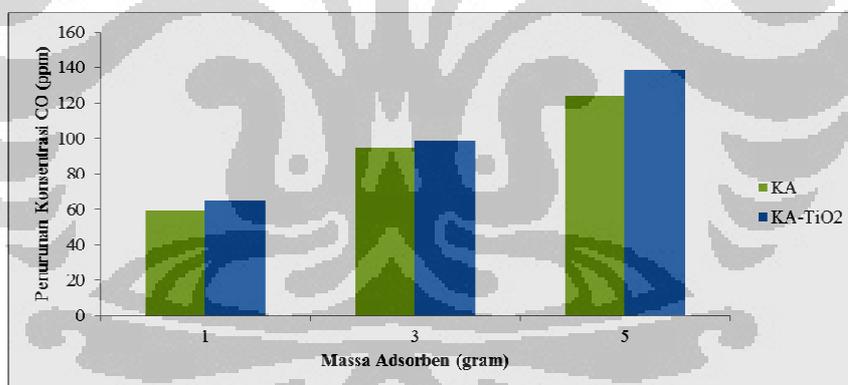
(c)

**Gambar 4.17.** Tingkat Kejernihan Asap dengan Adsorben Karbon Aktif Terimpregnasi TiO<sub>2</sub> terhadap Waktu pada (a) Titik 1, (b) Titik 2, dan (c) Titik 3



**Gambar 4.18.** Pengaruh Waktu terhadap Penurunan Konsentrasi Gas CO dengan Variasi Massa Adsorben

Dari Gambar 4.18 terlihat bahwa karbon aktif terimpregnasi  $\text{TiO}_2$  dengan massa yang lebih besar ( $1 \text{ gram} < 3 \text{ gram} < 5 \text{ gram}$ ) memiliki kemampuan menjernihkan asap lebih baik. Hal ini ditunjukkan oleh waktu yang paling cepat untuk mencapai tingkat kejernihan 10%. Penurunan waktu ini menunjukkan bahwa kehadiran  $\text{TiO}_2$  berpengaruh terhadap daya adsorpsi gas CO.  $\text{TiO}_2$  yang disisipkan pada karbon aktif ini berfungsi sebagai katalis untuk mempercepat terjadinya proses adsorpsi oleh karbon aktif. Kemampuan katalis bergantung pada permukaan zat padat berpori yang dalam hal ini adalah karbon aktif. Luas permukaan adsorben yang lebih besar dapat meningkatkan kemampuan adsorpsinya. Selain itu, volume ruang antarlapis karbon aktif setelah proses penyisipan  $\text{TiO}_2$  bertambah besar sebagai akibat dari menyisipnya molekul  $\text{TiO}_2$  dan menghilangnya molekul air pada saat pemanasan. Hal inilah yang menyebabkan kemampuan adsorpsi karbon aktif terimpregnasi  $\text{TiO}_2$  meningkat. Pengaruh massa adsorben terhadap penurunan konsentrasi gas CO secara lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 4.19.



**Gambar 4.19.** Pengaruh Massa Adsorben terhadap Penurunan Konsentrasi Gas CO dengan Variasi Jenis Adsorben

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok. Proses penelitian ini meliputi tahap pembuatan karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa sawit, tahap impregnasi TiO<sub>2</sub> ke karbon aktif, dan tahap adsorpsi gas CO dan tahap penjernihan asap kebakaran dalam ruang uji. Tahap karakterisasi luas permukaan menggunakan metode analisa BET dilakukan di Laboratorium Preparasi dan Karakterisasi Katalis, Lemigas, Jakarta dan karakterisasi komposisi dengan EDS dilakukan di Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI, Depok.

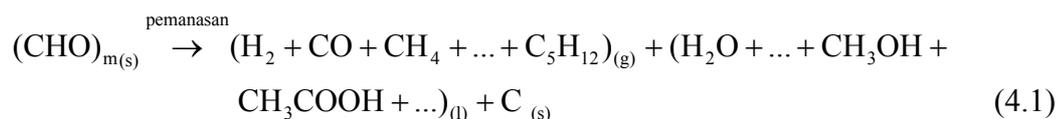
### 4.1 Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa Sawit

Pembuatan karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa sawit dimulai dengan pembersihan dan pencucian tempurung kelapa sawit dari pengotornya dengan menggunakan air, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 24 jam. Hasil proses ini ditunjukkan pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1.** Tempurung Kelapa Sawit yang Telah Dikeringkan

Setelah itu, dilakukan proses karbonisasi yang dilakukan di dalam *furnace* pada suhu 400°C selama 2 jam. Reaksi pada proses karbonisasi ini sebagai berikut (*The Japan Institute of Energy, 2008*):



Dari proses karbonisasi ini, didapatkan arang tempurung kelapa sawit yang dapat dilihat pada Gambar 4.2, dan *yield* arang dari proses karbonisasi dapat dilihat pada Tabel 4.1.



**Gambar 4.2.** (a) Proses Karbonisasi Menggunakan *Furnace* dan (b) Hasil Karbonisasi dari Tempurung Kelapa Sawit

**Tabel 4.1.** *Yield* Proses Karbonisasi Tempurung Kelapa Sawit

Massa Awal (gram)	Massa Akhir (gram)	Massa Kehilangan (gram)	Kehilangan Massa (%)	Yield Arang (%)
1000	275	725	72,5	27,5

Dari proses karbonisasi, didapatkan hasil rata-rata arang tempurung kelapa sawit yang terbentuk adalah sebesar 27,50% dari massa awal tempurung kelapa sawit yang dikarbonisasi dalam *furnace*. Hasil tersebut (27,50%) berbeda dengan persentase karbon pada tempurung kelapa sawit secara teoritis, yaitu 18,29% (Vitidsant, 1999). Hal ini menandakan bahwa pada proses ini air dan material mudah menguap belum diuapkan secara sempurna.

Setelah proses karbonisasi, dilanjutkan dengan proses penghalusan arang dan pengayakan hingga ukuran 200 mesh. Hasil preparasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.3.



**Gambar 4.3.** Arang Tempurung Kelapa Sawit Setelah Dihaluskan dan Diayak

Serbuk arang tempurung kelapa sawit selanjutnya diaktivasi secara kimia, yaitu dengan cara penambahan *activating agent* pada bahan baku pembuatan karbon aktif. *Activating agent* yang digunakan adalah  $ZnCl_2$  65% dengan perbandingan *activating agent*/bahan dasar karbon aktif adalah 4/1. Aktivasi dengan *activating agent*  $ZnCl_2$  tidak menimbulkan reaksi antara *activating agent*

dengan karbon.  $ZnCl_2$  yang bersifat asam bereaksi dengan gugus fungsi yang mengandung oksigen. Oleh karena itu, material lignoselulosa yang mengandung oksigen lebih banyak umumnya menggunakan *activating agent*  $ZnCl_2$  (Lydia, 2012). Campuran diaduk dan dipanaskan menggunakan *magnetic stirrer* pada suhu  $200^\circ C$  hingga terbentuk slurry, dan dilakukan pengeringan dengan *oven* sehingga terbentuk padatan untuk menguapkan kandungan air yang masih tersisa. Persentase penguapan air dan asil akhir padatan arang tempurung kelapa sawit yang telah terimpregnasi  $ZnCl_2$  ditunjukkan pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.4.



**Gambar 4.4.** Arang Tempurung Kelapa Sawit Setelah Proses Aktivasi Kimia

**Tabel 4.2.** Persentase Penguapan Air pada Hasil Pencampuran Larutan *Activating Agent* dengan Arang Tempurung Kelapa Sawit

Massa $ZnCl_2$ (gram)	Massa Bahan Baku (gram)	Massa Larutan $ZnCl_2$ (gram)	Massa Bahan Baku + Larutan $ZnCl_2$ (gram)	Massa Padatan yang terbentuk (gram)	Air yang Menguap (%)
400	100	615,4	738	468	36,6 %

Dari Tabel 4.2 terlihat persentase air yang menguap setelah proses pemanasan belum sempurna, yaitu hanya 36,6%. Hal ini terjadi karena proses pembentukan padatan yang kurang sempurna pada saat proses pengeringan di dalam *oven*.

Proses selanjutnya adalah aktivasi karbon aktif yang dilakukan dengan pemanasan pada suhu tinggi tanpa kehadiran oksigen bebas, yaitu dengan dialiri gas  $N_2$  ke dalam reaktor selama proses aktivasi. Tidak adanya oksigen bebas dapat mencegah kerusakan struktur pori bahan baku yang akan mengakibatkan terjadi *losses* (hilangnya bahan baku) pada hasil akhir karbon aktif. Peralatan yang digunakan untuk proses aktivasi ditunjukkan pada Gambar 4.5.



**Gambar 4.5.** Reaktor Aktivasi untuk Proses Aktivasi

Proses aktivasi dilakukan pada suhu 500°C, 600°C, dan 700°C. Variasi suhu ini mengacu pada penelitian mengenai pembuatan karbon aktif dari sekam padi dengan *activating agent* ZnCl<sub>2</sub>, suhu aktivasi optimum dengan *activating agent* ZnCl<sub>2</sub> tidak boleh melebihi suhu 700°C (Kalderis et al., 2008). Suhu aktivasi optimum dengan *activating agent* ZnCl<sub>2</sub> tidak boleh lebih dari 700°C dikarenakan *boiling point* dari ZnCl<sub>2</sub> ialah 732°C sehingga jika digunakan suhu aktivasi yang lebih tinggi lagi, maka besar kemungkinan aktivasi tidak berjalan dengan baik karena *activating agent* yang digunakan telah menguap. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan variasi suhu aktivasi dibawah 700°C agar proses aktivasi dapat berjalan optimum. Tabel 4.3 menggambarkan hasil pengamatan kondisi proses aktivasi.

**Tabel 4.3.** Kondisi dan Hasil Pengamatan Proses Aktivasi Sampel

Suhu (°C)	Waktu (menit)	Kondisi dan Hasil Pengamatan
0	5	Dialirkan gas N <sub>2</sub> pada reaktor
0 - 100	15	Menaikkan suhu secara bertahap hingga mencapai suhu 100°C
100 - 200	15	Uap air mulai keluar dari <i>tube</i> kuarsa
200 - 300	15	Keluar asap putih sedikit kecoklatan dan uap air
300 - 400	10	Keluar asap putih dan uap air berkurang
400 - 500	15	Timbul asap dan sedikit letupan pada selang keluaran
500 - 600	10	Uap air dan asap putih mulai menghilang
600 - 700	10	Pemanasan stabil dengan tidak adanya uap air dan asap putih
700	60	Pemanasan stabil
700 - 30	60	Dilakukan penurunan suhu dengan tetap dialirkan gas N <sub>2</sub>
30		Setelah mencapai 30 °C reaktor dimatikan

Keluaran asap putih mulai menghilang saat pemanasan pada suhu 600°C. Hal ini dapat menandakan bahwa proses aktivasi pada bahan baku mulai berjalan. Persentase kehilangan massa pada saat aktivasi ditunjukkan pada Tabel 4.4.

**Tabel 4.4.** Persentase Kehilangan *Activating agent*/Bahan Baku pada Aktivasi

Suhu (°C)	Massa Awal (gram)	Massa Akhir (gram)	Massa Hilang (gram)	Kehilangan Massa (%)
500	107	98	9	8,41
600	105	95,5	9,5	9,05
700	107	95	12	11,21

Dari hasil pemanasan padatan campuran, terjadi kehilangan massa. Besarnya persentase kehilangan massa ini merupakan representasi dari kadar air (pengotor) yang terdapat pada padatan campuran *activating agent*/bahan baku dan senyawa-senyawa volatil yang masih ada sehingga dapat hilang selama proses pemanasan.

Pada proses aktivasi ini, *activating agent* membentuk pori-pori baru (melubangi permukaan karbon) serta menghasilkan karbon dioksida yang berdifusi pada permukaan karbon. *Amorphous* karbon yang menghalangi pori bereaksi pada tahap oksidasi awal dan sebagai hasilnya *closed pore* akan terbuka dan tercipta pori-pori baru. Pori-pori yang terbentuk inilah yang dapat memperbesar luas permukaan karbon aktif.

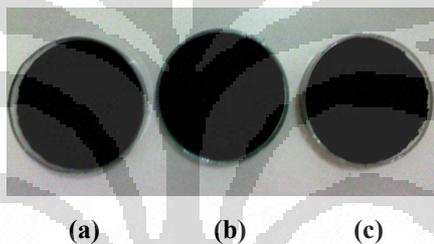
Persentase kehilangan massa cenderung menurun seiring dengan menurunnya suhu aktivasi. Hal ini disebabkan pada suhu aktivasi 400°C, hanya molekul volatil ringan yang keluar dari pori-pori karbon. Seiring dengan meningkatnya suhu aktivasi, molekul volatil yang lebih berat akan ikut teruapkan/keluar sehingga kehilangan massa menjadi lebih besar (Allwar, 2008).

Produk karbon aktif yang telah diaktivasi selanjutnya dicuci dengan menggunakan aquadest untuk menghilangkan sisa-sisa ion  $Cl^-$  yang masih terdapat pada produk karbon aktif setelah aktivasi. Pencucian dilakukan dengan cara mengaduk campuran produk karbon aktif dan aquadest. Proses pencucian dihentikan apabila pH telah di atas 6. Pengukuran pH dilakukan dengan cara mencelupkan kertas indikator pH ke dalam filtrat.

Setelah itu, produk dikeringkan pada oven pada suhu 110°C selama 24 jam untuk menguapkan airnya. Kehilangan massa pada saat pencucian dan pengeringan dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan produk karbon aktif hasil penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.6.

**Tabel 4.5.** Proses Pencucian Karbon Aktif dari Hasil Aktivasi

Suhu (°C)	Massa Sebelum Pencucian (gram)	Massa Setelah Pencucian (gram)	Massa Setelah Pengeringan (gram)	Yield Karbon Aktif (%)
500	98	63,20	24,874	25,38
600	95,50	56,40	22,602	23,67
700	95	52,03	16,211	17,06



**Gambar 4.6.** Produk Karbon Aktif pada Suhu Aktivasi (a) 500°C, (b) 600°C, dan (c) 700°C

Dapat dilihat pada Tabel 4.6 bahwa persentase *yield* karbon aktif cenderung menurun seiring dengan meningkatnya suhu aktivasi dari 500°C ke 700°C. Hal ini dapat disebabkan pemanasan yang semakin meningkat dapat menyebabkan kerusakan karbon pada arang tempurung kelapa sawit dan semakin meningkatnya molekul volatil yang hilang sehingga persentase *yield* karbon aktif cenderung menurun.

#### 4.2 Preparasi Adsorben Karbon Aktif Terimpregnasi TiO<sub>2</sub>

Pada tahap ini, karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa sawit yang memiliki luas permukaan paling besar diimpregnasi dengan TiO<sub>2</sub> untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi adsorben tersebut.

Karbon aktif dicampurkan dengan larutan TiO<sub>2</sub> Degussa P-25 yang sebelumnya telah diaduk secara sonikasi selama 10 menit. Perbandingan karbon

aktif:TiO<sub>2</sub> adalah 80:20. Setelah itu, campuran ini disonikasi selama 20 menit. Campuran yang terbentuk dievaporasi untuk menghilangkan kandungan airnya, kemudian dimasukkan ke dalam *furnace* untuk dikalsinasi pada suhu 100°C selama 2 jam. Kalsinasi pada suhu 100°C dilakukan untuk mendispersikan TiO<sub>2</sub> secara merata pada seluruh permukaan karbon aktif dan menguapkan kandungan air yang masih tersisa. Kalsinasi untuk karbon aktif tidak boleh melebihi suhu 150°C karena struktur karbon aktif akan rusak (Basuki, 2007). Adsorben yang telah terbentuk dibiarkan hingga suhunya kembali normal, diayak, kemudian ditimbang. Penurunan massa campuran pada proses impregnasi TiO<sub>2</sub> dapat dilihat pada Tabel 4.6.

**Tabel 4.6.** Perubahan Massa pada Proses Impregnasi TiO<sub>2</sub> ke Karbon Aktif

Karbon Aktif (gram)	TiO <sub>2</sub> (gram)	KA + TiO <sub>2</sub> (gram)	Sebelum Evaporasi (gram)	Setelah Evaporasi (gram)	Sebelum Kalsinasi (gram)	Setelah Kalsinasi (gram)
8	2	10	35,956	21,957	21,957	10,977

Pada tabel 4.6 dapat dilihat bahwa terjadi sedikit penambahan massa kering campuran karbon aktif – TiO<sub>2</sub>. Hal ini disebabkan proses pemanasan yang belum sempurna sehingga masih ada molekul air yang terperangkap dalam ruang pori karbon aktif.

### 4.3 Karakterisasi Adsorben

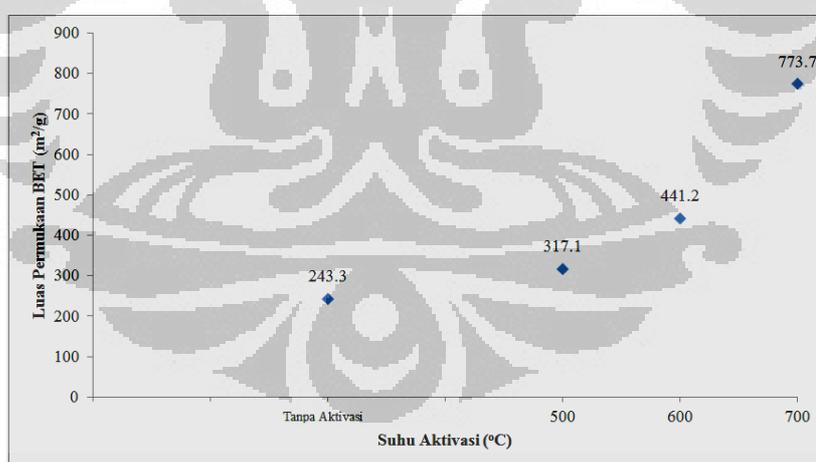
#### 4.3.1 Karakterisasi Luas Permukaan Adsorben

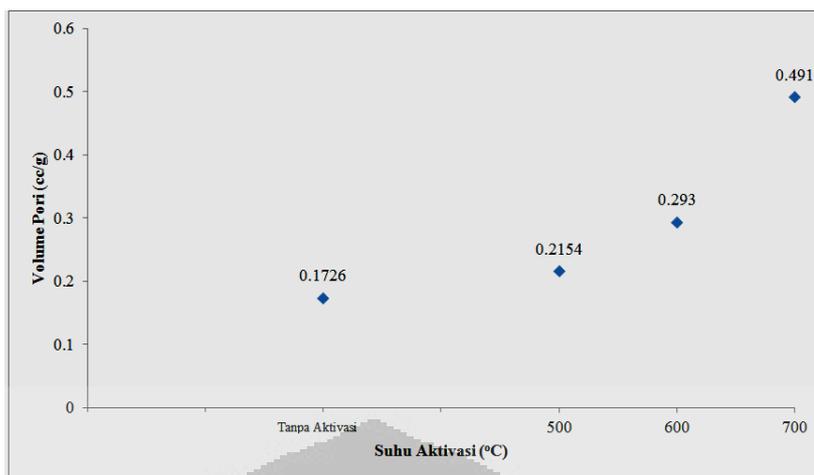
Karakterisasi pengukuran luas permukaan (BET), volume pori, dan diameter pori karbon ditunjukkan pada Tabel 4.7.

**Tabel 4.7.** Hasil Karakterisasi Luas Permukaan (BET) Adsorben Karbon Aktif

Suhu Aktivasi (°C)	Luas Permukaan BET (m <sup>2</sup> /gram)	Volume Pori (cc/gram)	Diameter Pori Rata-rata (Å)
Tanpa Aktivasi	243,3	0,1726	28,37
500	317,1	0,2154	27,18
600	441,2	0,2930	26,56
700	773,7	0,4910	25,39

Dari Tabel 4.7 dapat dilihat bahwa luas permukaan karbon aktif meningkat dari 317,1 m<sup>2</sup>/gram menjadi 773,7 m<sup>2</sup>/gram seiring dengan meningkatnya suhu aktivasi dari 500°C menjadi 700°C. Hal ini disebabkan pada suhu aktivasi 500°C, hanya molekul volatil ringan yang keluar dari pori-pori karbon sehingga pembentukan pori-pori baru lebih sedikit atau masih cukup banyak pori yang belum terbuka. Seiring dengan meningkatnya suhu aktivasi, molekul volatil yang lebih berat akan ikut teruapkan/keluar dari pori sehingga akan membentuk pori-pori baru dan meningkatkan luas permukaan dan volume pori, serta menurunkan diameter pori rata-rata.

**Gambar 4.7.** Pengaruh Suhu Aktivasi terhadap Luas Permukaan Karbon Aktif



**Gambar 4.8.** Pengaruh Suhu Aktivasi terhadap Volume Pori Karbon Aktif



**Gambar 4.9.** Pengaruh Suhu Aktivasi terhadap Diameter Pori Rata-rata Karbon Aktif

Karbon Aktif dengan luas permukaan paling besar diimpregnasi  $\text{TiO}_2$  untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi adsorben tersebut. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa luas permukaan (BET) KA –  $\text{TiO}_2$  meningkat menjadi  $782,6 \text{ m}^2/\text{gram}$ , volume pori meningkat menjadi  $0,4902 \text{ cc}/\text{gram}$  dan diameter pori rata-rata menurun menjadi  $25,29 \text{ \AA}$ .

Peningkatan luas permukaan karbon aktif setelah penambahan  $\text{TiO}_2$  tidak terlalu signifikan. Peningkatan luas permukaan ini disebabkan oleh adanya pemanasan pada saat pengintegrasian  $\text{TiO}_2$  ke karbon aktif sehingga ada molekul volatil yang keluar dari pori dan membentuk pori baru.

### 4.3.2 Karakterisasi Komposisi Adsorben

Karakterisasi yang dilakukan adalah Energi Dispersif X-Ray (EDS atau EDX) untuk mengidentifikasi komposisi unsur dari karbon aktif dan karbon aktif terintegrasi TiO<sub>2</sub>. Hasil yang diperoleh dari karakterisasi ini menunjukkan bahwa terdapat kandungan Ti sebesar 31,92%. Hal ini menunjukkan bahwa molekul TiO<sub>2</sub> telah menyisip ke dalam struktur pori karbon aktif.

### 4.4 Uji Adsorpsi Gas Karbon Monoksida dan Penjernihan Asap Kebakaran

Telah dilakukan uji adsorpsi gas CO dan penjernihan asap kebakaran menggunakan adsorben karbon aktif dan karbon aktif diimpregnasi TiO<sub>2</sub>.

Rentang nilai tingkat kejernihan asap adalah 0 - 100, dengan 0 adalah saat cahaya dari *light source* (sumber cahaya) tidak ada yang diterima oleh *light-measuring device* (perangkat penerima) atau ruang uji dalam keadaan gelap. Sedangkan 100 adalah saat cahaya dari *light source* diterima semua oleh *light-measuring device* atau ruang uji dalam keadaan jernih.

Uji adsorpsi asap dilakukan pada tiga titik berbeda pada ruang uji. Titik 1 adalah titik pengujian atas yang berjarak ±105 cm dari dasar ruang uji. Titik 2 adalah titik tengah, yaitu pada ketinggian ±60 cm dari dasar ruang uji. Titik 3 adalah titik pengujian paling bawah, yaitu berjarak ±15 cm dari bawah ruang uji. Sedangkan letak sensor *gas analyzer* berada di sekitar titik 2 pengujian opasitas, menempel pada dinding, berjarak ±60 cm. Uji adsorpsi dilakukan dengan menggunakan arang karbon yang belum diaktivasi, karbon aktif, dan karbon aktif yang telah diimpregnasi TiO<sub>2</sub>, dengan variasi massa masing-masing adsorben adalah 1 gram, 3 gram, dan 5 gram. Hal ini dilakukan untuk menemukan kondisi terbaik adsorben dalam menjernihkan asap dan adsorpsi gas CO.



**Gambar 4.10.** Ruang Uji Saat Pengukuran Opasitas dengan Opasitimeter



**Gambar 4.11.** Wadah Pembakaran dan Pompa



**Gambar 4.12.** Pengukuran konsentrasi CO dengan *Gas Analyzer*

Uji adsorpsi asap dilakukan sampai ke tiga titik menunjukkan persen opasitas sebesar 10. Nilai 10% di ambil karena pada saat opasitas tersebut, seseorang telah dapat melihat menembus kepulan asap (Yadav et. al., 2007). Sedangkan uji adsorpsi CO dilakukan selama 20 menit dengan rentang pengambilan kandungan CO setiap 1 menit.

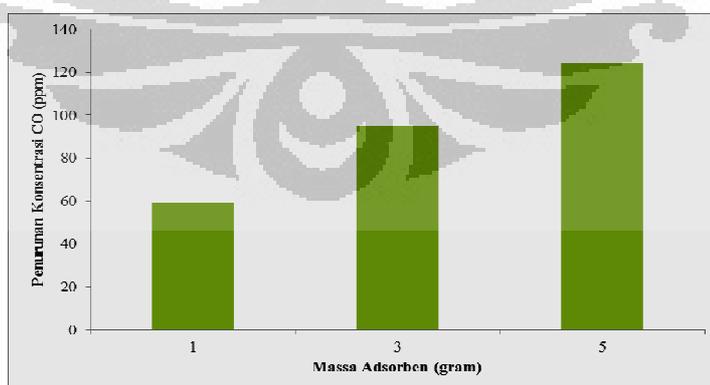
Sebelum dilakukan uji adsorpsi, asap didiamkan di dalam ruang uji tanpa perlakuan apapun. Waktu yang dibutuhkan asap untuk mencapai opasitas 10 untuk masing-masing titik adalah seperti yang diperlihatkan pada Lampiran. Jika dibiarkan, asap akan mengalami penjernihan sendiri walaupun berada dalam ruangan tertutup. Hal ini karena asap selalu bergerak dan bertabrakan satu sama lain, sehingga mengalami koagulasi dan membuat ukuran partikelnya semakin membesar (Yadav et.al., 2007) dan jatuh ke bawah akibat gaya gravitasi. Waktu yang dibutuhkan asap untuk mencapai tingkat kejernihan sebesar 10% (t10) untuk titik 1 adalah 41 menit, titik 2 adalah 50 menit, dan titik 3 adalah 53 menit. Sedangkan untuk gas CO, terjadi penurunan konsentrasi sebesar 14 ppm hingga menit ke 20. Kecilnya penurunan konsentrasi gas CO dalam ruang uji menandakan bahwa ruang uji yang digunakan cukup baik.

#### 4.4.1 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran dengan Karbon Aktif

Adsorpsi gas CO dan penjernihan asap kebakaran dilakukan dengan variasi massa adsorben yang disemprotkan ke ruang uji, yaitu 1 gram, 3 gram, dan 5 gram. Adapun material yang dibakar untuk menghasilkan asap adalah kertas, kabel, dan sebuk kayu dengan massa masing-masing material 20 gram. Asap yang dihasilkan dari proses pembakaran ini dipompakan ke dalam ruang uji hingga opasitasnya 0 dan konsentrasi gas CO awal pada *gas analyzer* cukup stabil atau perubahan konsentrasi tidak terlalu besar. Setelah itu, adsorben disemprotkan ke ruang uji melalui lubang yang terletak di bagian atas ruang uji. Data yang diambil adalah perubahan nilai opasitas setiap menit pada 3 titik yang terdapat pada ruang uji hingga didapat nilai t10 dan penurunan konsentrasi gas CO setiap menit selama 20 menit. Nilai opasitas pada masing-masing titik dan penurunan konsentrasi gas CO dapat dilihat pada Tabel 4.8 dan Gambar 4.13.

**Tabel 4.8.** Nilai t10 Menggunakan Adsorben Karbon Aktif dengan Variasi Massa

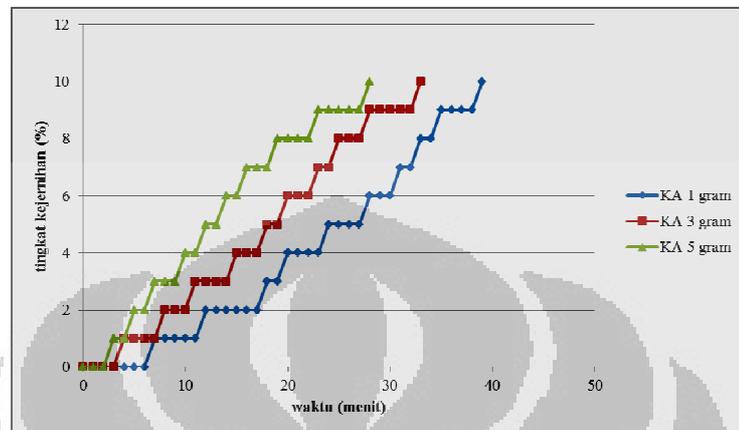
Adsorben	t10 (menit)		
	titik 1	titik 2	titik 3
KA 1 gram	38	40	42
KA 3 gram	33	36	37
KA 5 gram	28	31	32



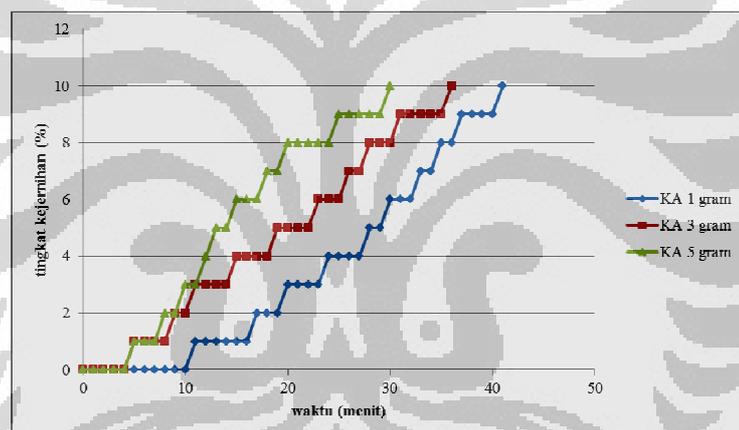
**Gambar 4.13.** Pengaruh Massa Adsorben terhadap Penurunan Konsentrasi Gas CO

Dari Tabel 4.11 dan Grafik 4.18, dapat dilihat bahwa KA dengan massa 5 gram memiliki rasio akhir atau persentasi penurunan konsentrasi CO yang paling

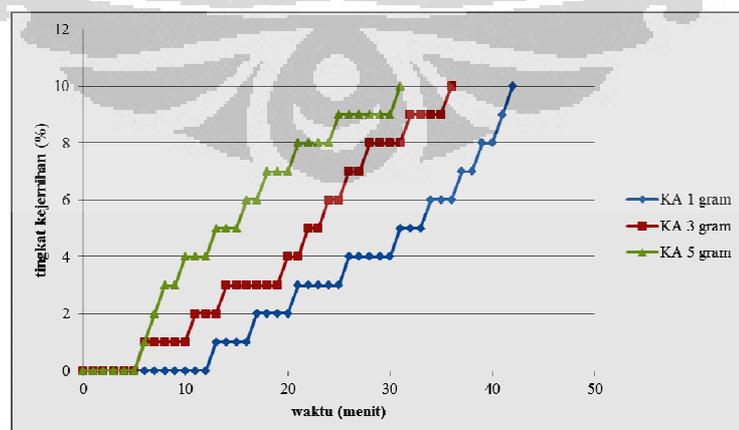
besar, yaitu sebesar 124 ppm hingga menit ke 20. Pengaruh massa adsorben yang disemprotkan ke dalam ruang uji terhadap nilai opasitas dapat dilihat pada Gambar 4.14.



(a)



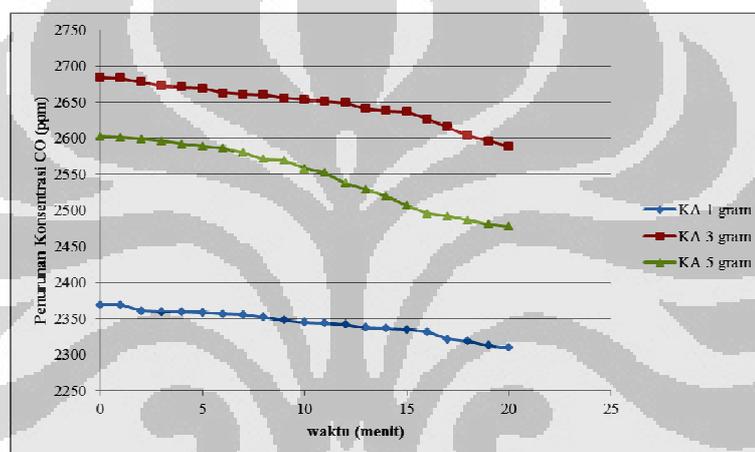
(b)



(c)

**Gambar 4.14.** Tingkat Kejernihan Asap dengan Adsorben Karbon Aktif terhadap Waktu pada (a) Titik 1, (b) Titik 2, dan (c) Titik 3

Dari Gambar 4.14 terlihat bahwa karbon aktif dengan massa yang lebih besar ( $1 \text{ gram} < 3 \text{ gram} < 5 \text{ gram}$ ) memiliki kemampuan menjernihkan asap lebih baik. Hal ini ditandai waktu yang paling cepat untuk mencapai tingkat kejernihan 10%. Hal ini disebabkan daerah kontak antara karbon aktif dengan partikel asap semakin banyak sehingga kemungkinan partikel karbon aktif yang bertabrakan dan berkoagulasi dengan partikel asap semakin banyak pula. Banyaknya partikel ini juga berarti luas permukaan yang kontak dengan asap semakin banyak. Untuk ukuran yang sama, kemampuan karbon aktif dalam menurunkan konsentrasi gas CO ditunjukkan pada Gambar 4.15.



**Gambar 4.15.** Pengaruh Waktu terhadap Penurunan Konsentrasi Gas CO dengan Variasi Massa Adsorben

Gas CO dapat diadsorpsi karena memiliki ukuran partikel yang lebih kecil dari ukuran pori karbon aktif. Ukuran partikel CO adalah  $0,113 \text{ nm}$  dan menurut hasil BET pada Tabel 4.7 diketahui bahwa karbon aktif memiliki ukuran diameter pori sebesar  $25,39 \text{ \AA}$  atau  $2,539 \text{ nm}$ . Hal ini sesuai dengan teori bahwa molekul yang dapat diadsorpsi adalah molekul yang berdiameter sama atau lebih kecil dari diameter pori adsorben.

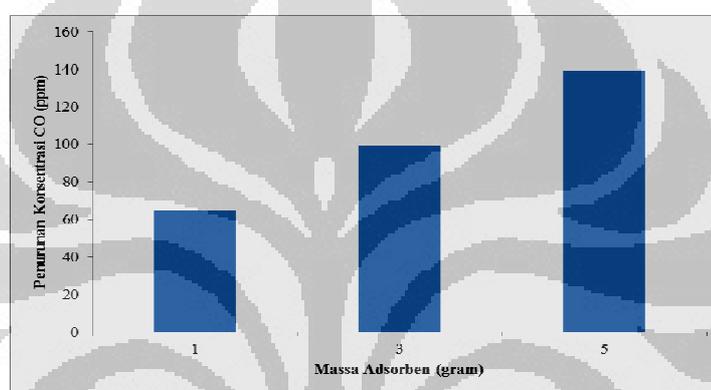
#### 4.4.2 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran dengan Karbon Aktif Terimpregnasi $\text{TiO}_2$

Pada bagian ini, akan dibahas daya adsorpsi karbon aktif terimpregnasi  $\text{TiO}_2$  dalam menjernihkan asap berdasarkan massa adsorben yang disemprotkan ke

dalam ruang uji. Nilai  $t_{10}$  pada masing-masing titik dan penurunan konsentrasi gas CO dapat dilihat pada Tabel 4.9 dan Gambar 4.16.

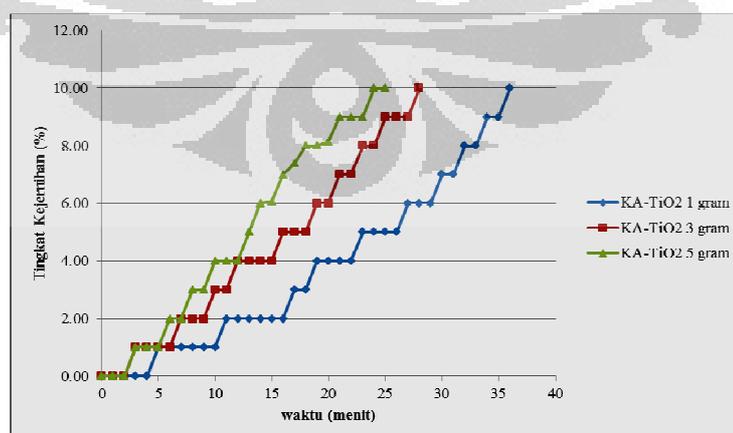
**Tabel 4.9.** Nilai  $t_{10}$  Menggunakan Adsorben Karbon Aktif –  $\text{TiO}_2$  dengan Variasi Massa

Adsorben	$t_{10}$ (menit)		
	titik 1	titik 2	titik 3
KA – $\text{TiO}_2$ 1 gram	36	37	40
KA – $\text{TiO}_2$ 3 gram	28	31	31
KA – $\text{TiO}_2$ 5 gram	25	26	26

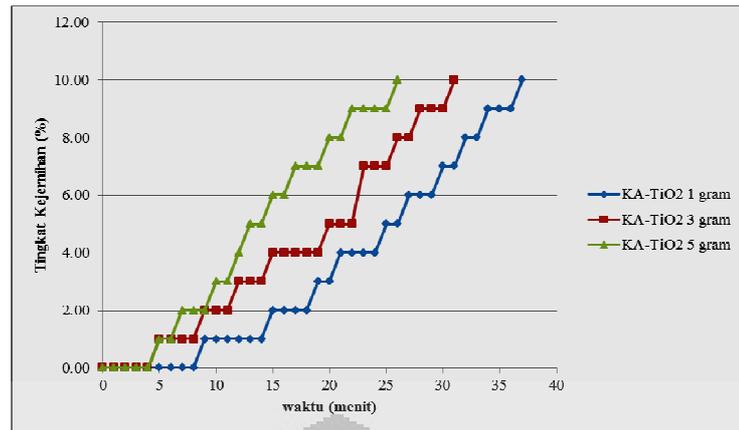


**Gambar 4.16.** Pengaruh Massa Adsorben terhadap Penurunan Konsentrasi Gas CO

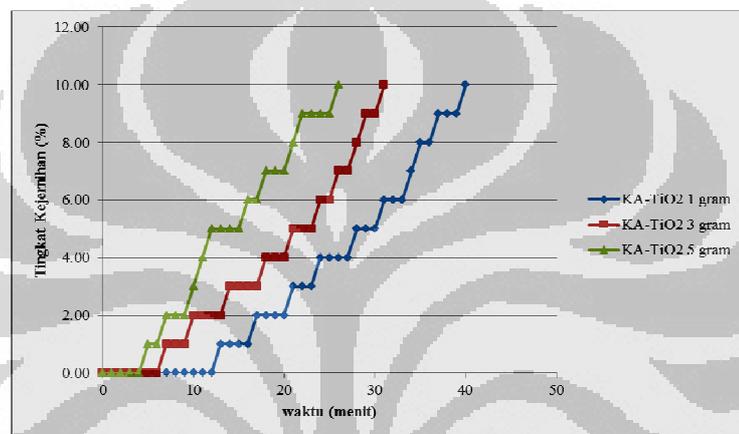
Dari Gambar 4.16, dapat dilihat bahwa KA- $\text{TiO}_2$  dengan massa 5 gram menurunkan konsentrasi gas CO lebih besar, yaitu sebesar 139 ppm hingga menit ke 20.



(a)

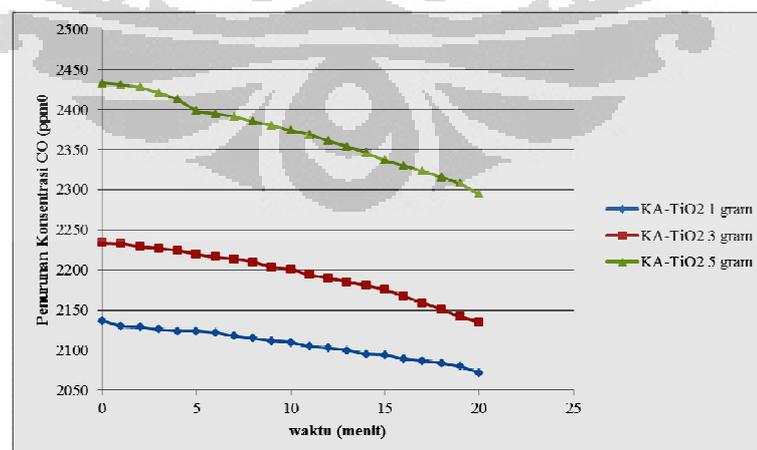


(b)



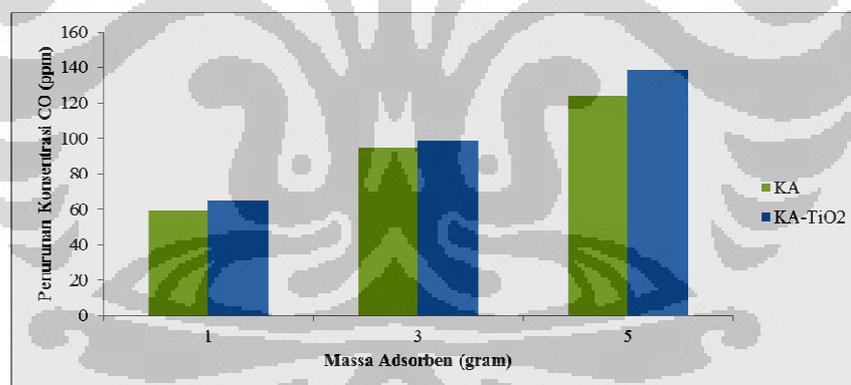
(c)

**Gambar 4.17.** Tingkat Kejernihan Asap dengan Adsorben Karbon Aktif Terimpregnasi TiO<sub>2</sub> terhadap Waktu pada (a) Titik 1, (b) Titik 2, dan (c) Titik 3



**Gambar 4.18.** Pengaruh Waktu terhadap Penurunan Konsentrasi Gas CO dengan Variasi Massa Adsorben

Dari Gambar 4.18 terlihat bahwa karbon aktif terimpregnasi  $\text{TiO}_2$  dengan massa yang lebih besar ( $1 \text{ gram} < 3 \text{ gram} < 5 \text{ gram}$ ) memiliki kemampuan menjernihkan asap lebih baik. Hal ini ditunjukkan oleh waktu yang paling cepat untuk mencapai tingkat kejernihan 10%. Penurunan waktu ini menunjukkan bahwa kehadiran  $\text{TiO}_2$  berpengaruh terhadap daya adsorpsi gas CO.  $\text{TiO}_2$  yang disisipkan pada karbon aktif ini berfungsi sebagai katalis untuk mempercepat terjadinya proses adsorpsi oleh karbon aktif. Kemampuan katalis bergantung pada permukaan zat padat berpori yang dalam hal ini adalah karbon aktif. Luas permukaan adsorben yang lebih besar dapat meningkatkan kemampuan adsorpsinya. Selain itu, volume ruang antarlapis karbon aktif setelah proses penyisipan  $\text{TiO}_2$  bertambah besar sebagai akibat dari menyisipnya molekul  $\text{TiO}_2$  dan menghilangnya molekul air pada saat pemanasan. Hal inilah yang menyebabkan kemampuan adsorpsi karbon aktif terimpregnasi  $\text{TiO}_2$  meningkat. Pengaruh massa adsorben terhadap penurunan konsentrasi gas CO secara lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 4.19.



**Gambar 4.19.** Pengaruh Massa Adsorben terhadap Penurunan Konsentrasi Gas CO dengan Variasi Jenis Adsorben

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

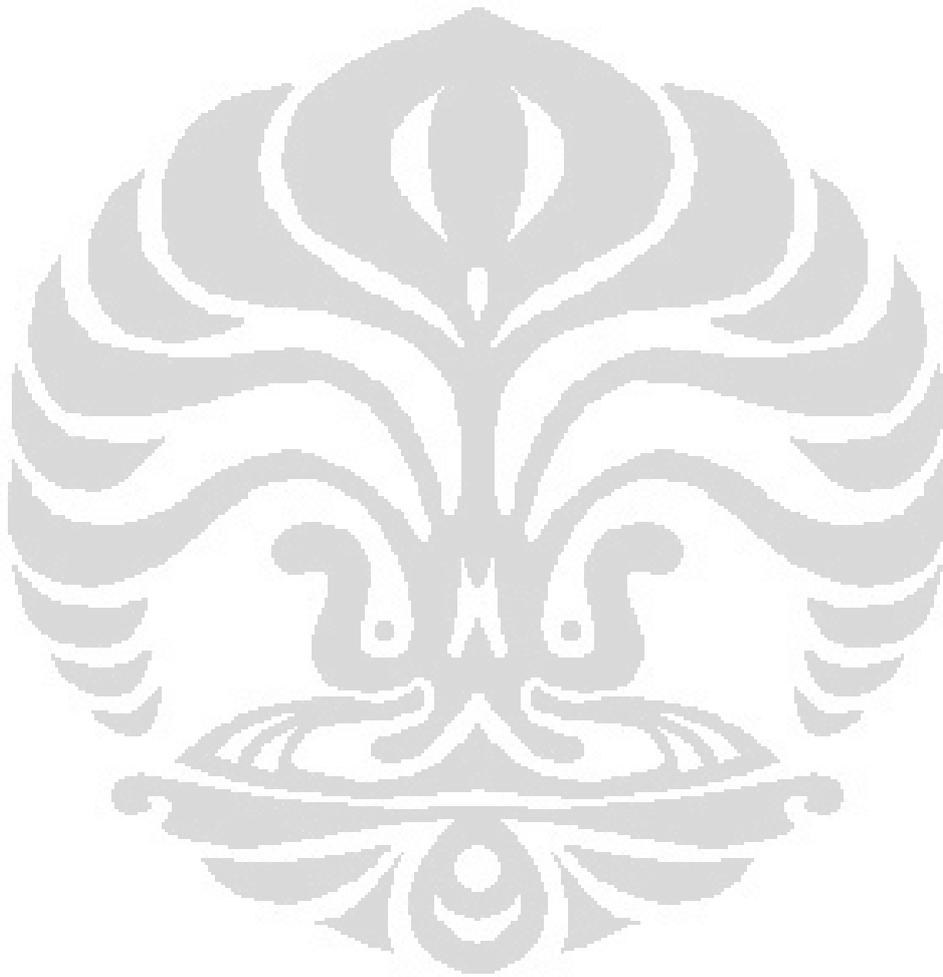
Dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa sawit yang diaktivasi pada suhu 700°C memiliki luas permukaan paling tinggi, yaitu sebesar 773,7 m<sup>2</sup>/gram.
2. Proses impregnasi TiO<sub>2</sub> ke dalam karbon aktif dapat meningkatkan luas permukaan karbon aktif – TiO<sub>2</sub> sebesar 8,9 m<sup>2</sup>/gram , yaitu menjadi 782,6 m<sup>2</sup>/gram.
3. Karbon aktif terimpregnasi TiO<sub>2</sub> lebih cepat dalam menjernihkan asap dan menurunkan konsentrasi gas CO dibandingkan dengan karbon aktif yang tidak diimpregnasi TiO<sub>2</sub>. Hal ini ditunjukkan dengan menurunnya t<sub>10</sub> untuk masing-masing titik pengamatan, 25 menit, 26 menit, dan 26 menit, dengan penurunan konsentrasi gas CO sebesar 139 ppm.
4. Massa adsorben yang disemprotkan ke dalam ruang uji dapat memperbesar penurunan konsentrasi gas CO dan mempercepat waktu penjernihan asap. Hal ini ditunjukkan dengan menurunnya t<sub>10</sub> dari 38 menit, 40 menit, dan 42 menit menjadi 28 menit, 30 menit, dan 31 menit dengan penurunan konsentrasi gas CO sebesar 59 ppm menjadi 124 ppm (untuk adsorben karbon aktif ). Hal yang sama ditunjukkan untuk karbon aktif terintegrasi TiO<sub>2</sub>, dari 36 menit, 37 menit, dan 40 menit menjadi 25 menit, 26 menit, dan 26 menit dengan penurunan konsentrasi gas CO sebesar 65 ppm menjadi 139 ppm.

#### 5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan penulis, saran yang dapat diberikan adalah perlu mencari metode penyemprotan adsorben agar waktu kontak

antara adsorben dengan asap dapat lebih lama sehingga kapasitas adsorpsi gas CO menjadi lebih besar dan proses penjernihan asap pembakaran lebih cepat.



## DAFTAR PUSTAKA

- Agustiar, Rasyid Ginanjar. (2011). *Adsorpsi Gas NO<sub>2</sub> pada Zeolit Alam Teraktifasi untuk Aplikasi Masker Pernapasan*. Teknik Kimia, Universitas Indonesia., pp. 15-16.
- Alfat, Muhammad Arif. (2009). *Rekayasa Alat dan Uji Kinerja Katalis Komposit TiO<sub>2</sub> - Adsorben Alam untuk Degradasi Polutan Asap Rokok*. Teknik Kimia, Universitas Indonesia., pp. 11 dan 26.
- Allwar, Ahmad Bin Md Noor, dan Mohd Asri Bin Mohd Nawi. (2008). *Textural Characteristics of Activated Carbons Prepared from Oil Palm Shells Activated with ZnCl<sub>2</sub> and Pyrolysis Under Nitrogen and Carbon Dioxide*. Journal of Physical Science, Vol. 19 (2), pp. 93-104.
- Apriawan. (2010). *Adsorpsi Gas CO pada Kasus Kebakaran Menggunakan Zeolite Alam Teraktifasi*. Departemen Teknik Kimia. Depok, Universitas Indonesia., pp. 8-10.
- Basuki, Kris Tri. (2007). *Penurunan Konsentrasi CO dan NO<sub>2</sub> pada Emisi Gas Buang dengan Menggunakan Media Penyisipan TiO<sub>2</sub> Lokal pada Karbon Aktif*. JFN, Vol. 1 (1), pp. 45-58.
- Faria, Emerson Henrique de, Alex Lemes Marçal, Eduardo José Nassar, Katia Jorge Ciuffi, and Paulo Sergio Calefi. (2007). *Sol-Gel TiO<sub>2</sub> Thin Films Sensitized with the Mulberry Pigment Cyanidin*. Materials Research, Vol. 10 (4), pp. 413-417.
- Gann, Richard G., Jason D. Averill, Erik L. Johnsson, Marc R. Nyden, dan Richard D. Peacock. (2003). *Smoke Component Yields from Room-scale Fire Tests*. National Institute of Standards and Technology (NIST) Technical Note, pp. 15.
- Gondang, Muhammad. (2011). *Uji Kapasitas Adsorpsi Gas Karbon Monoksida (CO) Menggunakan Zeolit Alam Lampung Termodifikasi Dengan TiO<sub>2</sub> melalui Metode Sol Gel*. Departemen Teknik Kimia FTUI., pp. 7 dan 38.
- Hwang, Nina, Andrew R. Barron. (2011). *BET Surface Area Analysis of Nanoparticles*. Connexions Module, Vol. 1.1, pp. 4.

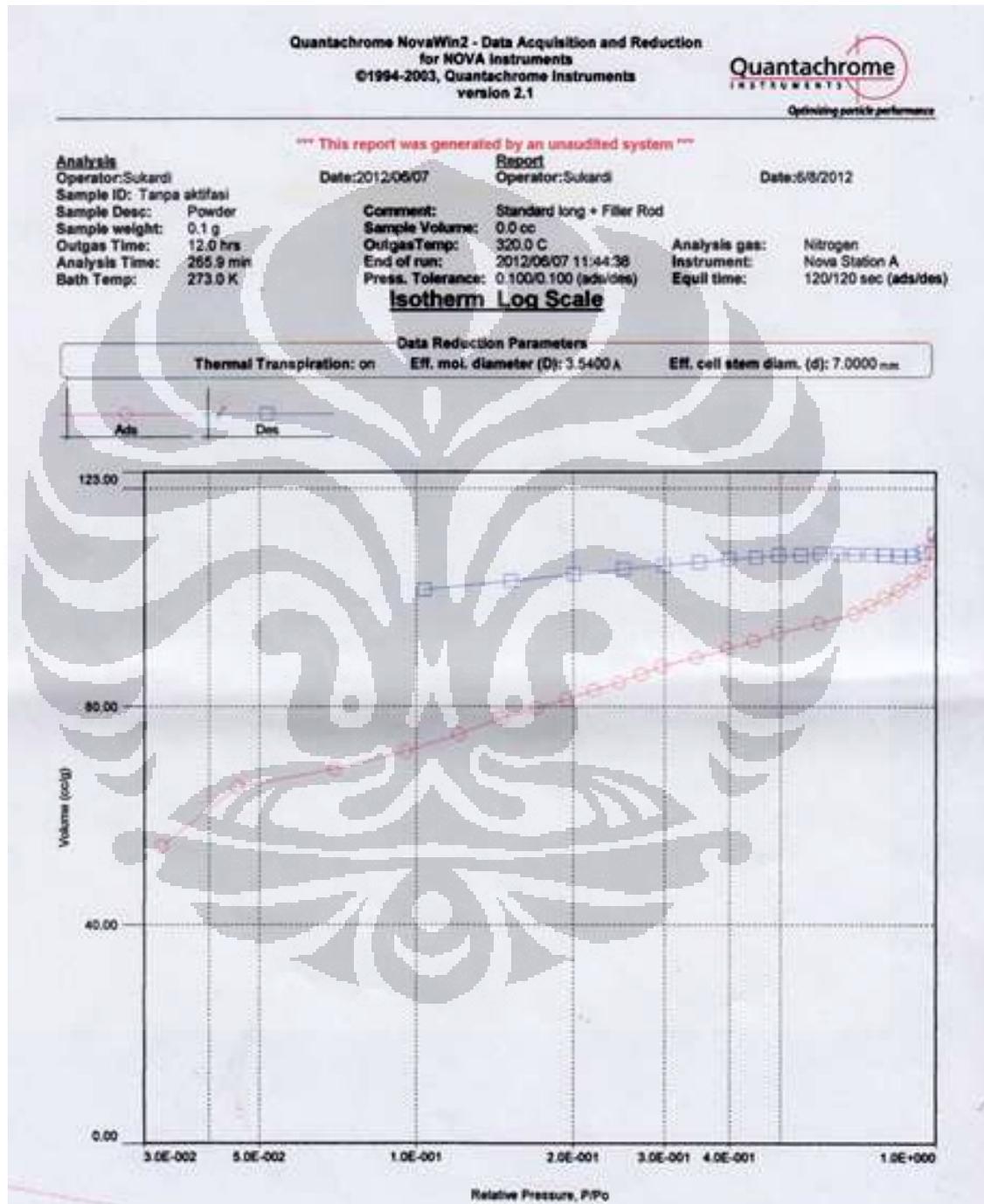
- Ibadurrohman, Muhammad. (2008). *Rekayasa Alat untuk Purifikasi Udara dari Polutan Asap Rokok Menggunakan Katalis Komposit TiO<sub>2</sub>-Karbon Aktif*. Departemen Teknik Kimia. Depok, Universitas Indonesia., pp. 6-7.
- Kalderis, Dimitrios, Dimitrios Koutoulakis, Panagiota Paraskeva, Evan Diamadopoulos, Emilia Otal, Joaquín Olivares del Valle, dan Constantino Fernandez-Pereira. 2008. *Adsorption of Polluting Substances on Activated Carbons Prepared From Rice Husk and Sugarcane Bagasse*. Chemical Engineering Journal, Vol. 144, pp. 42-50.
- Khan, Ameena Yasmeen. (2003). *Titanium Dioxide Coated Activated Carbon : A Regenerative Technology for Water Recovery*. University of Florida. Master of Engineering., pp. 6-9.
- Litter, M. I. and J. A. Navio. (1996). *Photocatalytic Properties of Iron-Doped Titania Semiconductors*. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Vol. 98, pp. 171-181.
- Lubis, Khairati. (2008). *Transformasi Mikropori ke Mesopori Cangkang Kelapa Sawit terhadap Nilai Kalor Briket Arang Cangkang Kelapa Sawit*. Sekolah Pasca Sarjana. Medan, Universitas Sumatera Utara., pp. 8.
- Lydia. (2012). *Pembuatan Karbon Aktif dari Ampas Tebu dengan Aktivasi Kimia Menggunakan KOH dan ZnCl<sub>2</sub>*. Departemen Teknik Kimia. Universitas Indonesia., pp. 14-16 dan 37-38.
- Manocha, Satish M. (2003). *Porous Carbon*. Department of Materials Science, Sardar Patel University, India. *Sādhaná*, Vol. 28 (1 dan 2), pp. 335-348.
- Maron, Samuel H. and Jerome B. Lando. (1965). *Fundamental of Physical Chemistry*. New York, Macmillan Publishing Co. Inc., pp. 151-154.
- Mulia, Arganda. (2007). *Pemanfaatan Tandan Kosong dan Cangkang Kelapa Sawit sebagai Briket Arang*. Sekolah Pasca Sarjana, Universitas Sumatera Utara., pp. 25-26.
- Naeher, Luke P., Michael Brauer, Michael Lipsett, Judith T. Zelikoff, Christopher D. Simpson, Jane Q. Koenig, dan Kirk R. Smith. (2007). *Woodsmoke Health Effects: A Review*. Inhalation Toxicology, Informa Healthcare, Vol. 19, pp. 67-106.

- Pamungkas, Sukma. (2011). *Pemanfaatan Zeolit Alam Bayah pada Proses Penjernihan Asap Kebakaran dan Pengurangan Tingkat Racun Asap*. Departemen Teknik Kimia. Universitas Indonesia., pp. 12-14 dan 44-45.
- Porteous, Andrew. (2008). *Dictionary of Environmental Science and Technology*. England, John Wiley & Sons Ltd., pp. 171.
- Prabowo, Aditya Liberty. (2009). *Pembuatan Karbon Aktif dari Tongkol Jagung serta Aplikasinya untuk Adsorpsi Cu, Pb, dan Amonia*. Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia., pp. 15-18.
- Pujiyanto. (2010). *Pembuatan Karbon Aktif Super dari Batubara dan Tempurung Kelapa*. Departemen Teknik Kimia. Depok, Universitas Indonesia., pp. 8-14, 19, dan 30.
- Rachman, Arief. (2009). *Pembuatan Karbon Aktif dari Tongkol Jagung dan Aplikasinya dalam Pemisahan Campuran Etanol dan Air*. Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia., pp. 42-45.
- Ruthven, Douglas M. (1984). *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*. Canada, John Wiley & Sons, Inc., pp. 71-73.
- Saputra, Adhi. (2007). *Analisis Pengaruh Smoke Shaft sebagai Sistem Pengendalian Asap pada Kebakaran Bangunan Ruko dengan Menggunakan Fire Dynamic Simulation (FDS)*. Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia., pp. 21-25.
- Slamet, Setijo Bismo, and Rita Arbianti. (2007). *Modifikasi Zeolit Alam dan Karbon Aktif dengan  $TiO_2$  serta Aplikasinya sebagai Bahan Adsorben dan Fotokatalis untuk Degradasi Polutan Organik*. Laporan Hibah Bersaing DIKTI.
- Suraputra, Reza. (2011). *Adsorpsi Gas Karbon Monoksida (CO) dan Penjernihan Asap Kebakaran Menggunakan Zeolit Alam Lampung Termodifikasi  $TiO_2$* , Departemen Teknik Kimia. Universitas Indonesia., pp. 32-33, 38, dan 40-44.
- The Japan Institute of Energy. (2008). *The Asian Biomass Handbook : A Guide for Biomass Production and Utilization*. The Ministry of Agriculture, Forestry, and Fisheries, Japan., pp. 104.

- Vitidsant, Tharapong, Terachai Suravattanasakul, dan Somsak Damronglerd. (1999). *Production of Activated Carbon from Palm-oil Shell by Pyrolysis and Steam Activation in a Fixed Bed Reactor*. ScienceAsia, Vol. 25, pp. 211-222.
- Yacob, Abdul Rahim. (2009). *Nano-Tungsten Carbide Prepared from Palm Kernel Shell for Catalytic Decomposition of Hydrazine*. *Proceedings of The 2009 International Conference On Chemical, Biological, and Environmental Engineering*, pp. 334-337. World Scientific Publishing Co.Ptc. Ltd.
- Yadav, R. and R.G. Maghirang. Yadav R., Maghirang, R.G., Erickson L.E., Kakumanu, B., and Castro, S.G.. (2007). *Laboratory Evaluation of The Effectiveness of Nanostructured and Conventional Particles in Clearing Smoke in Enclosed Space*. Fire Safety Journal, Vol. 43(1), pp. 36-41.
- Yang, Ralph T. (1987). *Gas Separation by Adsorption Processes*. United States, Butterworth Publishers, Stoneham, MA., pp. 79-82.

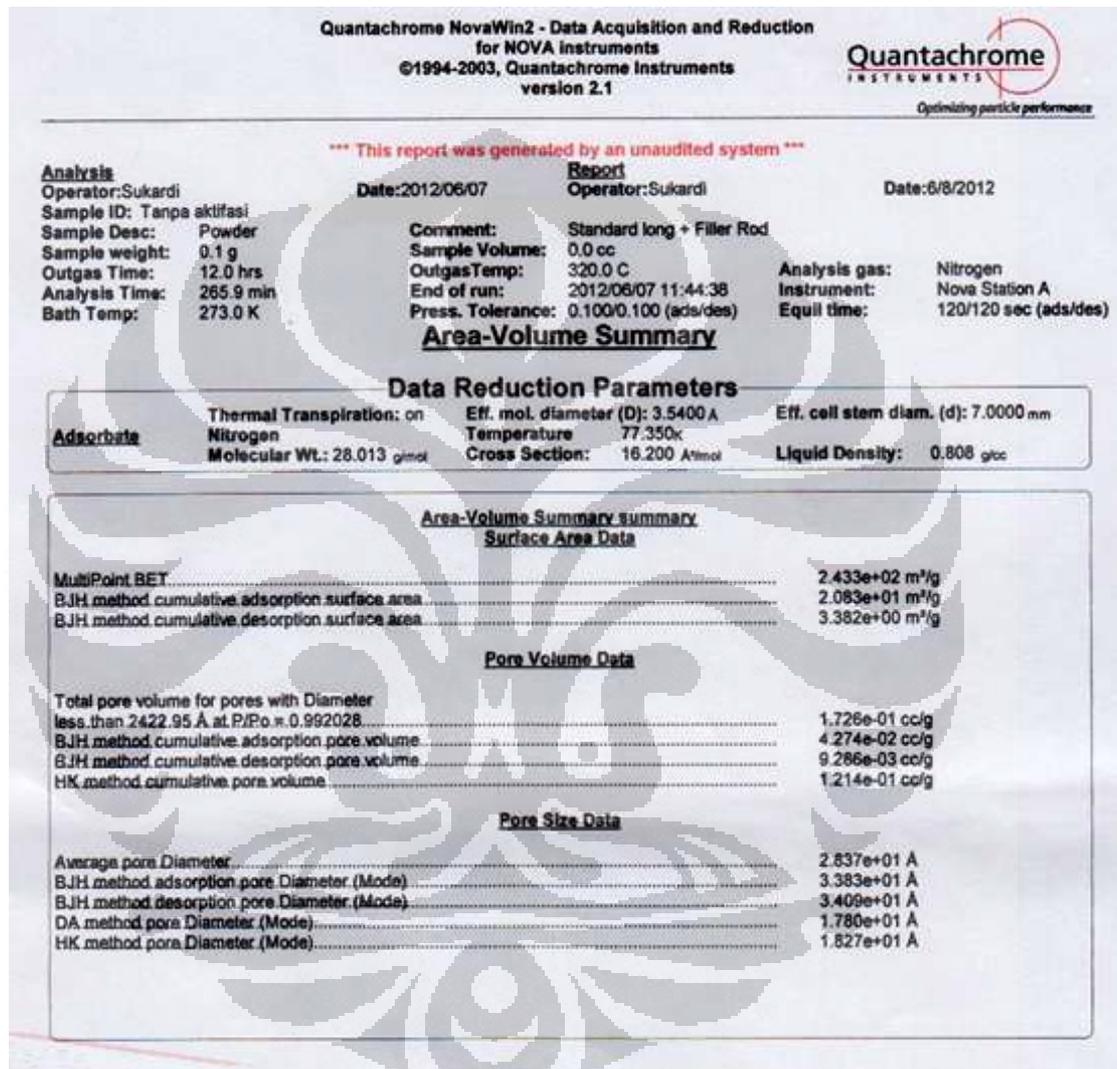
## LAMPIRAN 1

### Hasil Pengujian Luas Permukaan (BET) Karbon Tanpa Aktivasi



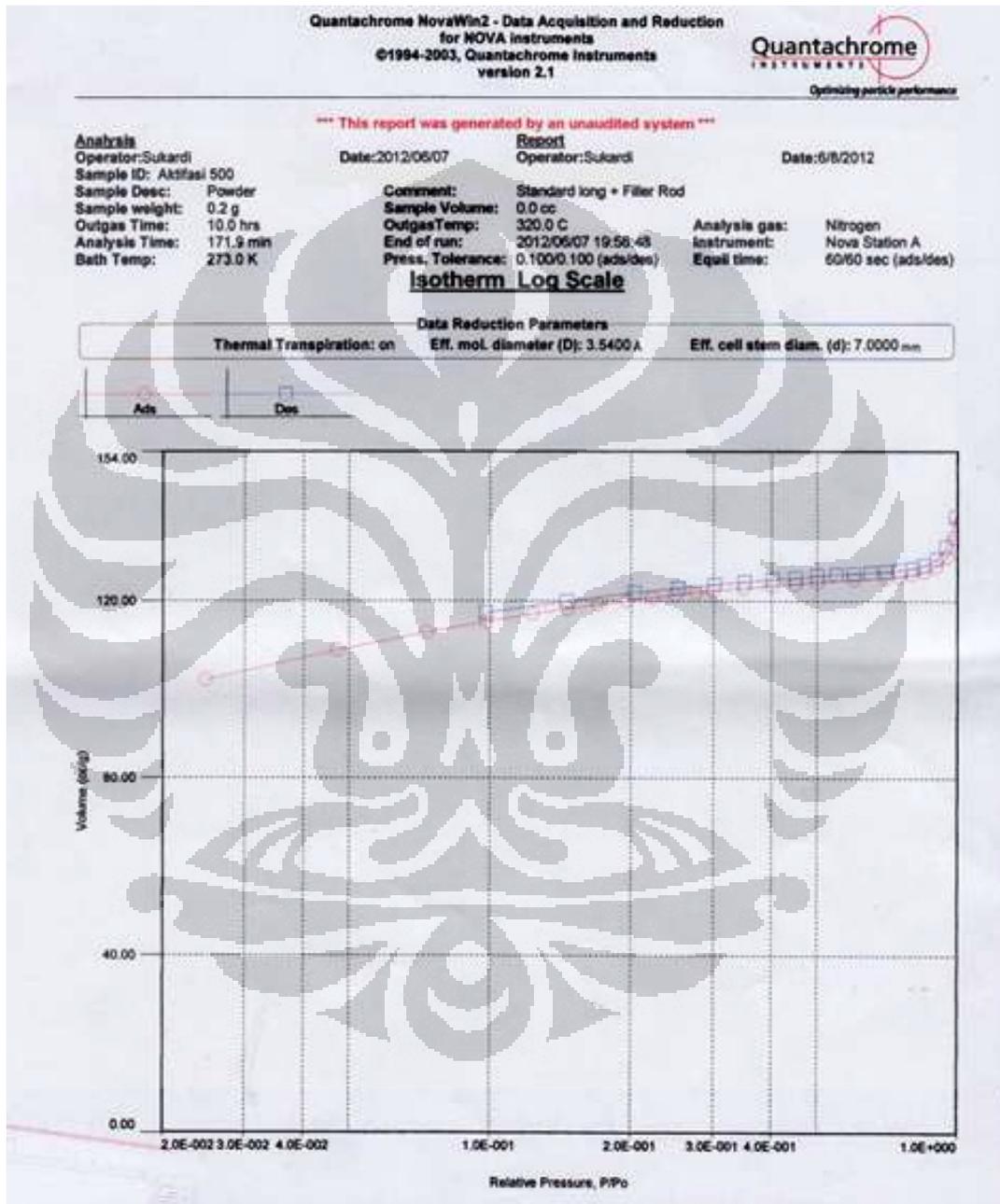
## LAMPIRAN 1

### Hasil Pengujian Luas Permukaan (BET) Karbon Tanpa Aktivasi (Lanjutan)



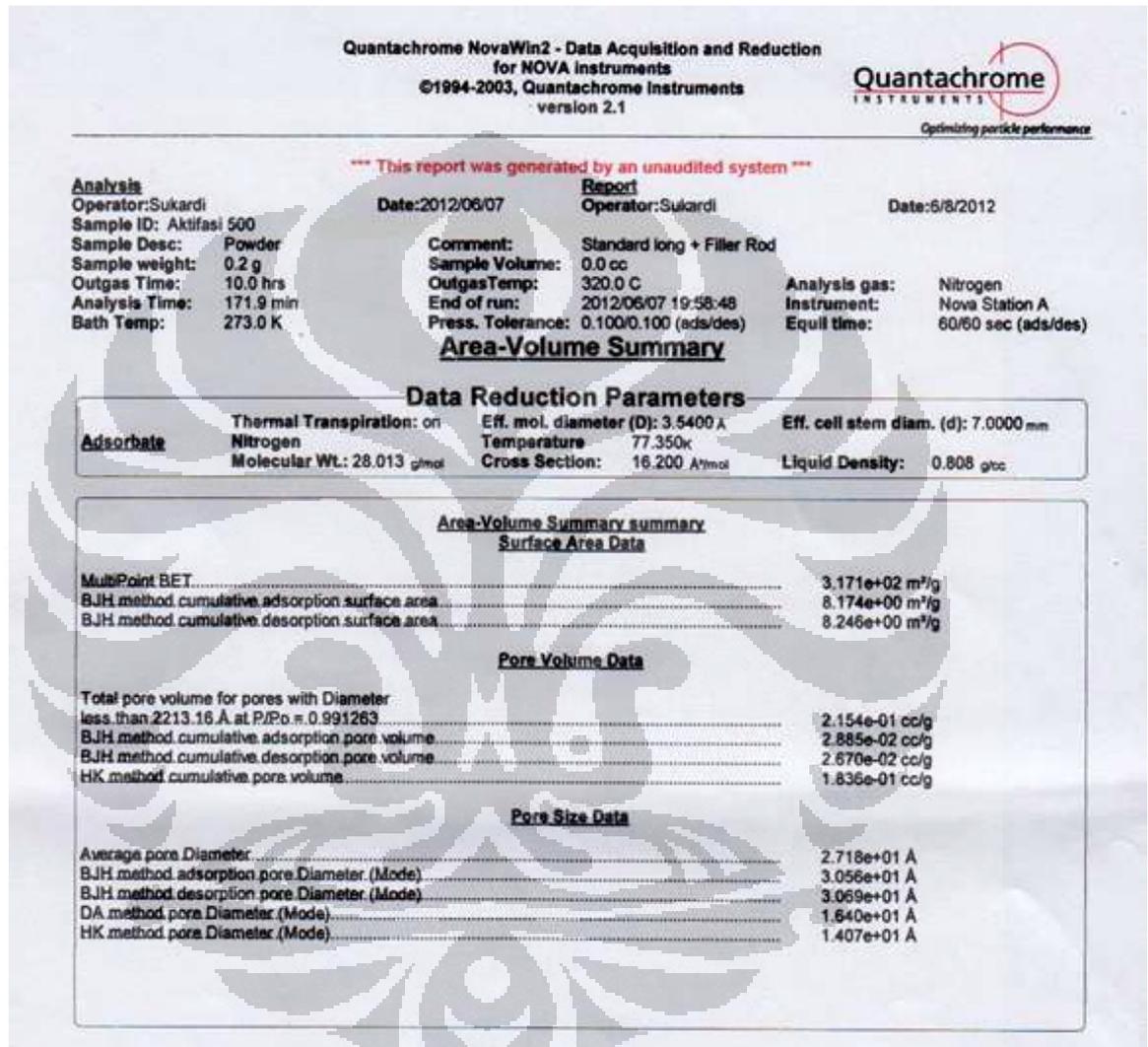
## LAMPIRAN 2

### Hasil Pengujian Luas Permukaan (BET) Karbon Aktif dengan Suhu Aktivasi 500°C



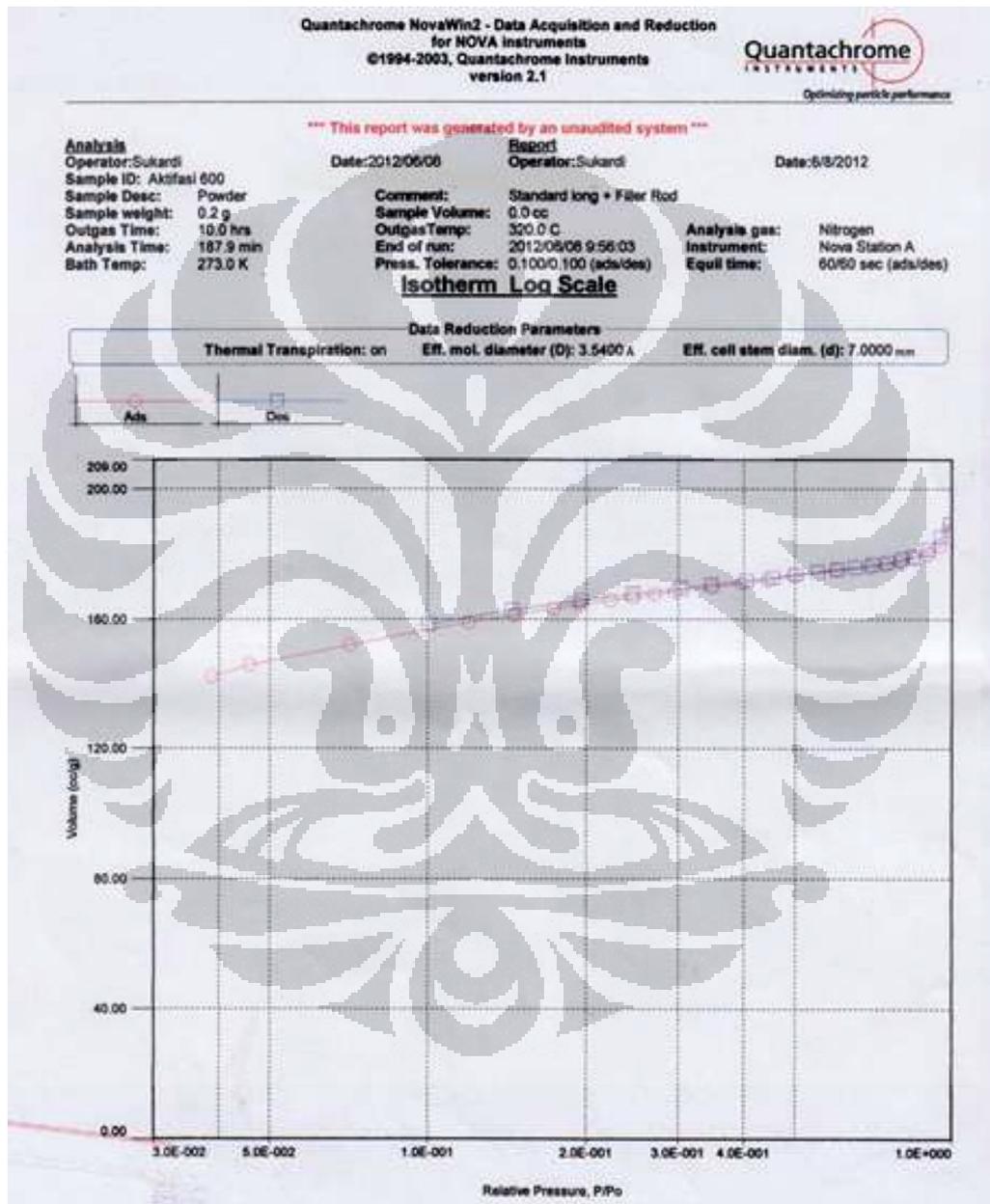
## LAMPIRAN 2

### Hasil Pengujian Luas Permukaan (BET) Karbon Aktif dengan Suhu Aktivasi 500°C (Lanjutan)



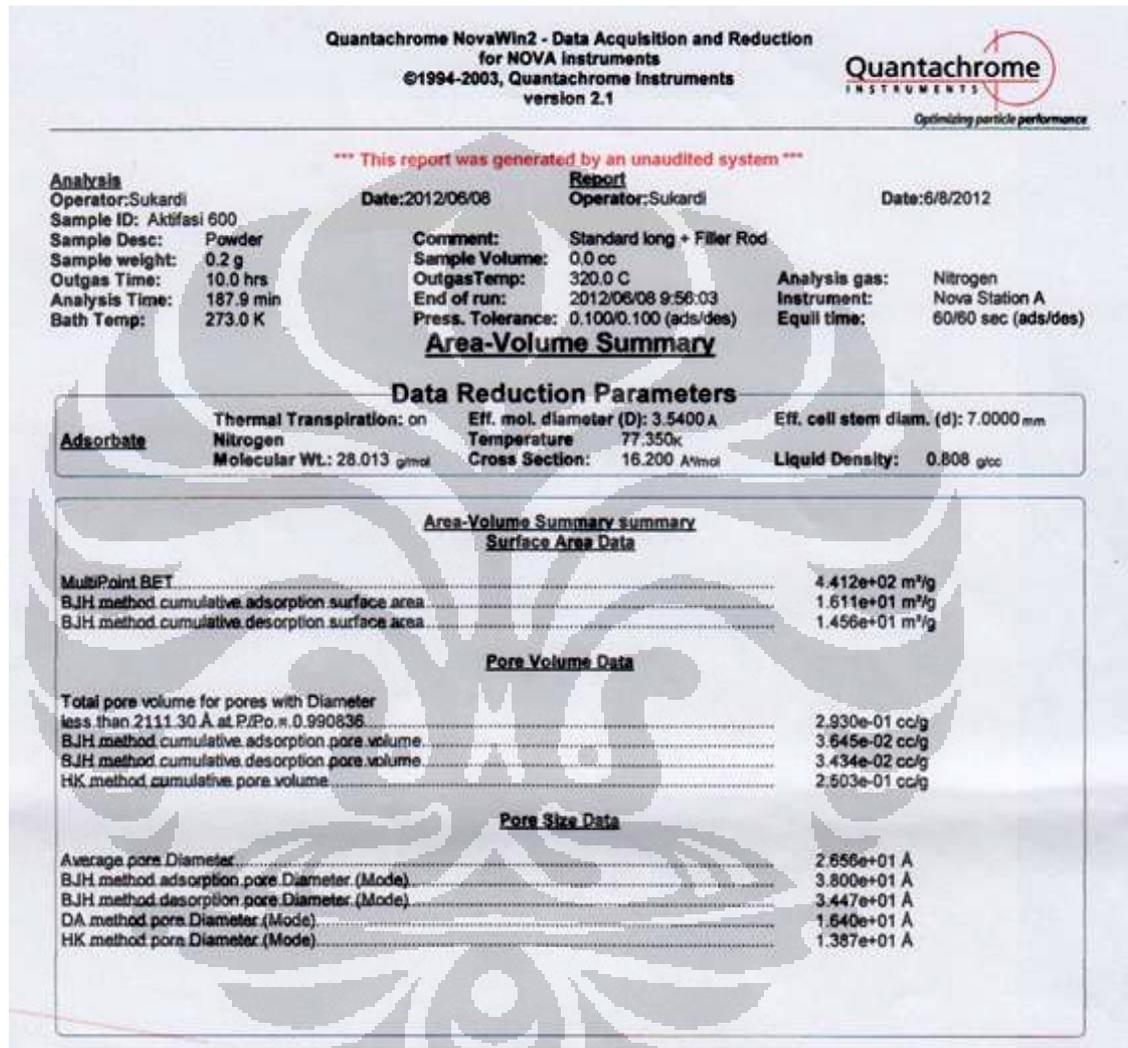
### LAMPIRAN 3

## Hasil Pengujian Luas Permukaan (BET) Karbon Aktif dengan Suhu Aktivasi 600°C



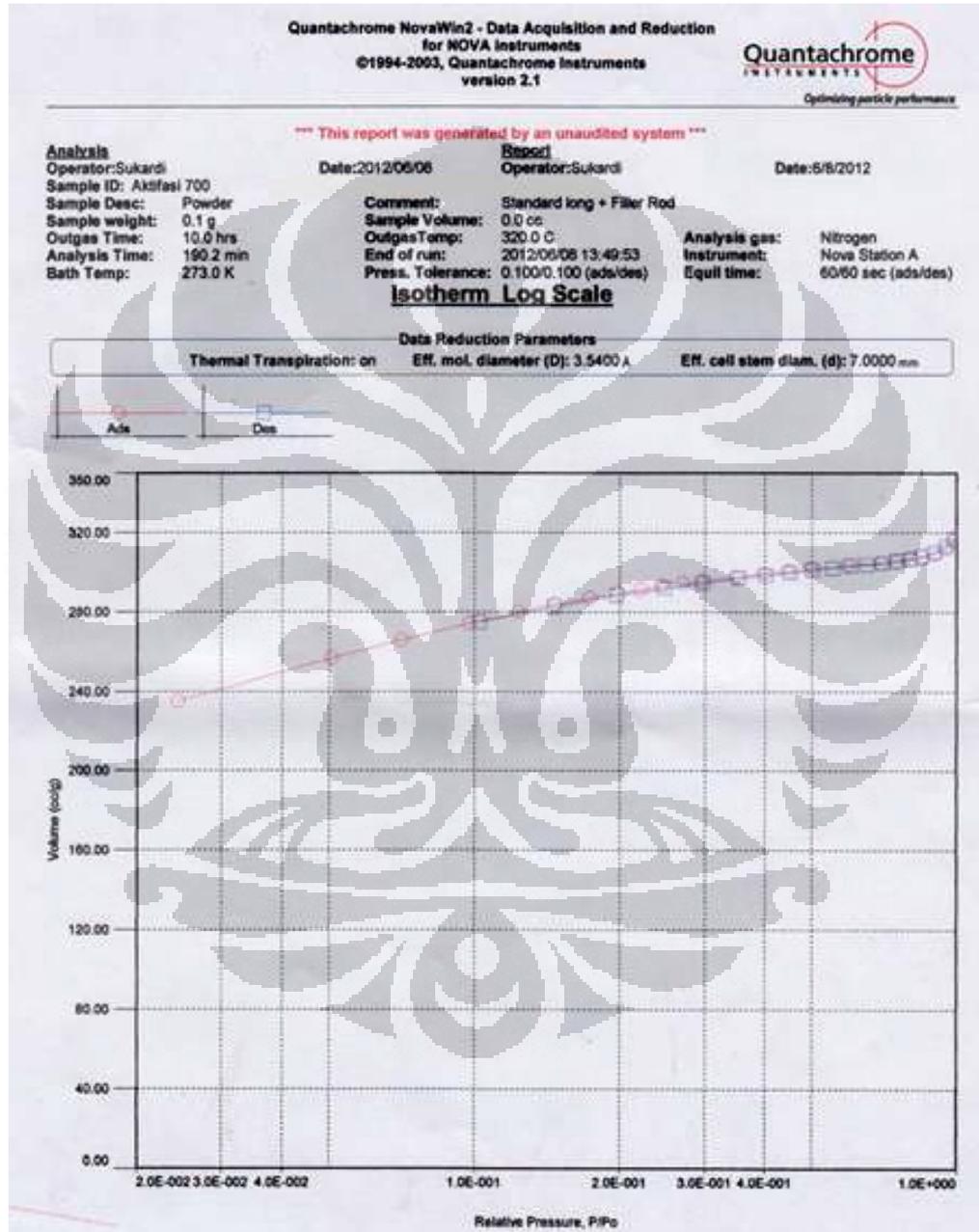
### LAMPIRAN 3

## Hasil Pengujian Luas Permukaan (BET) Karbon Aktif dengan Suhu Aktivasi 600°C (Lanjutan)



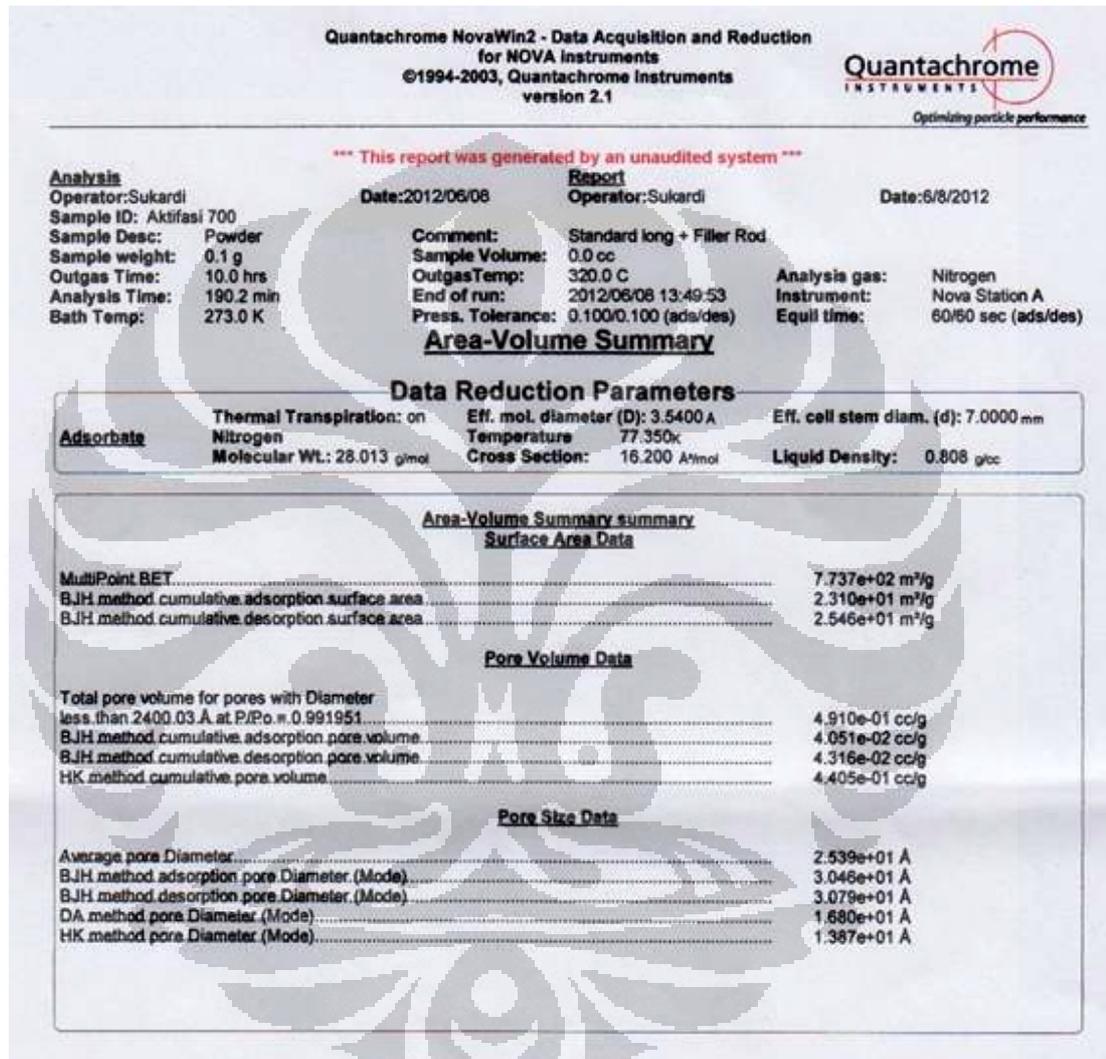
## LAMPIRAN 4

### Hasil Pengujian Luas Permukaan (BET) Karbon Aktif dengan Suhu Aktivasi 700°C



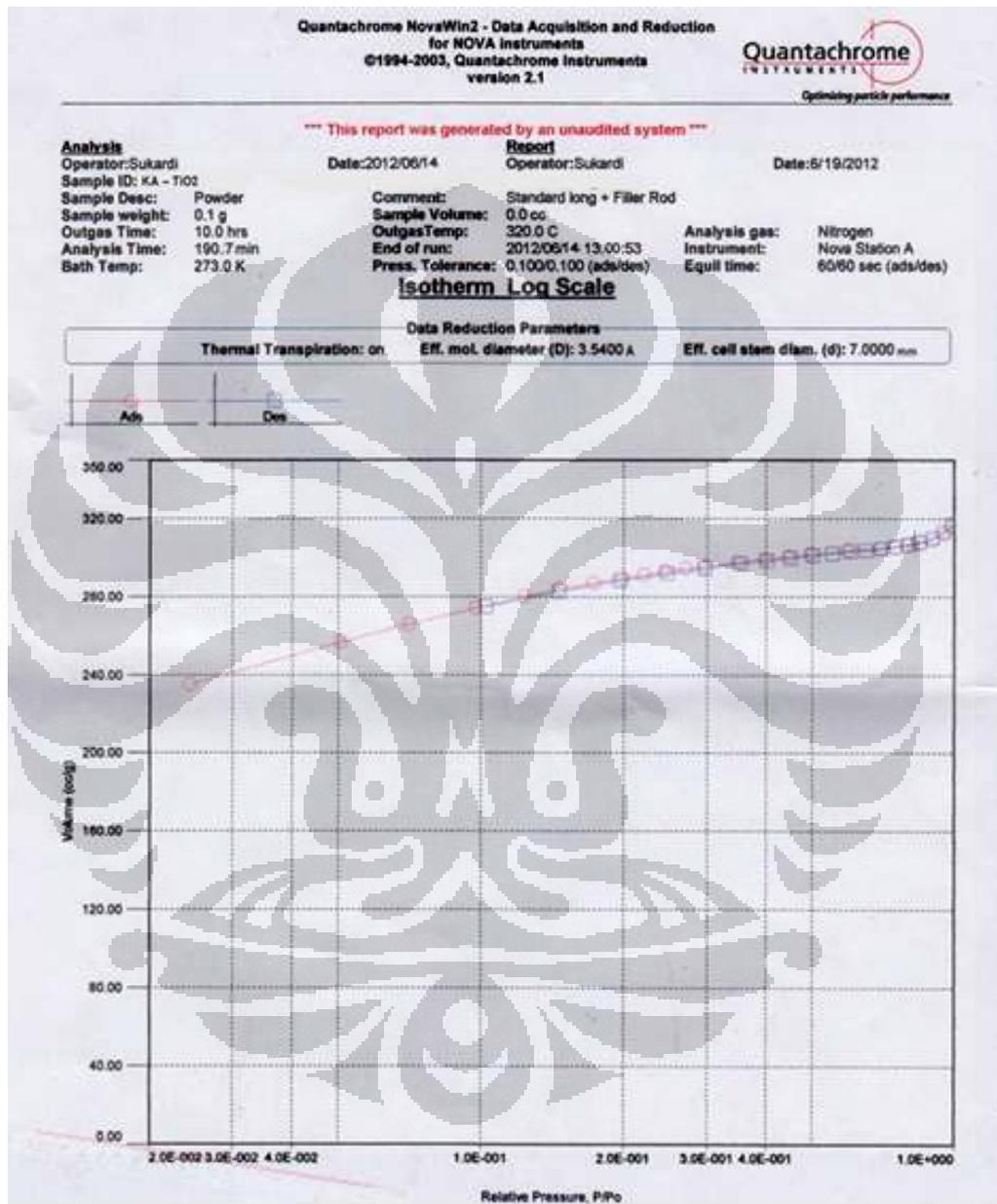
## LAMPIRAN 4

### Hasil Pengujian Luas Permukaan (BET) Karbon Aktif dengan Suhu Aktivasi 700°C (Lanjutan)



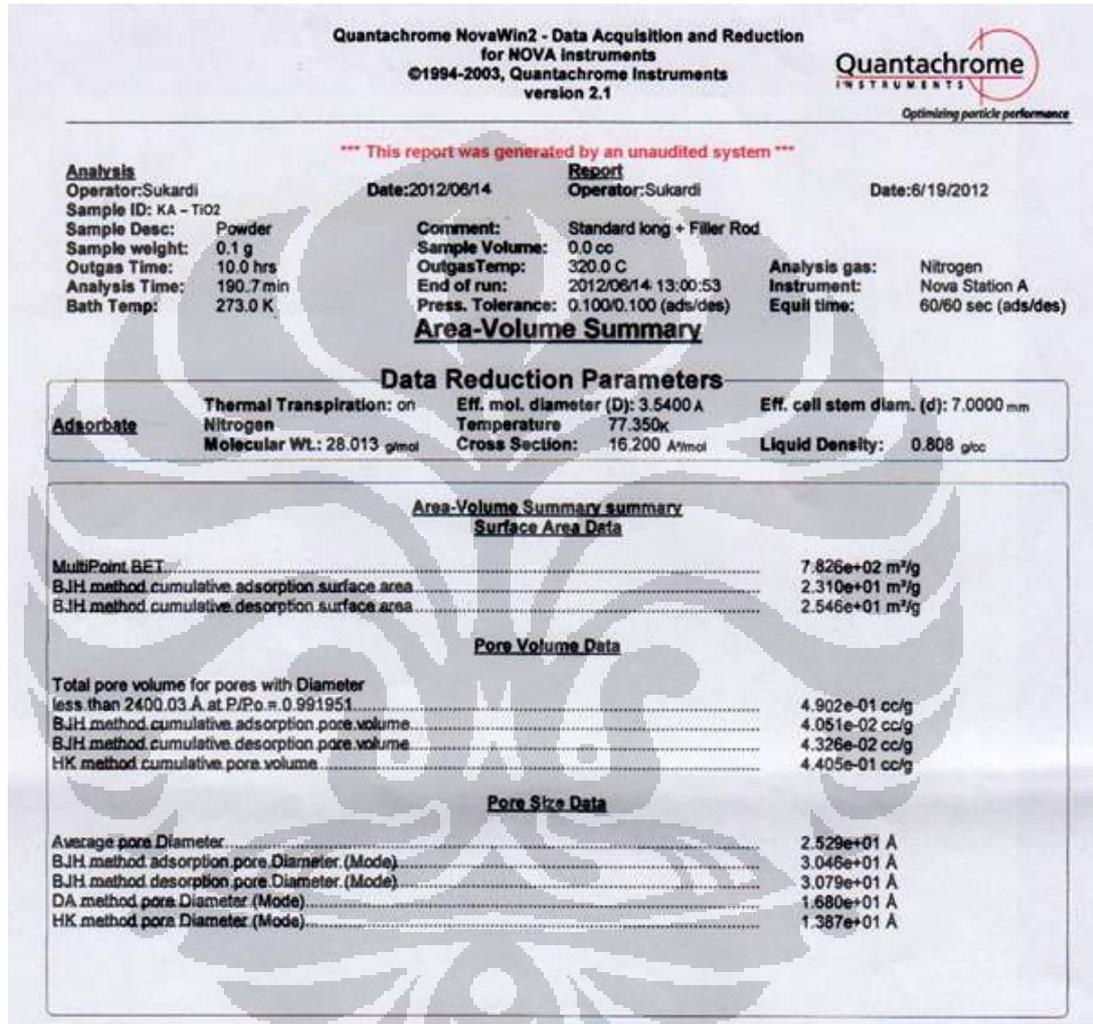
## LAMPIRAN 5

### Hasil Pengujian Luas Permukaan (BET) Karbon Aktif Terintegrasi TiO<sub>2</sub>



## LAMPIRAN 5

### Hasil Pengujian Luas Permukaan (BET) Karbon Aktif Terintegrasi TiO<sub>2</sub> (Lanjutan)



## LAMPIRAN 6

### Hasil Pengujian Komposisi Karbon Aktif



**FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA**  
**LABORATORIUM UJI**  
**DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL**  
KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA  
Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax : 021 – 78888111 E-mail : [lum@metal.ui.ac.id](mailto:lum@metal.ui.ac.id)

---

**COMPOSITION TEST REPORT**  
Page 2 of 2

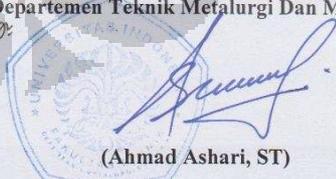
Laboratory test No. : 0804/PT.02/FT04/P/2012  
Date of test : 20 Juni 2012  
Specimen to be tested : -  
Quantity : 1  
Specimen Code : 2-Karbon aktif  
Code Description : -  
Customer : **Mariatul. Q.**  
Test Description : Element identification by Energy Dispersive Spectroscopy  
Reference : LEO Standard

---

*Test Result*  
Microcomposition analysis that was performed on sample by means of Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) shows that chemical compositions are as follows.

TEST	C (%)	O (%)	Si (%)	Cl (%)	Fe (%)	Zn (%)
1	20.94	7.67	3.62	23.68	10.29	33.81
2	11.63	10.48	5.19	18.81	8.90	44.99
3	13.48	6.76	2.97	25.38	10.54	40.87

Depok, 21 Juni 2012  
Manajer Teknis  
Laboratorium Uji  
Departemen Teknik Metalurgi Dan Material

  
(Ahmad Ashari, ST)

## LAMPIRAN 7

### Hasil Pengujian Komposisi Karbon Aktif Terintegrasi TiO<sub>2</sub>



**FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS INDONESIA**  
**LABORATORIUM UJI**  
**DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL**  
KAMPUS BARU UI - DEPOK 16424 - INDONESIA  
Telp: 021 – 7863510, 78849045 Fax: 021 – 78888111 E-mail: lum@metal.ui.ac.id

---

**COMPOSITION TEST REPORT**  
Page 1 of 2

Laboratory test No. : 0804/PT.02/FT04/P/2012  
Date of test : 20 Juni 2012  
Specimen to be tested : -  
Quantity : 1  
Specimen Code : Karbon aktif-TiO<sub>2</sub>  
Code Description : -  
Customer : **Mariatul. Q.**  
Test Description : Element identification by Energy Dispersive Spectroscopy  
Reference : LEO Standard

---

*Test Result*  
Microcomposition analysis that was performed on sample by means of Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) shows that chemical compositions are as follows.

TEST	C (%)	O (%)	Si (%)	Cl (%)	Ti (%)	Ni (%)	Fe (%)	Zn (%)
1	6.66	10.97	1.48	11.79	28.76	19.01	-	21.33
2	8.61	17.66	1.91	14.57	38.39	-	-	18.85
3	13.03	14.07	0.94	17.77	28.62	-	5.72	19.86

Depok, 21 Juni 2012  
Manajer Teknis  
Laboratorium Uji  
Departemen Teknik Metalurgi Dan Material



(Ahmad Ashari, ST)

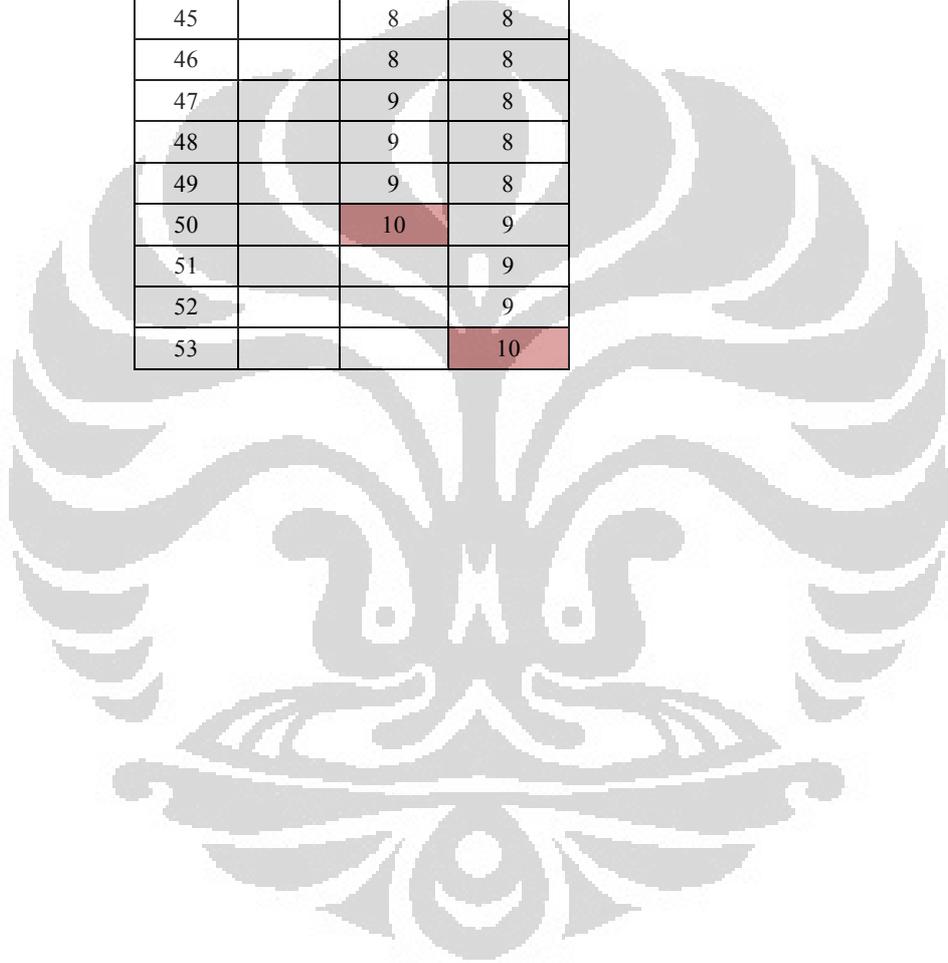
## LAMPIRAN 8

### Hasil Uji Adsorpsi dan Tingkat Kejernihan Asap

#### Tanpa Adsorben

t (menit)	Tingkat Kejernihan			[CO] (ppm)	% Adsorpsi
	1	2	3		
0	0	0	0	2363	0.59
1	0	0	0	2363	
2	0	0	0	2363	
3	0	0	0	2362	
4	0	0	0	2361	
5	0	0	0	2360	
6	0	0	0	2358	
7	0	0	0	2358	
8	0	0	0	2358	
9	0	0	0	2357	
10	1	0	0	2357	
11	1	0	0	2357	
12	1	0	0	2355	
13	1	1	0	2353	
14	2	1	0	2353	
15	2	1	0	2351	
16	2	1	1	2351	
17	2	1	1	2350	
18	3	2	1	2350	
19	3	2	1	2349	
20	3	2	2	2349	
21	4	2	2	14	
22	4	2	2		
23	5	2	2		
24	5	3	2		
25	5	3	2		
26	5	3	3		
27	6	3	3		
28	6	4	3		
29	6	4	3		
30	7	4	3		
31	8	5	4		
32	8	5	4		
33	8	5	4		
34	9	6	5		

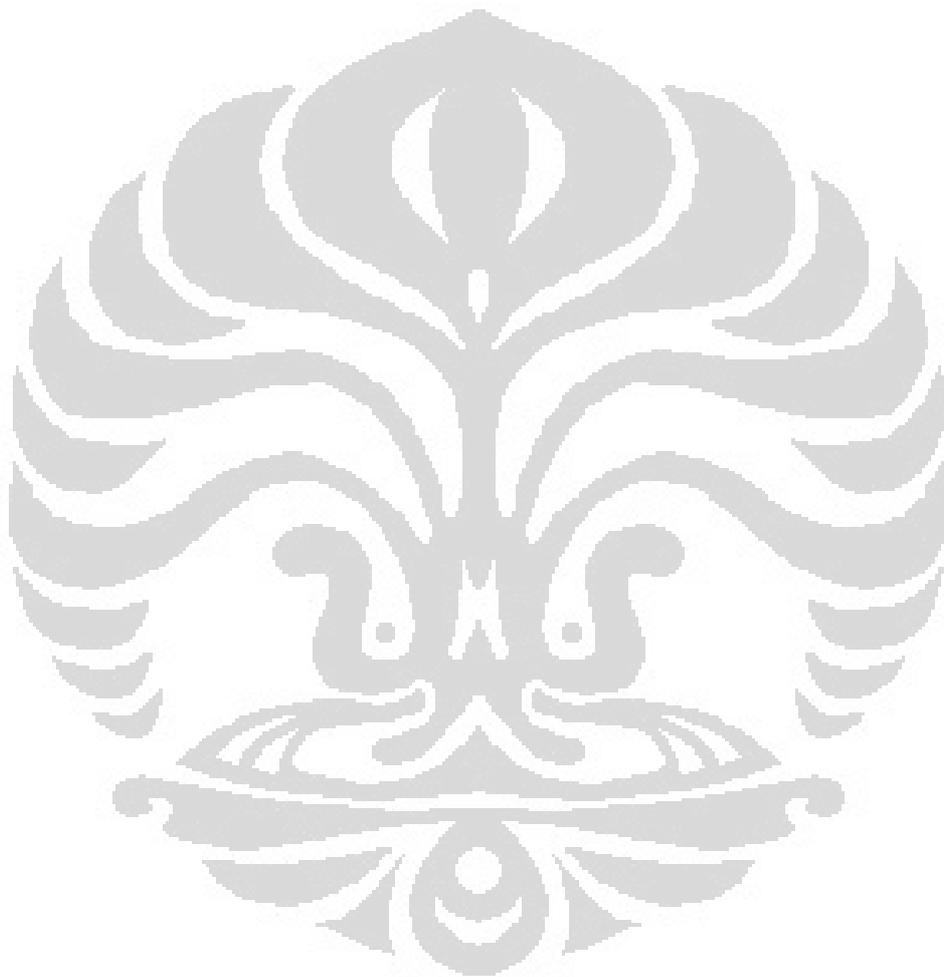
35	9	6	5
36	9	6	5
37	9	6	6
38	9	7	6
39	9	7	7
40	9	7	7
41	10	7	7
42		7	8
43		8	8
44		8	8
45		8	8
46		8	8
47		9	8
48		9	8
49		9	8
50		10	9
51			9
52			9
53			10



### Adsorben Karbon Aktif 1 gram

t (menit)	Tingkat Kejernihan			[CO] (ppm)	% Adsorpsi
	1	2	3		
0	0	0	0	2369	2.49
1	0	0	0	2369	
2	0	0	0	2361	
3	0	0	0	2360	
4	0	0	0	2360	
5	0	0	0	2359	
6	0	0	0	2357	
7	1	0	0	2356	
8	1	0	0	2352	
9	1	0	0	2348	
10	1	0	0	2345	
11	1	1	0	2344	
12	2	1	0	2342	
13	2	1	1	2338	
14	2	1	1	2337	
15	2	1	1	2335	
16	2	2	1	2332	
17	3	2	2	2322	
18	3	2	2	2319	
19	4	3	2	2313	
20	4	3	2	2310	
21	4	3	3	59	
22	4	3	3		
23	5	4	3		
24	5	4	3		
25	5	4	3		
26	5	4	4		
27	6	5	4		
28	6	5	4		
29	6	6	4		
30	7	6	4		
31	7	6	5		
32	8	7	5		
33	8	7	5		
34	9	8	6		
35	9	8	6		
36	9	9	6		
37	9	9	7		
38	10	9	7		

39		9	8
40		10	8
41			9
42			10



### Adsorben Karbon Aktif 3 gram

t (menit)	Tingkat Kejernihan			[CO] (ppm)	% Adsorpsi
	1	2	3		
0	0	0	0	2684	3.54
1	0	0	0	2683	
2	0	0	0	2678	
3	0	0	0	2673	
4	1	0	0	2671	
5	1	0	0	2669	
6	1	1	0	2663	
7	1	1	1	2661	
8	2	1	1	2660	
9	2	1	1	2656	
10	2	2	1	2654	
11	3	2	1	2651	
12	3	3	2	2649	
13	3	3	2	2641	
14	3	3	2	2638	
15	4	3	3	2637	
16	4	4	3	2627	
17	4	4	3	2615	
18	5	4	3	2604	
19	5	4	3	2596	
20	6	5	3	2589	
21	6	5	4	95	
22	6	5	4		
23	7	5	5		
24	7	6	5		
25	8	6	6		
26	8	6	6		
27	8	7	7		
28	9	7	7		
29	9	8	8		
30	9	8	8		
31	9	8	8		
32	9	9	8		
33	10	9	9		
34		9	9		
35		9	9		
36		10	9		
37			10		

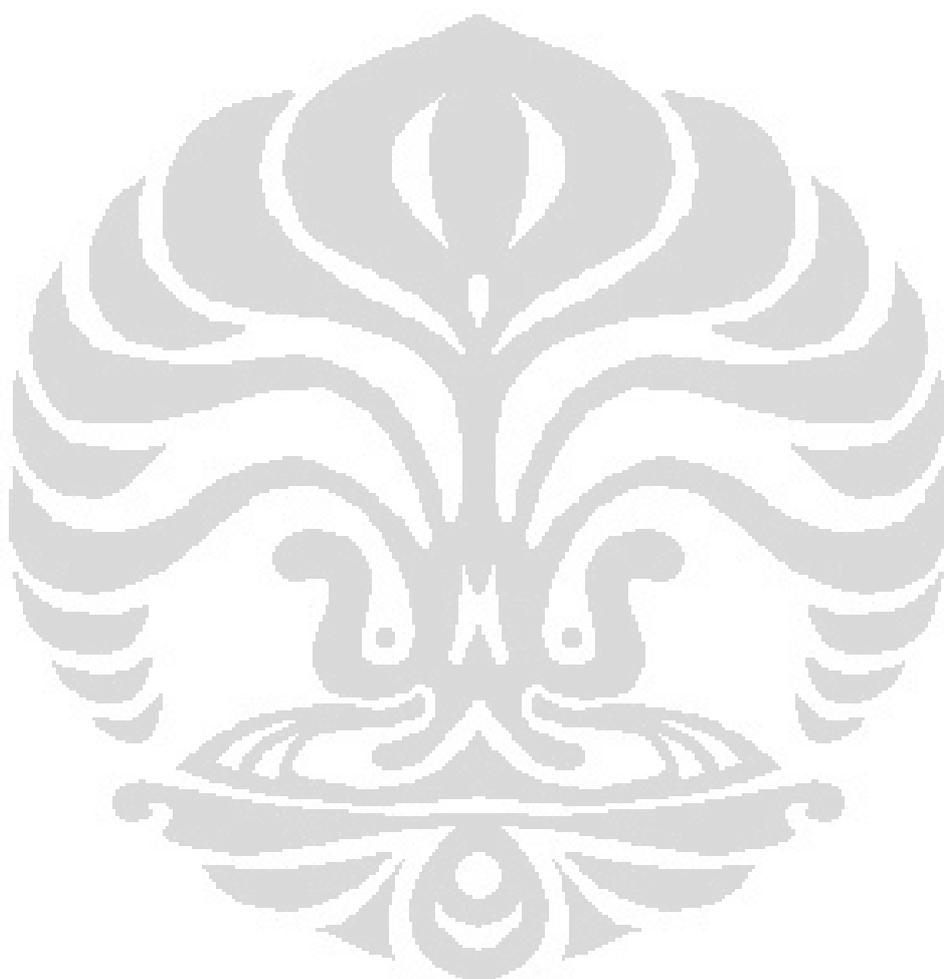
### Adsorben Karbon Aktif 5 gram

t (menit)	Tingkat Kejernihan			[CO] (ppm)	% Adsorpsi
	1	2	3		
0	0	0	0	2602	4.76
1	0	0	0	2601	
2	0	0	0	2599	
3	1	0	0	2596	
4	1	0	0	2592	
5	2	0	0	2589	
6	2	1	0	2586	
7	3	1	1	2580	
8	3	1	2	2571	
9	3	2	3	2569	
10	4	2	3	2558	
11	4	3	4	2552	
12	5	3	4	2538	
13	5	4	4	2529	
14	6	5	5	2520	
15	6	5	5	2507	
16	7	6	5	2496	
17	7	6	6	2492	
18	7	6	6	2487	
19	8	7	7	2481	
20	8	7	7	2478	
21	8	8	7	124	
22	8	8	8		
23	9	8	8		
24	9	8	8		
25	9	8	8		
26	9	9	9		
27	9	9	9		
28	10	9	9		
29		9	9		
30		9	9		
31		10	9		
32			10		

### Adsorben Karbon Aktif – TiO<sub>2</sub> 1 gram

t (menit)	Tingkat Kejernihan			[CO] (ppm)	% Adsorpsi
	1	2	3		
0	0	0	0	2137	3.04
1	0	0	0	2130	
2	0	0	0	2129	
3	0	0	0	2126	
4	0	0	0	2124	
5	1	0	0	2124	
6	1	0	0	2122	
7	1	0	0	2118	
8	1	0	0	2115	
9	1	1	0	2112	
10	1	1	0	2110	
11	2	1	0	2105	
12	2	1	0	2103	
13	2	1	1	2100	
14	2	1	1	2095	
15	2	2	1	2094	
16	2	2	1	2089	
17	3	2	2	2087	
18	3	2	2	2084	
19	4	3	2	2080	
20	4	3	2	2072	
21	4	4	3	65	
22	4	4	3		
23	5	4	3		
24	5	4	4		
25	5	5	4		
26	5	5	4		
27	6	6	4		
28	6	6	5		
29	6	6	5		
30	7	7	5		
31	7	7	6		
32	8	8	6		
33	8	8	6		
34	9	9	7		
35	9	9	8		
36	10	9	8		
37		10	9		
38			9		

39			9
40			10



### Adsorben Karbon Aktif – TiO<sub>2</sub> 3 gram

t (menit)	Tingkat Kejernihan			[CO] (ppm)	% Adsorpsi
	1	2	3		
0	0	0	0	2234	4.43
1	0	0	0	2233	
2	0	0	0	2229	
3	1	0	0	2227	
4	1	0	0	2224	
5	1	1	0	2220	
6	1	1	0	2216	
7	2	1	1	2214	
8	2	1	1	2210	
9	2	2	1	2203	
10	3	2	2	2201	
11	3	2	2	2194	
12	4	3	2	2190	
13	4	3	2	2185	
14	4	3	3	2181	
15	4	4	3	2176	
16	5	4	3	2167	
17	5	4	3	2159	
18	5	4	4	2151	
19	6	4	4	2142	
20	6	5	4	2135	
21	7	5	5	99	
22	7	5	5		
23	8	7	5		
24	8	7	6		
25	9	7	6		
26	9	8	7		
27	9	8	7		
28	10	9	8		
29		9	9		
30		9	9		
31		10	10		

### Adsorben Karbon Aktif – TiO<sub>2</sub> 5 gram

t (menit)	Tingkat Kejernihan			[CO] (ppm)	% Adsorpsi
	1	2	3		
0	0	0	0	2433	5.71
1	0	0	0	2431	
2	0	0	0	2428	
3	1	0	0	2421	
4	1	0	0	2413	
5	1	1	1	2398	
6	2	1	1	2395	
7	2	2	2	2391	
8	3	2	2	2385	
9	3	2	2	2380	
10	4	3	3	2374	
11	4	3	4	2369	
12	4	4	5	2361	
13	5	5	5	2354	
14	6	5	5	2346	
15	6	6	5	2337	
16	7	6	6	2330	
17	7	7	6	2323	
18	8	7	7	2316	
19	8	7	7	2308	
20	8	8	7	2294	
21	9	8	8	139	
22	9	9	9		
23	9	9	9		
24	10	9	9		
25	10	9	9		
26		10	10		