

# REKAYASA MASKER ANTI POLUTAN GAS BUANG KENDARAAN BERBASIS KATALIS KOMPOSIT TiO<sub>2</sub>-AC-ZAL-T

(MASK MODIFICATION FOR ANTI VEHICLE EXHAUST GAS POLLUTANT BASED ON TiO<sub>2</sub>-AC-ZAL-T COMPOSITE CATALYST)

Slamet, Ikha Muliawati, dan Muhamad Ibadurrohman

Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik-Universitas Indonesia  
Kampus UI, Depok

E-mail: [slamet@che.ui.ac.id](mailto:slamet@che.ui.ac.id)

Received : 8 Maret 2012; revised : 27 Maret 2012 accepted : 11 April 2012

## ABSTRAK

Katalis yang dibuat dari komposit titania, karbon aktif, dan zeolit alam Lampung (TiO<sub>2</sub>-AC-ZAL) telah berhasil disintesis dengan metode pencampuran mekanik untuk diaplikasikan sebagai bahan masker. Komposit TiO<sub>2</sub>-AC-ZAL dilapiskan ke alumunium foil dan serat nanas untuk diuji kinerjanya dalam mengeliminasi polutan CO, NO<sub>x</sub>, dan senyawa hidrokarbon (HC) secara simultan. Kinerja komposit dalam mendegradasi polutan tergantung dari komposisinya, dan komposisi terbaik untuk mengeliminasi ketiga polutan tersebut adalah TiO<sub>2</sub> 10,0% – AC 8,2% – ZAL – T 81,8%. Kinerja katalis semakin efektif seiring dengan bertambahnya jumlah komposit dalam masker (hingga 10 g). Pada penelitian ini, pengaruh konsentrasi awal polutan juga dipelajari dan diperoleh bahwa semakin tinggi konsentrasi awal polutan maka laju eliminasi polutan semakin besar, meskipun waktu yang dibutuhkan untuk mencapai ambang batas baku mutu lebih lama. Secara keseluruhan, hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa masker anti polutan yang direkayasa sudah cukup layak untuk mendegradasi polutan CO, NO<sub>x</sub>, dan HC secara simultan, sehingga potensi aplikasinya cukup menjanjikan.

Kata kunci : Masker anti polutan, CO, NO<sub>x</sub>, HC, Katalis komposit, TiO<sub>2</sub>-AC-ZAL

## ABSTRACT

*Catalyst based on titania, activated carbon, and Lampung natural zeolite (TiO<sub>2</sub>-AC-ZAL) composites have been successfully prepared by mechanical mixing methods to be applied as mask fabrics. As prepared TiO<sub>2</sub>-AC-ZAL composite was then coated on aluminum foil and pineapple leaf fiber surface, prior to performance test for elimination of CO, NO<sub>x</sub>, and HC (hydrocarbons) simultaneously. The performance of composite in degrading those pollutants depends on their composition, while TiO<sub>2</sub> 10.0% – AC 8.2% – ZAL – T 81.8% being the best elemental composition. Performance of catalyst increase as the number of composites in the mask (up to 10 g). In this study, effect of the initial concentration of the pollutants were also investigated. It was observed that higher initial concentration of pollutants would lead to faster degradation rate, although it required longer time to achieve the standard emission limit threshold. These overall results indicate that the mask designed in this study is feasible to degrade CO, NO<sub>x</sub>, and HC pollutants simultaneously. Therefore, we found that the potential application of the mask are promising.*

Key words : Anti pollutant mask, CO, NO<sub>x</sub>, HC, Composite catalyst, TiO<sub>2</sub>-AC-ZAL

## PENDAHULUAN

Polusi udara bukanlah suatu hal yang asing lagi di Indonesia, terutama di kota besar seperti Jakarta yang menempati urutan ketiga sebagai kota dengan tingkat polusi udara tertinggi di dunia setelah Meksiko dan Thailand. 70% polutan udara di kota Jakarta berasal dari sektor transportasi. Polutan yang dihasilkan dari sektor ini didominasi oleh gas buang kendaraan

seperti karbon monoksida (CO), oksida nitrogen (NO<sub>x</sub>), dan senyawa hidrokarbon (HC).

CO merupakan gas yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa. Jika CO terakumulasi secara simultan di dalam tubuh, maka manusia dapat mengalami gangguan denyut jantung, sesak nafas, nyeri dada, kerusakan janin, dan kerusakan otak. NO<sub>x</sub> juga

merupakan gas yang tidak berwarna dan bersifat toksik karena dapat menyebabkan sulit bernafas, infeksi paru paru, dan asma. HC yang biasanya berupa gas metana juga sangat berbahaya bagi kesehatan karena dapat menyebabkan leukimia dan kanker.

Untuk mengurangi risiko terkena penyakit yang disebabkan oleh polutan udara, masyarakat memerlukan masker. Secara umum, terdapat tiga jenis masker berdasarkan caranya mengeliminasi polutan udara yang masuk ke dalam tubuh, yaitu masker berprinsip filtrasi, adsorpsi, dan fotokatalisis. Pertama, masker berprinsip filtrasi, contohnya adalah masker medis (*surgical mask*) berbahan dasar kertas berpori khusus. Masker ini hanya dapat memfilter partikulat seperti debu dan yang sejenisnya. Kedua, masker berprinsip adsorpsi, seperti masker moncong babi yang menggunakan karbon aktif berdesain *fix bed* sebagai adsorbennya. Permasalahan dari masker ini adalah adsorben tidak dapat mendegradasi polutan karena adsorben hanya dapat memindahkan polutan dari udara ke dalam adsorben, sehingga adsorben pun menjadi cepat jenuh (Alfat 2009). Ketiga, masker berprinsip fotokatalisis yang dapat mendegradasi polutan gas berbahaya secara *in situ* sehingga masker dapat dipakai dalam jangka waktu yang cukup lama.

Akan tetapi, masker ini memiliki kelemahan yaitu daya adsorpsi fotokatalis terhadap polutan sangat rendah (Chun 2008, Durgakumari *et al.* 2002) sehingga polutan yang terdegradasi pun sedikit. Selain itu, desain *photocatalyst mask* mirip dengan masker medis sehingga waktu kontak antara polutan dengan fotokatalis juga masih relatif singkat, akibatnya degradasi polutan menjadi tidak maksimal.

Penelitian ini mencoba untuk merekayasa masker anti polutan yang dapat mengatasi kelemahan-kelemahan dari masker berprinsip adsorpsi dan fotokatalisis, dengan cara mensinergikan kedua mekanisme tersebut. Penggabungan mekanisme adsorpsi dan fotokatalisis dinyatakan dalam rekayasa material komposit (Chun 2008, Ichiura *et al.* 2002) yang terdiri dari fotokatalis ( $\text{TiO}_2$ ) dan adsorben (karbon aktif dan zeolit alam). Karbon aktif dipilih sebagai adsorben karena memiliki luas permukaan yang besar dan bersifat non-polar sehingga dapat mengadsorpsi senyawa non-polar seperti hidrokarbon (Amora *et al.* 2009). Adapun, zeolit alam Lampung juga dipilih sebagai adsorben karena ketersediaannya melimpah dan harganya murah (Suwardi dan Mulyanto 2010). Selain itu, zeolit juga bersifat polar sehingga dapat mengadsorpsi  $\text{NO}_x$  (Despres 2003) dan CO (Tezel and Apolonatos 1993).

Penelitian ini bertujuan mendapatkan komposisi optimal dari katalis komposit  $\text{TiO}_2$ -AC-ZAL-T untuk mendegradasi CO,  $\text{NO}_x$ , dan HC. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan mengetahui pengaruh berat komposit dan konsentrasi awal dari katalis komposit. Tujuan lainnya, yaitu didapatkannya desain masker anti polutan yang dapat mendukung degradasi polutan secara fotokatalitik, persamaan laju degradasi polutan, dan persamaan waktu degradasi polutan hingga mencapai batas baku mutu.

## BAHAN DAN METODE

### Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain zeolit alam Lampung (ZAL-T), air demineral, asam fluoride (HF) 2 %, asam klorida (HCl) 6M, ammonium klorida ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) 0,1M, natrium hidroksida (NaOH) 5%, asam nitrat ( $\text{HNO}_3$ ), dan tetraethoxyortho-silicate (TEOS)

### Metode

#### Treatment Zeolit Alam Lampung

Treatment zeolit alam Lampung (ZAL-T) ini diawali dengan mencuci 130 g ZAL dengan 300 mL air demineral sebanyak dua kali, lalu dilakukan penyaringan. Kemudian *slurry* zeolit hasil penyaringan dikeringkan dengan memasukkannya ke *furnace* pada suhu  $120^\circ\text{C}$  selama 2 jam. Setelah dikeringkan seluruh ZAL dimasukkan ke dalam 480 mL HF 2%, lalu campuran diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 10 menit. Kemudian ZAL dibilas dengan 5 L air demineral, lalu dilakukan penyaringan kembali. Setelah itu, campuran ZAL direfluks dengan HCl 6 M sebanyak 240 mL pada suhu  $90^\circ\text{C}$  selama 30 menit. ZAL kemudian dibilas dan disaring. Setelah itu, ZAL direndam dalam 480 mL  $\text{NH}_4\text{Cl}$  0,1 M selama 5 hari disertai pengadukan dengan *stirrer* selama 3 jam/hari. ZAL kemudian dibilas dan disaring lagi. Kemudian, tahapan terakhir adalah dengan mengkalsinasi ZAL selama 5 jam pada suhu  $500^\circ\text{C}$  di dalam *furnace*.

#### Treatment Serat Nanas

Treatment serat nanas dilakukan dengan membuat larutan NaOH 5% sebanyak 1600 mL. Kemudian sebanyak 80 g serat nanas direndam ke dalam larutan NaOH 5% selama 1 jam. Serat nanas kemudian dicuci dengan air demin. Setelah itu, serat nanas dikeringkan dengan *furnace* selama 24 jam pada suhu  $70^\circ\text{C}$ .

### Preparasi Katalis Komposit

Preparasi katalis komposit diawali dengan memasukkan sejumlah massa  $\text{TiO}_2$  ke dalam air demin dengan perbandingan berat total katalis komposit dan air demin adalah 1:10. Kemudian, campuran diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 15 menit. Campuran kemudian disonikasi selama 10 menit dengan intensitas 30%. Lalu, ke dalam campuran ditambahkan beberapa tetes  $\text{HNO}_3$  sampai pH-nya mencapai 3. Campuran kemudian kembali disonikasi selama 3 menit dengan intensitas 3%. Lalu, ke dalam campuran dimasukkan sejumlah massa AC dan ZAL. Campuran kemudian diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 15 menit. Setelah itu, dilakukan sonikasi kembali selama 10 menit. Kemudian ditambahkan 3 tetes tetraethoxyortho-silicate (TEOS) per 10 gram berat total katalis komposit ke dalam campuran. Terakhir, dilakukan sonikasi kembali selama 3 menit.

### Coating Katalis Komposit

Proses *coating* katalis komposit ini dilakukan pada dua substrat, yaitu ke aluminium foil dengan metode *spray coating* dan serat nanas dengan metode *dip coating*. Berikut adalah uraian tahapan keduanya.

#### Coating ke Aluminium Foil

Proses *coating* ini diawali dengan membagi *slurry* katalis komposit menjadi dua bagian. Bagian pertama digunakan untuk *spray coating* yang diencerkan sampai volume *slurry* mencapai 250 mL. Campuran kemudian diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 15 menit dan disonikasi selama 10 menit dengan intensitas 100%. Campuran kemudian diaduk ke dalam alat *spray coater*. Penyemprotan dilakukan secara cepat selama 5 kali berturut-turut pada aluminium foil, lalu dikeringkan dengan *dryer* selama 5 menit. Tahapan penyemprotan diulang sebanyak 7 kali. Setelah itu, aluminium foil dikeringkan di dalam *furnace* selama 2 jam pada suhu  $200^\circ\text{C}$ .

#### Coating ke Serat Nanas

Proses *coating* ini diawali dengan membagi *slurry* katalis komposit menjadi dua bagian. Bagian kedua digunakan untuk *dip coating*, yang diencerkan sampai volume 300 mL. Campuran kemudian diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 15 menit, lalu disonikasi selama 10 menit dengan intensitas 100%. Campuran kemudian dibagi menjadi dua bagian yang sama banyaknya lalu dituangkan ke dalam wadah aluminium. Setelah itu, serat dicelupkan ke dalam campuran katalis komposit selama 5 menit dengan kecepatan penurunan selama

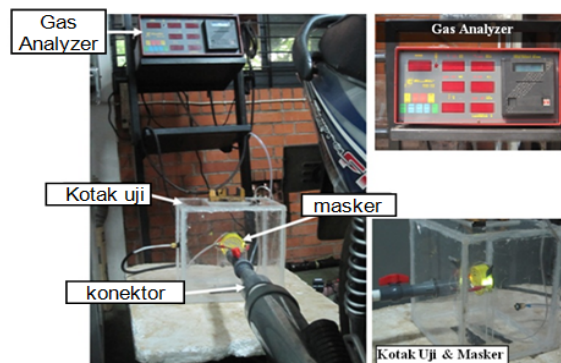
2 mm/s. Serat kemudian diangkat dengan kecepatan penaikan 2 mm/s, lalu serat dikeringkan dengan *dryer* selama 5 menit. Tahapan pencelupan ini diulang sampai 7 kali. Setelah itu, serat nanas dikeringkan di dalam *furnace* selama 12 jam pada suhu  $70^\circ\text{C}$ .

### Uji Kinerja Masker

Alat-alat yang digunakan pada uji kinerja masker dapat dilihat pada Gambar 1.

Proses uji kinerja masker ini diawali dengan memasukkan masker yang akan diuji dan menutup kotak uji dengan lem mati. *Ball valve* pada saluran konektor kemudian dibuka.

*Gas analyzer* dinyalakan dan didiamkan selama 30 menit hingga kinerja analisis *analyzer* telah stabil. Kemudian, *Ball valve* pada saluran konektor kemudian ditutup. Sejumlah polutan dari asap kendaraan bermotor dimasukkan ke dalam kotak uji. Kemudian, konsentrasi awal polutan  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , dan  $\text{HC}$  dibaca dengan menekan tombol (X) pada *analyzer*. Angka konsentrasi polutan yang terbaca dicatat setelah menunggu sampai 15 detik. Pompa *gas analyzer* kemudian dimatikan dengan menekan tombol (O) untuk menghindari kevakuman kotak uji.



Gambar 1. Uji kinerja masker

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakterisasi Katalis Komposit dan Zeolit Alam Hasil Treatment

#### Karakterisasi dengan XRF

Dari Tabel 1, dapat dilihat bahwa zeolit alam Lampung *treatment* (ZAL-T) terdiri dari beberapa senyawa kimia dengan  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sebagai penyusun utamanya, yaitu 94,77% untuk silika dan 3,41% untuk alumina. Untuk mengetahui lebih lengkapnya komposisi kimia ZAL-T dapat dilihat pada Tabel 1.

Dari Tabel 1, dapat dihitung rasio Si/Al dari ZAL-T yaitu 27,79. Proses *treatment* pada zeolit alam Lampung, ternyata berhasil meningkatkan secara signifikan rasio Si/Al zeolit

alam yaitu dari 6,8 menjadi 27,79. Hal ini terutama diakibatkan oleh adanya proses dealuminasi dengan larutan HCl dalam rangkaian proses *treatment* zeolit alam Lampung.

Tabel 1. Hasil karakterisasi XRF pada ZAL-T

Formula kimia	% Berat	Formula kimia	% Berat
Al	3,0489	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,4103
Si	92,413	SiO <sub>2</sub>	94,7729
K	1,3587	K <sub>2</sub> O	0,4933
Ca	0,9045	CaO	0,3753
Ti	0,3785	TiO <sub>2</sub>	0,1838
Fe	1,8964	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,7644

### Karakterisasi dengan XRD

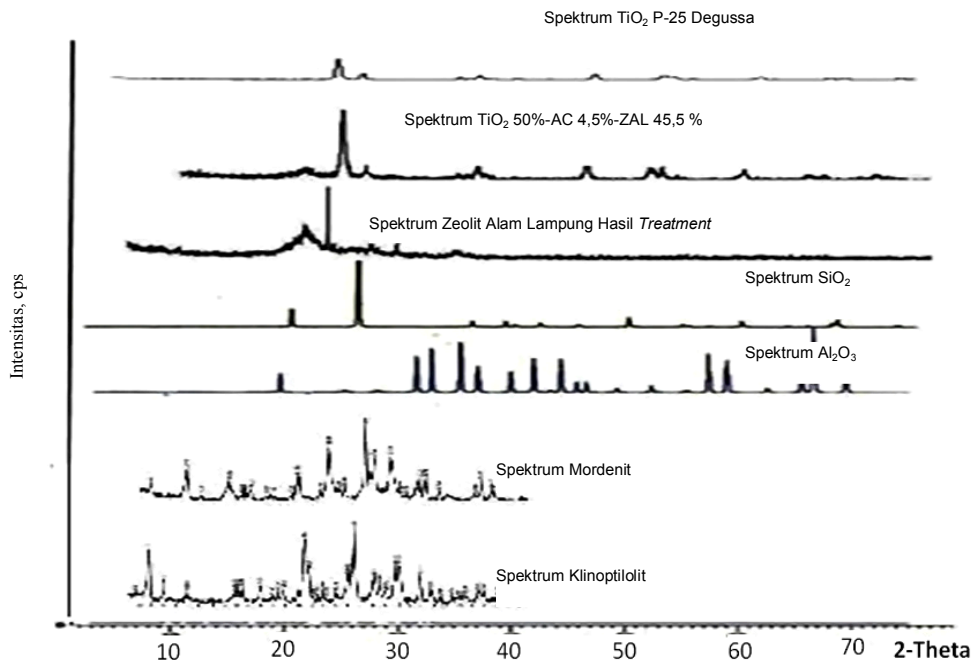
Pada Gambar 2, yaitu pada spektrum TiO<sub>2</sub> 50%-AC 4,5 %-ZAL 45,5 % terlihat bahwa *peak* yang muncul di area  $\theta \geq 25^\circ$  adalah *peak* milik TiO<sub>2</sub>. Hal ini dapat dibuktikan dengan membandingkan *peak* tersebut dengan *peak* referensi pada spektrum TiO<sub>2</sub> P-25 Degussa pada Gambar 2. Pada TiO<sub>2</sub> P-25 Degussa, *peak* yang muncul adalah *peak* anatase yang karakteristiknya berada pada sudut difraksi (2-Theta) 25,4°, 38,1°, 48,2°, 53,9°, 55,1° (Dharma 2011).

Pada Gambar 2, yaitu pada spektrum TiO<sub>2</sub> 50%-AC 4,5 %-ZAL 45,5 % terlihat adanya *peak* yang muncul di area  $2\theta = 23^\circ$ . *Peak* tersebut

bukanlah milik TiO<sub>2</sub> karena TiO<sub>2</sub> P-25 Degussa tidak memiliki *peak* di  $2\theta = 23^\circ$ . Karena struktur AC bukanlah kristal, dapat disimpulkan bahwa *peak* yang muncul pada katalis komposit TiO<sub>2</sub>-AC-ZAL di area  $2\theta = 23^\circ$  adalah *peak* milik ZAL. Telah diketahui bahwa pada zeolit alam akan muncul *peak* pada sudut difraksi 10°, 23°, dan 30° (Hunger *et al.* 2010). Hal ini dapat dibuktikan dengan spektrum Zeolit Alam Lampung hasil *treatment*. Pada Gambar 2, yaitu pada spektrum zeolit alam Lampung hasil *treatment* terlihat adanya *peak-peak* yang muncul di 2-Theta 20°-23°, 30°, 36°.

Jika dibandingkan dengan spektrum referensi klinoptilolit dan mordenit, maka spektrum zeolit alam Lampung memiliki karakteristik *peak* tertinggi yang sama dengan dengan klinoptilolit. Berdasarkan referensi juga telah dinyatakan bahwa zeolit alam yang memiliki *peak* pada 10°, 23°, dan 30° adalah zeolit dengan struktur klinoptilolit (Tezel and Apolonatos 1993).

Dapat disimpulkan bahwa zeolit alam Lampung yang digunakan adalah zeolit berstruktur klinoptilolit. Kemudian untuk *peak* yang muncul di Theta 20°-23° dan 36° juga menunjukkan bahwa ZAL-T yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kristal SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang tidak lain merupakan komponen penyusun utama dari zeolit.



Gambar 2. Hasil karakterisasi XRD

**Karakterisasi dengan BET**

Dengan karakterisasi *BET*, dapat diketahui luas permukaan masing-masing komponen penyusun katalis komposit, yaitu TiO<sub>2</sub>, karbon aktif (AC), dan zeolit alam Lampung hasil *treatment* (ZAL-T). Selain itu, juga dapat dibandingkan luas permukaan masing-masing komponen dengan luas permukaan katalis komposit yang diperoleh. Berikut ini dapat dilihat perbandingannya pada Tabel 2.

Tabel 2. Luas permukaan katalis komposit dan komponen penyusunnya

Jenis material	Luas permukaan (m <sup>2</sup> /g)	Diameter pori (Å)
Komposit TiO <sub>2</sub> -AC-ZAL	45,50 <sup>a</sup>	112,90 <sup>a</sup>
TiO <sub>2</sub>	53,60 <sup>b</sup>	69 <sup>b</sup>
AC	670 <sup>c</sup>	0-20 <sup>c</sup>
ZAL-T	58,53 <sup>d</sup>	92,48 <sup>d</sup>

<sup>a,d</sup> Hasil karakterisasi BET dari Lab RPKA, Teknik Kimia UI

<sup>b</sup> Sumber: Widyanto, 2009

<sup>c</sup> Sumber: Deming, 2011

Komposit yang dianalisis dengan *BET* ini adalah komposit dengan komposisi TiO<sub>2</sub> 10%, AC 8,2%, dan ZAL-T 81,8%. Dari Tabel 2, dapat diketahui perubahan luas permukaan dari tiap-tiap komponen, yaitu TiO<sub>2</sub>, AC, dan ZAL-T ketika ketiganya dicampur menjadi suatu komposit. Data pada Tabel 2 tersebut menunjukkan bahwa luas permukaan dari katalis komposit menjadi lebih kecil dibandingkan dengan komponen-komponen penyusunnya.

Hasil karakterisasi *BET* yang didapat tidak sesuai dengan teori bahwa multikomponen dalam suatu komposit akan membuat partikel dari masing-masing komponen akan saling menempel, dan luas permukaan pun bertambah (Durgakumari *et al.* 2002). Seharusnya luas permukaan dari komposit minimal lebih besar dari luas permukaan terkecil dari komponennya yaitu TiO<sub>2</sub> sebesar 53,60 m<sup>2</sup>/g. Fenomena penurunan luas permukaan pada komposit ini disebabkan karena adanya proses *thermal treatment* yang dilakukan saat sintesis katalis komposit.

**Karakterisasi dengan SEM dan EDX**

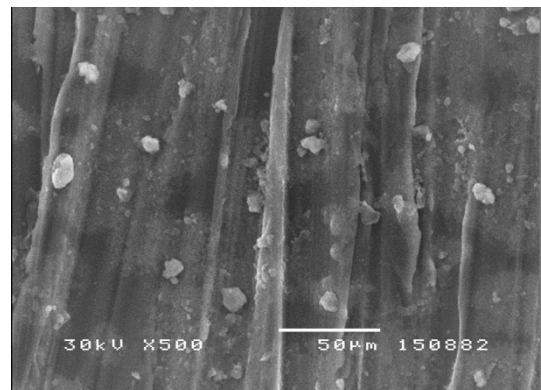
Karakterisasi *SEM* digunakan untuk melihat morfologi permukaan pada penyangga yaitu aluminium dan serat nanas yang dilapisi oleh katalis komposit TiO<sub>2</sub>-AC-ZAL, sedangkan karakterisasi EDX digunakan untuk mengetahui kandungan unsur yang terdapat dalam komposit yang telah di-*coating* ke penyangga. Dalam

penelitian ini, EDX dilakukan pada aluminium foil yang telah di-*coating* dengan komposit TiO<sub>2</sub> 10%-AC 8,2%-ZAL 81,8%.

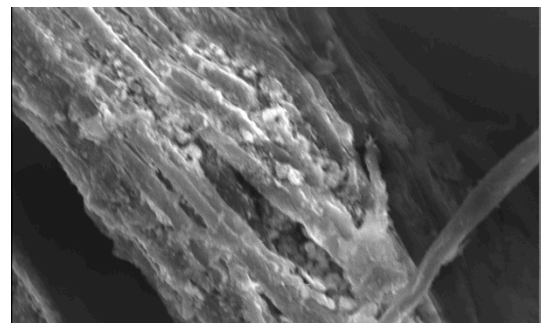
Berdasarkan Tabel 3 dan Gambar 3, dapat dilihat bahwa proses katalis komposit telah berhasil ter-*coating* ke aluminium foil (Gambar 3a) dengan *spray coating*. Kemudian komposit juga berhasil di-*coating* ke serat nanas (Gambar 3b) dengan *dip coating*. Dengan metode *dip coating*, katalis komposit berhasil ter-*coating* pada fibril-fibril serat nanas baik pada fibril bagian luar maupun pada fibril yang ada di bagian dalam.

Tabel 3. Hasil EDX pada aluminium foil

Jenis atom	Jumlah atom hasil EDX (%)			
	Area 1	Area 2	Area 3	Rata-rata
C	0,61	0,62	0,68	0,64
O	51,88	29,77	34,11	38,59
Al	5,16	45,42	35,17	28,58
Si	36,25	21,13	26,36	27,91
Ti	5,69	2,80	3,44	3,98



(a)



(b)

Gambar 3. Hasil karakterisasi SEM katalis komposit yang tercoating pada penyangga; (a) aluminium foil dengan perbesaran 500 x (b) serat nanas dengan perbesaran 2000x.

## Pengaruh Keberadaan Adsorben dan Fotokatalis

Dalam penelitian ini, mekanisme yang diharapkan dapat mengeliminasi polutan adalah pada percobaan ini dibandingkan besar eliminasi polutan oleh keduanya. Hasil pengujian tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.

### Polutan CO

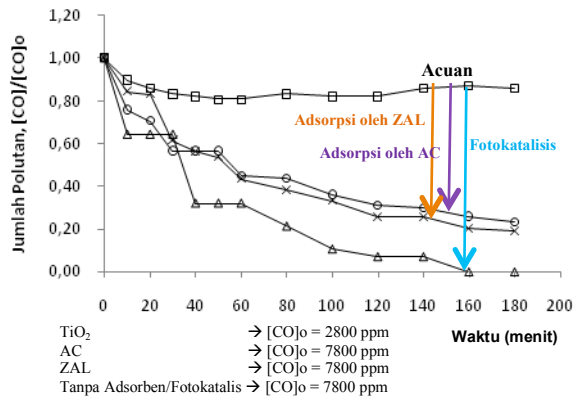
Berdasarkan Gambar 4a, dapat disimpulkan bahwa ternyata keberadaan adsorben dan fotokatalis sangat berpengaruh dalam mengeliminasi polutan CO. Hal ini dapat dilihat dengan cara membandingkan kurva "Tanpa Adsorben & Tanpa Fotokatalis" dengan tiga kurva lainnya yang melibatkan adsorben dan fotokatalis.

Dari Gambar 4a, terlihat bahwa mekanisme yang paling efektif dalam mengeliminasi polutan CO adalah secara fotokatalitik. Dari Gambar 4a, juga dapat diketahui bahwa kinerja AC dan ZAL tidak jauh berbeda dalam mengeliminasi polutan CO, bahkan kinerja ZAL terlihat sedikit lebih baik dibanding AC. Hal ini membuktikan keberhasilan *treatment* ZAL dalam meningkatkan rasio Si/Al sehingga dapat mengadsorpsi CO dengan baik. AC dapat

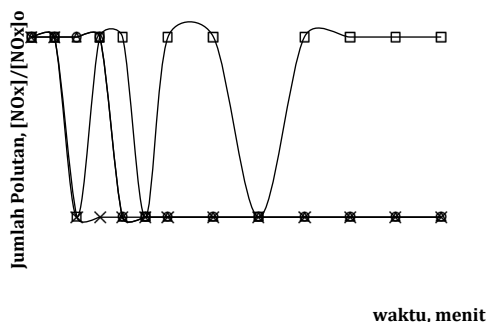
mengadsorpsi CO yang adalah senyawa polar dengan baik karena AC merupakan adsorben polar.

### Polutan NO<sub>x</sub>

CO dan NO<sub>x</sub> sama-sama polar, sehingga sesuai dengan teori akan lebih tertarik dengan adsorben polar seperti zeolit alam Lampung. Hal ini ditunjukkan oleh kurva "ZAL" yang lebih cepat mengeliminasi NO<sub>x</sub>, yaitu sudah nol pada menit ke-20, dibanding dengan "TiO<sub>2</sub>" dan "AC" yang baru mencapai titik nol di menit ke-40 (Gambar 4b). Fenomena yang ditunjukkan oleh kurva "ZAL" sejalan dengan hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang menyatakan bahwa zeolit merupakan adsorben yang memiliki performa sangat baik dalam mengadsorpsi NO<sub>x</sub> (Iman *et al.* 2011, Macala and Pandova 2007, Panov *et al.* nd). Kemudian, fenomena yang ditunjukkan oleh kurva TiO<sub>2</sub> juga diperkuat dengan teori bahwa konsentrasi NO<sub>x</sub> yang kecil menyebabkan potensi bertemunya molekul gas NO<sub>x</sub> dengan radikal hidroksil semakin rendah (Ao and Lee 2005).

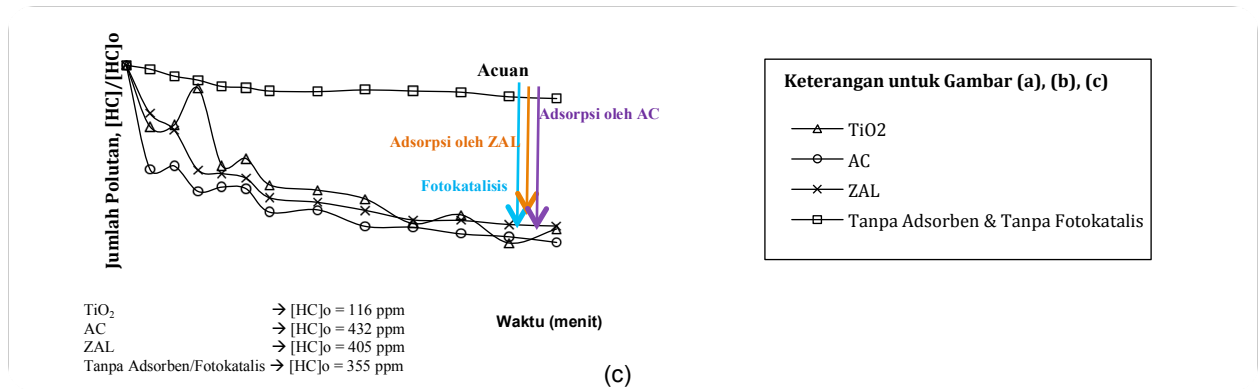


Treatment	Initial Concentration [NO <sub>x</sub> ] <sub>0</sub> (ppm)
TiO <sub>2</sub>	→ [NO <sub>x</sub> ] <sub>0</sub> = 4 ppm
AC	→ [NO <sub>x</sub> ] <sub>0</sub> = 4 ppm
ZAL	→ [NO <sub>x</sub> ] <sub>0</sub> = 4 ppm
Tanpa Adsorben/Fotokatalis	→ [NO <sub>x</sub> ] <sub>0</sub> = 4 ppm



(a)

(b)



Gambar 4. Pengaruh adsorben dan fotokatalis pada eliminasi polutan (a) CO, (b) NO<sub>x</sub>, dan (c) HC

Dari Gambar 4c juga kita dapat melihat perbandingan kurva “AC” dan “ZAL” yang tidak jauh berbeda. Hal ini juga menguatkan indikasi bahwa zeolit yang telah di-*treatment* juga telah berhasil mengadsorpsi polutan non-polar dengan baik, dan kinerja ZAL dalam mengadsorpsi hidrokarbon (HC) juga tidak kalah dengan karbon aktif. Performa ZAL juga cukup baik dalam mengadsorpsi HC<sub>x</sub>, sedangkan kemampuan zeolit mengadsorpsi HC<sub>x</sub> juga cukup baik (Muzara and Jacobus 2004).

**Pengaruh Komposisi Katalis Komposit terhadap Eliminasi Polutan**

Untuk mengetahui pengaruh komposisi katalis komposit (keterangan lihat Tabel 4)

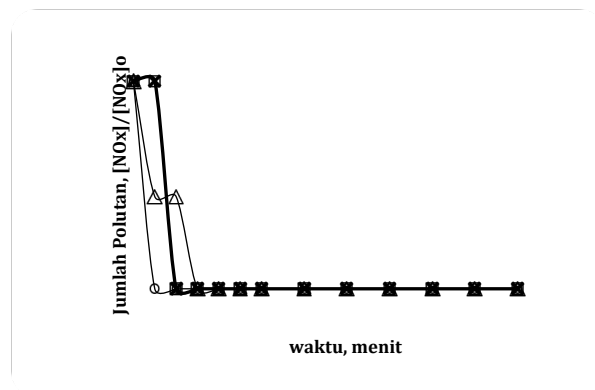
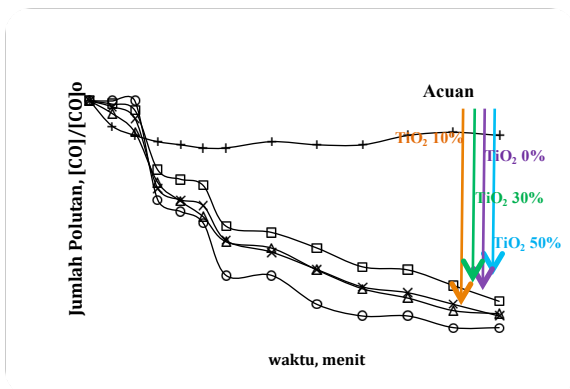
terhadap eliminasi polutan, maka pada percobaan ini dibandingkan banyaknya polutan yang dapat dieliminasi pada berbagai variasi katalis komposit. Hasil pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 5.

**Polutan CO**

Menurut Gambar 5a diketahui bahwa katalis komposit yang terbaik untuk mengeliminasi polutan adalah katalis komposit dengan komposisi TiO<sub>2</sub> 10%-AC 8,2%-ZAL 81,8%. Namun, hal tersebut bukan berarti bahwa katalis komposit dengan komposisi TiO<sub>2</sub> 10%-AC 8,2%-ZAL 81,8% adalah komposisi yang paling optimal dalam mengeliminasi polutan CO.

Tabel 4. Penotasian katalis komposit berdasarkan komposisinya

Notasi katalis komposit	Arti notasi
TiO <sub>2</sub> 0 %-AC 9,1%-ZAL 90,9%	Komposit hanya terdiri dari 9,1 g (9,1% wt) AC; dan 90,9 g (90,9% wt) ZAL
TiO <sub>2</sub> 10 %-AC 8,2%-ZAL 81,8%	Komposit terdiri dari 1 g (10% wt) TiO <sub>2</sub> ; 0,82 g (8,2% wt) AC; dan 8,18 g (81,8% wt) ZAL
TiO <sub>2</sub> 30 %-AC 6,4%-ZAL 64,6%	Komposit terdiri dari 3 g (10% wt) TiO <sub>2</sub> ; 0,64 g (8,2% wt) AC; dan 6,46 g (81,8% wt) ZAL
TiO <sub>2</sub> 50 %-AC 4,5%-ZAL 45,5%	Komposit terdiri dari 5 g (10% wt) TiO <sub>2</sub> ; 0,45 g (4,5% wt) AC; dan 4,55 g (45,5% wt) ZAL

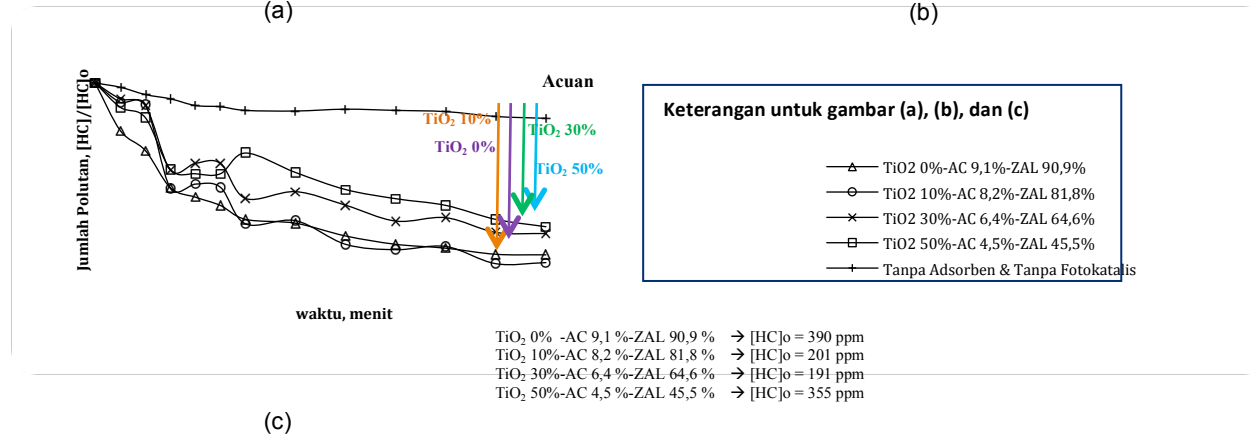


TiO<sub>2</sub> 0% -AC 9,1 %-ZAL 90,9 % → [CO]<sub>o</sub> = 7800 ppm  
 TiO<sub>2</sub> 10%-AC 8,2 %-ZAL 81,8 % → [CO]<sub>o</sub> = 4200 ppm  
 TiO<sub>2</sub> 30%-AC 6,4 %-ZAL 64,6 % → [CO]<sub>o</sub> = 4200 ppm  
 TiO<sub>2</sub> 50%-AC 4,5 %-ZAL 45,5 % → [CO]<sub>o</sub> = 7800 ppm

TiO<sub>2</sub> 0% -AC 9,1 %-ZAL 90,9 % → [NO<sub>x</sub>]<sub>o</sub> = 4 ppm  
 TiO<sub>2</sub> 10%-AC 8,2 %-ZAL 81,8 % → [NO<sub>x</sub>]<sub>o</sub> = 4 ppm  
 TiO<sub>2</sub> 30%-AC 6,4 %-ZAL 64,6 % → [NO<sub>x</sub>]<sub>o</sub> = 4 ppm  
 TiO<sub>2</sub> 50%-AC 4,5 %-ZAL 45,5 % → [NO<sub>x</sub>]<sub>o</sub> = 4 ppm

(a)

(b)



TiO<sub>2</sub> 0% -AC 9,1 %-ZAL 90,9 % → [HC]<sub>o</sub> = 390 ppm  
 TiO<sub>2</sub> 10%-AC 8,2 %-ZAL 81,8 % → [HC]<sub>o</sub> = 201 ppm  
 TiO<sub>2</sub> 30%-AC 6,4 %-ZAL 64,6 % → [HC]<sub>o</sub> = 191 ppm  
 TiO<sub>2</sub> 50%-AC 4,5 %-ZAL 45,5 % → [HC]<sub>o</sub> = 355 ppm

(c)

Gambar 5. Pengaruh komposisi katalis komposit pada eliminasi polutan (a) CO, (b) NO<sub>x</sub>, (c) HC

Berikutnya dari Gambar 5a juga dapat diketahui bahwa kinerja komposit yang hanya melibatkan adsorben saja itu sama dengan kinerja komposit yang melibatkan fotokatalis dan adsorben pada komposisi TiO<sub>2</sub> 30%-AC 6,4%-ZAL 64,6%. Artinya penambahan *loading* TiO<sub>2</sub> > 30% pada katalis komposit tidak akan berpengaruh dalam meningkatkan persen eliminasi polutan CO. Hal ini juga sesuai dengan teori bahwa pada level tertentu *loading* TiO<sub>2</sub>

tidak akan berpengaruh dalam peningkatan laju fotodegradasi (Durgakumari *et al.* 2002).

### Polutan NO<sub>x</sub>

Berdasarkan Gambar 5b, diketahui bahwa komposit yang paling baik kinerjanya dalam mengeliminasi polutan NO<sub>x</sub> adalah katalis komposit dengan komposisi TiO<sub>2</sub> 10%-AC 8,2%-ZAL 81,8%. Mekanisme fotokatalisis bersinergi dengan mekanisme adsorpsi dalam



mengelminasi polutan (Matos *et al.* 2010). Dengan adanya mekanisme fotokatalisis, maka polutan yang teradsorb di adsorben dapat segera didegradasi, sehingga daya adsorpsi dari adsorben pun tidak akan menurun. Akibatnya, laju eliminasi oleh katalis komposit lebih cepat dibanding dengan eliminasi oleh adsorben saja.

Berdasarkan tren grafik yang terdapat pada Gambar 5b, dapat disimpulkan bahwa ternyata komposit dengan *loading* (jumlah) TiO<sub>2</sub> yang paling sedikit memiliki kinerja yang semakin baik. Semakin banyak *loading* TiO<sub>2</sub> dalam katalis komposit ternyata tidak dapat menambah efektivitas katalis komposit tersebut dalam mengeliminasi polutan NO<sub>x</sub>.

**Polutan HC**

Dari Gambar 5c terlihat secara jelas terdapat dua macam komposit yang unggul dalam mengeliminasi polutan hidrokarbon, yaitu komposit yang hanya terdiri dari adsorben saja, atau komposit TiO<sub>2</sub> 0%-AC 9,1%-ZAL 90,9% dan komposit yang terdiri dari campuran adsorben dan fotokatalis dengan komposisi TiO<sub>2</sub> 10%-AC 8,2%-ZAL 81,8%. Hal ini dapat dilihat dari kedua kurva komposit tersebut yang hampir berhimpitan setelah menit ke 60.

Fenomena kedua kurva ini juga dapat menggambarkan mekanisme eliminasi yang terjadi dalam proses eliminasi polutan hidrokarbon. Jika diamati, tren kurva katalis komposit “TiO<sub>2</sub> 10%-AC 8,2%-ZAL 81,8%” pada *range* waktu  $0 \leq t < 30$  menit memiliki penurunan konsentrasi yang tidak signifikan dibanding dengan kurva “TiO<sub>2</sub> 0%-AC 9,1%-ZAL 90,9%”, sampai akhirnya kedua kurva ini mencapai tingkat eliminasi polutan yang sama pada menit ke-30.

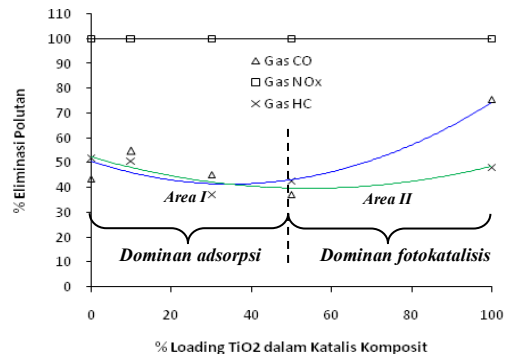
Hal ini membuktikan bahwa mekanisme fotokatalitik sangat berperan untuk meningkatkan kinerja komposit dalam mengeliminasi polutan dalam waktu yang lama, sedangkan mekanisme adsorpsi menjadi mekanisme utama yang berperan dalam mengeliminasi polutan pada menit-menit awal.

**Penentuan Loading TiO<sub>2</sub> Optimal untuk Eliminasi Polutan**

Berdasarkan Gambar 6, dapat dilihat pengaruh dari *loading* TiO<sub>2</sub> pada katalis komposit untuk setiap gas polutan. Terlihat dari *trendline* kurva “Gas CO” (lihat kurva berwarna merah) dan kurva “Gas HC” (lihat kurva berwarna hijau) bahwa ternyata kinerja katalis komposit tidak dipengaruhi oleh *loading* TiO<sub>2</sub>.

Berdasarkan bentuk grafik pada Gambar 6, dapat dinyatakan bahwa semakin banyak persentase adsorben dibanding fotokatalis pada katalis komposit, maka

mekanisme eliminasi yang lebih dominan adalah adsorpsi yang ditunjukkan oleh Area I pada Gambar 6, sedangkan jika persentase fotokatalis lebih banyak dibanding adsorben, maka mekanisme yang lebih dominan adalah fotokatalisis yang ditunjukkan oleh Area II pada Gambar 6 (Durgakumari *et al.* 2002).



Gambar 6. Grafik pengaruh loading TiO<sub>2</sub> pada katalis komposit terhadap % eliminasi polutan

Jika titik puncak minimum dari masing-masing *trendline* disebut sebagai *lowest performance point* (LPP), maka titik tersebut adalah titik yang menunjukkan komposit dengan komposisi yang paling tidak optimal. Namun, LPP bisa menjadi komposisi optimal komposit ketika aspek kesehatan dan *lifetime* ikut dipertimbangkan. Jika, masker hanya terdiri dari adsorben saja, tentu polutan tidak akan dapat terdegradasi.

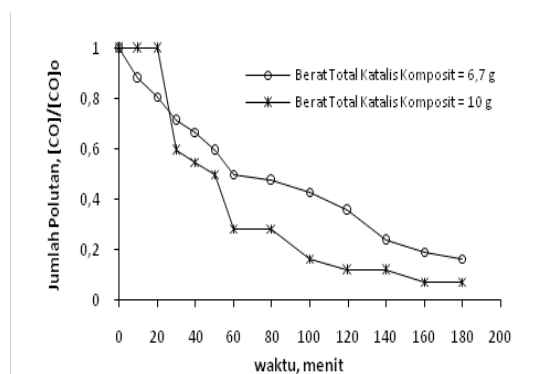
Kemudian, masker yang berupa komposit dari fotokatalis dan adsorben akan memiliki *lifetime* yang lebih lama karena polutan yang teradsorb dapat segera didegradasi oleh fotokatalis, sehingga adsorben pun menjadi tidak cepat jenuh, dan *lifetime* masker pun menjadi lebih lama.

**Pengaruh Berat Total Katalis Komposit terhadap Eliminasi Polutan**

Dalam penelitian ini, juga dilakukan uji kinerja katalis komposit dengan variasi berat katalis. Katalis komposit yang digunakan adalah TiO<sub>2</sub> 10%-AC 8,2%-ZAL 81,8%. Ada dua variasi berat katalis yang digunakan yaitu 6,7 gram dan 10 gram. Dari Gambar 7, dapat disimpulkan bahwa semakin berat katalis komposit yang digunakan maka semakin meningkat kinerja katalis komposit tersebut dalam mengeliminasi polutan.

Hal ini berhubungan dengan mekanisme itu sendiri, sampai batas tertentu, semakin berat katalis komposit, maka TiO<sub>2</sub>, AC, dan ZAL yang melekat pada penyangga, yaitu aluminium foil

dan serat nanas, juga akan semakin banyak. Dengan demikian, agen pengeliminasi polutan, baik itu adsorben maupun fotokatalis juga akan semakin banyak.



Gambar 7. Konsentrasi awal polutan CO untuk masing-masing katalis dibuat sama yaitu 4200 ppm.

Jumlah adsorben yang semakin banyak akan meningkatkan luas permukaan sehingga daya adsorpsi pun semakin meningkat. Begitu juga dengan fotokatalis, semakin banyak fotokatalisnya maka *hole* dan radikal hidroksi yang dihasilkan juga akan semakin banyak. Kedua mekanisme eliminasi ini akan saling bersinergi sehingga dapat meningkatkan persentase eliminasi polutan.

### Pengaruh Konsentrasi Awal Polutan terhadap Eliminasi Polutan

Untuk mengetahui pengaruh konsentrasi awal polutan terhadap eliminasi polutan, maka pada percobaan ini dibandingkan banyaknya polutan yang tereliminasi pada berbagai variasi konsentrasi awal polutan. Hasil pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 8.

Berdasarkan Gambar 8, terlihat bahwa semakin banyak konsentrasi awal, maka % eliminasinya pun semakin banyak. Hal ini menunjukkan adanya mekanisme dominan yang membantu peningkatan % eliminasi polutan ketika jumlah polutan itu semakin banyak. Karakteristik eliminasi seperti ini merupakan

karakteristik yang dimiliki oleh adsorpsi. Laju adsorpsi suatu gas pada adsorben padatan dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya luas permukaan dari adsorben, sifat dari gas yang akan diadsorb, temperatur, dan tekanan. Dari keempat faktor tersebut, yang berkaitan langsung dengan jumlah polutan adalah tekanan. Ketika jumlah polutan semakin meningkat, maka tekanan juga akan meningkat. Pada temperatur yang konstan, maka adsorpsi gas juga akan semakin meningkat seiring dengan kenaikan tekanan. Kemudian, pada temperatur yang rendah, misalnya temperatur ruang, dengan kenaikan sedikit tekanan saja mampu meningkatkan adsorpsi gas dengan sangat signifikan.

### Kinetika Reaksi Degradasi CO, NO<sub>x</sub>, dan HC secara Fotokatalitik

Mekanisme degradasi polutan CO, NO<sub>x</sub>, dan HC mengikuti mekanisme Langmuir-Hinselwood (Hwang *et al.* 2003, Kachina and Anna 2008, Hunger *et al.* 2010) seperti pada persamaan 1.

$$r = -\frac{dC}{dt} = \frac{kKC}{1 + KC} \quad (1)$$

Untuk mendapatkan persamaan kinetik eliminasi polutan, nilai  $r_0$  dihitung untuk setiap konsentrasi awal polutan. Berdasarkan data eliminasi polutan pada setiap konsentrasi awal polutan, dapat diregresi grafik seperti pada Gambar 7 dalam bentuk persamaan 2.

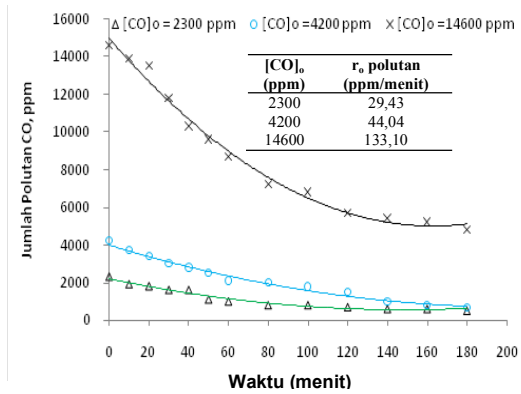
$$y = a_1x^n + a_2x^{n-1} + \dots + a_4x + a_5 \quad (2)$$

Jika persamaan 2 diturunkan akan menjadi:

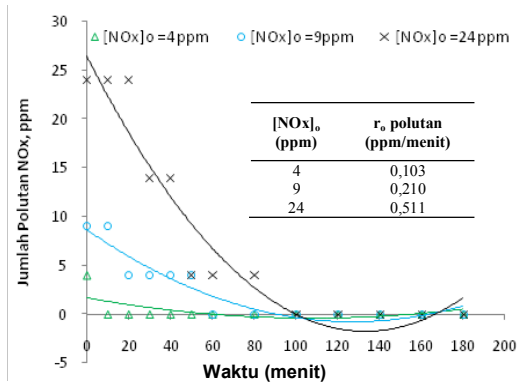
$$\frac{dy}{dx} = na_1x^{n-1} + (n-1)a_2x^{(n-2)} + \dots + a_4 \quad (3)$$

Karena sumbu y pada grafik adalah C (konsentrasi), sedangkan sumbu x pada grafik adalah t (waktu), maka persamaan 2 akan menjadi sama dengan persamaan 4 berikut:

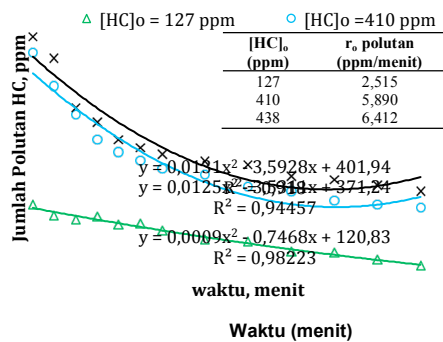
$$\frac{dC}{dt} = na_1t^{n-1} + (n-1)a_2t^{(n-2)} + \dots + a_4 \quad (4)$$



(a)



(b)



(c)

Jenis Polutan	[C] <sub>0</sub> (ppm)	Persamaan kurva regresi	R <sup>2</sup>
CO	2300	[CO] = 0,180 t <sup>2</sup> - 29,43 t + 2286	0,976
	4200	[CO] = 0,256 t <sup>2</sup> - 44,04 t + 4153	0,991
	14600	[CO] = 0,532 t <sup>2</sup> - 133,1 t + 15108	0,990
NOx	4	[NOx] = - 4.10 <sup>-6</sup> t <sup>3</sup> + 0,001 t <sup>2</sup> - 0,103 t + 2,428	0,574
	9	[NOx] = - 3.10 <sup>-6</sup> t <sup>3</sup> + 0,001 t <sup>2</sup> - 0,210 t + 9,415	0,912
	24	[NOx] = - 5.10 <sup>-6</sup> t <sup>3</sup> + 0,002 t <sup>2</sup> - 0,511 t + 27,55	0,931
HC	127	[HC] = 0,055 t <sup>2</sup> - 6,412 t + 436	0,981
	410	[HC] = 0,047 t <sup>2</sup> - 5,890 t + 399,8	0,988
	438	[HC] = 2.10 <sup>-10</sup> t <sup>6</sup> - 1.10 <sup>-7</sup> t <sup>5</sup> + 2.10 <sup>-5</sup> t <sup>4</sup> - 0,002 t <sup>3</sup> + 0,101 t <sup>2</sup> - 2,515 t + 125,9	0,989

Gambar 8. Grafik C vs t pada setiap konsentrasi awal gas (a) CO, (b) NOx, dan (c) HC

Untuk menghitung r<sub>0</sub>, nilai t pada persamaan 4 harus disubstitusi dengan 0, sehingga nilai r<sub>0</sub> yang didapat akan sama dengan nilai -a<sub>4</sub> (lihat persamaan 1).

$$\frac{1}{r} = \left( \frac{1}{kK} \right) \left( \frac{1}{C} \right) + \left( \frac{1}{k} \right) \quad (5)$$

Dengan menggunakan persamaan 5 yang dimodifikasi dari persamaan 1, maka nilai nilai k (konstanta kesetimbangan laju reaksi) dan K (konstanta adsorpsi Langmuir) dapat dihitung, yaitu dengan membuat grafik invers dari r<sub>0</sub> terhadap invers C<sub>0</sub> untuk setiap polutan. Dengan memasukkan nilai k dan K ke persamaan 1,

maka persamaan laju reaksi pun didapatkan, seperti terlihat pada Tabel 5.

### Perhitungan Waktu Degradasi

Dengan mengintegrasikan persamaan laju degradasi pada Tabel 6, maka didapatkan persamaan waktu degradasi polutan hingga baku mutunya, yaitu berdasarkan KepMen KLH No.41/MENKLH/1999 adalah 20 ppm untuk gas CO, 0,05 ppm untuk gas NOx, dan 0,24 ppm untuk gas HC. Dengan memvariasikan nilai C<sub>0</sub> (konsentrasi awal) tiap polutan pada hasil pengintegralan persamaan laju reaksi, maka didapatkan grafik waktu degradasi sebagai fungsi konsentrasi awal polutan.

Tabel 5. Nilai k, K, dan persamaan laju degradasi polutan

Polutan	k (ppm/menit)	K (ppm <sup>-1</sup> )	Persamaan Laju Degradasi
CO	3,333x10 <sup>2</sup>	4,175x10 <sup>-5</sup>	$r = -\frac{dC}{dt} = \frac{(1,390 \times 10^{-2})C}{1 + (4,175 \times 10^{-5})C}$
NOx	1,961	1,379x10 <sup>-2</sup>	$r = -\frac{dC}{dt} = \frac{(2,700 \times 10^{-2})C}{1 + (1,379 \times 10^{-2})C}$
HC	1,613x10 <sup>1</sup>	1,455x10 <sup>-3</sup>	$r = -\frac{dC}{dt} = \frac{(2,350 \times 10^{-2})C}{1 + (1,455 \times 10^{-3})C}$

Dari grafik tersebut kemudian, dapat diregresi persamaan waktu degradasi polutan hingga baku mutu sebagai fungsi konsentrasi awal polutan seperti yang ditampilkan pada Tabel 6.

Dengan persamaan pada Tabel 6, dapat dihitung untuk polutan CO, dengan konsentrasi polutan di Jakarta pada tahun 2011, misalnya di sekitar Bundaran HI mencapai 50 ppm sampai 75 ppm per hari, dibutuhkan waktu 66 menit sampai 95 menit untuk mengeliminasi sampai ke tingkat baku mutu, yaitu 20 ppm (Dharma 2011). Kemudian, untuk polutan NO<sub>x</sub> dengan kadarnya di jalan mencapai 0,15 ppm sampai 0,30 ppm di sekitar Stasiun Thamrin, Jakarta (Saepudin dan Admono 2005), dibutuhkan waktu 41 menit sampai 66 menit untuk mengeliminasi polutan hingga ke titik baku mutunya, yaitu 0,05 ppm (Dharma 2011). Selanjutnya, untuk polutan HC dengan kadar di jalan mencapai 3 ppm sampai 5 ppm di sekitar Stasiun Thamrin, Jakarta (Saepudin dan Admono 2005), dibutuhkan waktu 108 sampai 130 menit untuk mengeliminasi HC sampai ke baku mutu, yaitu 0,24 ppm (Dharma 2011). Oleh karena itu, masker anti polutan ini juga dinilai layak difungsikan untuk mengeliminasi CO, NO<sub>x</sub>, dan HC.

Tabel 6. Persamaan waktu degradasi setiap polutan

Gas Polutan	Persamaan waktu degradasi, dengan t = waktu (jam); [X] <sub>0</sub> konsentrasi awal polutan X (ppm)
CO	$t = 1,200 \cdot \ln [CO]_0 - 3,598$
NO <sub>x</sub>	$t = 0,618 \cdot \ln [NO_x]_0 + 1,851$
HC	$t = 0,712 \cdot \ln [HC]_0 + 1,014$

## KESIMPULAN

Katalis komposit yang terdiri dari titania, karbon aktif, dan zeolit alam Lampung (TiO<sub>2</sub>-AC-ZAL) dapat mengeliminasi polutan CO, NO<sub>x</sub>, dan HC secara simultan, sehingga bisa diaplikasikan sebagai bahan masker. Pada berbagai komposisi, komposit tersebut dapat mengeliminasi polutan dengan baik meskipun kinerja optimalnya tergantung pada komposisinya. Komposisi terbaik untuk mengeliminasi ketiga polutan tersebut adalah TiO<sub>2</sub> 10%-AC 8,2%-ZAL 81,8%. Semakin banyak jumlah komposit dalam masker (hingga 10 gram), maka kinerja masker semakin efektif. Begitu pula semakin banyak konsentrasi awal polutan maka laju eliminasi polutan semakin besar, meskipun

waktu yang dibutuhkan untuk mencapai batas baku mutu lebih lama. Masker anti polutan yang direkayasa sudah cukup layak untuk mendegradasi polutan CO, NO<sub>x</sub>, dan HC secara simultan, sehingga potensi aplikasinya cukup menjanjikan.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi (DIKTI), yang telah membiayai sebagian kegiatan penelitian ini melalui proyek PKMP (Program Kreatifitas Mahasiswa-Penelitian) Tahun Anggaran 2011.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alfat MA. 2009. Rekayasa alat dan uji kinerja katalis komposit TiO<sub>2</sub>-adsorben alam untuk degradasi polutan asap rokok. Skripsi. Universitas Indonesia.
- Amora MR, Canabrava DV, Bastos NM, Torres AEB, Cavalcante CL, Azevero DCS. 2009. Equilibrium adsorption of binary mixtures of light hydrocarbons in activated carbon. *Latin American Applied Research* (no. 39): 153-156.
- Ao CH, Lee, SC. 2005. Indoor air purification by photocatalyst TiO<sub>2</sub> immobilized on an activated carbon filter installed in an air cleaner. *Chemical Engineering Science* (no.60): 103-109.
- Chun OW. 2008. Effect of Fe contents in Fe-AC/TiO<sub>2</sub> composites on photodegradation behaviors of methylene blue. *Journal of the Korean Ceramic Society* 45(6): 324-330.
- Despres Joel. 2003. Adsorption and catalytic oxidation of nitrogen monoxide in lean exhaust for future automotive DeNO<sub>x</sub> techniques. Thesis. University Louis Pasteur.
- Dharma A. 2011. Baku Mutu Lingkungan dan Mekanisme Pemantauan. Bahan Kuliah Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan. Jakarta: Universitas Gunadarma.
- Durgakumari V, Subrahmanyam M, Subba RKV, Ratnamala A, Noorjahan M, and Keiichi T. 2002. An easy and efficient use of TiO<sub>2</sub> supported HZSM-5 and TiO<sub>2</sub>+HZSM-5 zeolite combine in the photodegradation of aqueous phenol and p-chlorophenol. *Applied Catalysis A: General* (no.234): 155-165.

- Hunger M, Husken G, Brouwers HJH. 2010. Photocatalytic degradation of air pollutants – from modeling to large scale application. *Cement and Concrete Research* (no. 40): 313-320.
- Hwang S, Myung CL, Wonyong Choi. 2003. Highly enhanced photocatalytic oxidation of CO on titania deposited with Pt nano particles: kinetics and mechanism. *Applied Catalysis B: Environmental* (no. 46): 49-63.
- Ichiura H, Kitaoka T, Tanaka H. 2002. Preparation of composite TiO<sub>2</sub>-zeolite sheets using a papermaking technique and their application to environmental improvement. *Journal of Materials Science* (no. 37): 2937-2941.
- Iman YC, Candra DB, Sumardi S. 2011. Lampung zeolite utilization as gas emission adsorbant on charcoal making process. *International Journal of Civil and Environmentl Engineering* 11(2): 60-67.
- Kachina, Anna. 2008. *Gas-phase photocatalytic oxidation of volatile organic compound*. Thesis. Lappeenranta University of Technology. Finland.
- Macala J, Pandova I. 2007. Natural zeolite clinoptilolite-raw material serviceable in the reduction of toxical components at combustion engines noxious gases. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* (no. 23).
- Matos J, Garcia A, Chovelon JC, Ferronato C. 2010. Combination of adsorption on activated carbon and oxidative photocatalysis on TiO<sub>2</sub> for gaseous toluene remediation. *The Open Materials Science Journal* (no.4): 23-25.
- Muraza O, Jacobus CJ. 2004. An exploratory study for zeolite membrane application in hydrocarbon separation. *Journal of the Indonesien Oil and Gas Community*.
- Ngamsopasiriskun C, Saijai C. 2010. Removal of phenol in aqueous solution by nanocrystalline TiO<sub>2</sub>/activated carbon composite catalyst. *Natural Science* (no.44): 1176-1182.
- Panov AG, Tonkyn R, Yoon SA, Barlow S, Balmer ML (n.d.). NO<sub>x</sub> reduction behaviour of alumina and zeolite catalysts in combination with non-thermal plasma. Pacific Northwest National Laboratory.
- Saepudin A, Admono T. 2005. Kajian Pencemaran Udara Akibat Emisi Kendaraan Bermotor di DKI Jakarta. *Jurnal Teknologi Indonesia* 28.
- Suwardi, Mulyanto B. 2010. Prospek zeolit sebagai bahan penyerap dalam remediasi lahan bekas tambang. *Presentasi*. Departemen Ilmu Tanah dan Sumber Daya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB.
- Tezel FH, Apolonatos G. 1993. *Gas Sep. Purif* 7 (1): 11.