

# PENGARUH PENAMBAHAN KATALIS TiO<sub>2</sub> TERHADAP SIFAT KIMIA PERMUKAAN KOMPOSIT KARBON AKTIF UNTUK PENYERAPAN GAS SO<sub>2</sub>

## *The Influence of TiO<sub>2</sub> Catalyst Addition on the Surface Chemical Properties of Activated Carbon Composites for SO<sub>2</sub> Gas Adsorption*

IKA MONIKA\*, DATIN F. UMAR\*\*, ARIE HARDIAN\*\*, RINA ASTRIANA\*\* dan FAHMI SULISTYOHADI\*

Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara  
Jalan Jenderal Sudirman 623 Bandung 40211  
Telp. (022) 6030483, Fax. (022) 6003373  
Korespondensi e-mail: [ika.monika@esdm.go.id](mailto:ika.monika@esdm.go.id)  
\* Kontributor Utama, \*\* Kontributor Anggota

---

### ABSTRAK

Karbon aktif dan TiO<sub>2</sub> mereduksi SO<sub>2</sub> melalui proses adsorpsi dan fotokatalitik. Kedua senyawa ini memiliki efektivitas adsorpsi rendah. Untuk meningkatkan aktivitas adsorpsi dilakukan kombinasi teknik adsorben dan fotokatalitik sehingga adsorpsi dapat optimal. Kombinasi dilakukan dengan membuat komposit karbon aktif/TiO<sub>2</sub>. Batubara dan semi-kokas dicampur dengan perbandingan 7:3 kemudian TiO<sub>2</sub> ditambahkan dengan konsentrasi 1, 3, 6, 9 dan 15%. Karbon aktif/ TiO<sub>2</sub> dikarbonisasi pada suhu 600 °C selama 1 jam dan diaktivasi pada suhu 900 °C selama 1 dan 2 jam di bawah aliran gas nitrogen. Hasil analisis *fourier-transform infrared* (FTIR) spectroscopy menunjukkan intensitas serapan gugus fungsi C=O naik sebesar 49,5% pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 6% selama 1 jam dan 33,2% pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 3% selama 2 jam. Gugus fungsi basa C=O mereduksi gas SO<sub>2</sub> yang bersifat asam. Hasil *X-ray diffraction* (XRD) ditemukan kristal TiO<sub>2</sub> anatase dan rutil. Koeksistensi kristal anatase dan rutil lebih efektif daripada anatase dan rutil fase tunggal. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa karbon aktif/TiO<sub>2</sub> meningkatkan aktivitas gugus fungsi permukaan karbon aktif dan membentuk kristal TiO<sub>2</sub> anatase dan rutil secara bersama.

Kata kunci: TiO<sub>2</sub>, gugus fungsi, komposit karbon aktif/TiO<sub>2</sub>, gas SO<sub>2</sub>.

### ABSTRACT

Activated carbon and TiO<sub>2</sub> reduce SO<sub>2</sub> through adsorption and photocatalytic processes. These compounds have low adsorption effectivity. For increasing the adsorption activity, a combination of adsorbent and photocatalytic techniques was conducted, thus the adsorption can be optimal. The combination was performed by producing activated carbon/TiO<sub>2</sub> composites. Coal and semi-coke were blended with the ratio of 7:3 then TiO<sub>2</sub> was added with the concentrations of 1, 3, 6, 9 and 15%. The activated carbon/TiO<sub>2</sub> was carbonized at 600°C for 1 hour and activated at 900°C for 1 and 2 hours under nitrogen gas flow. The analysis results of *fourier-transform infrared spectroscopy* (FTIR) show the absorption intensity of the C=O functional group increased by 49,5% on activated carbon/TiO<sub>2</sub> 6% for 1 hour and 33,2% on activated carbon/TiO<sub>2</sub> 3% for 2 hours. The basic functional group C=O reduced the acidic SO<sub>2</sub> gas. The results of *X-Ray diffraction* (XRD) show that anatase and rutile crystals of TiO<sub>2</sub> were found. The co-existence of anatase and rutile crystals can be more effective than single phase anatase and rutile. The study result shows that the activated carbon/TiO<sub>2</sub> increased the activity of functional groups on the activated carbon surface and co-existently formed anatase and rutile of TiO<sub>2</sub> crystal.

Keywords: TiO<sub>2</sub>, activated carbon/TiO<sub>2</sub> composite, SO<sub>2</sub> gas

## PENDAHULUAN

Pencemaran lingkungan khususnya penekanan pada lingkungan udara telah menjadi salah satu permasalahan dunia (Cai *dkk.*, 2018). Meskipun secara khusus telah dilakukan penelitian tentang berbagai energi alternatif dari berbagai sumber baru seperti angin, air laut pasang dan tenaga surya, namun energi fosil seperti minyak bumi dan batubara masih menjadi sumber energi dominan di masyarakat modern (Barbarelli *dkk.*, 2018). Penggunaan minyak bumi dan batubara dengan bahan bakar turunannya mengandung belerang, yang mengakibatkan pencemaran lingkungan karena mengandung senyawa belerang yang dapat menghasilkan gas SO<sub>2</sub> yang menjadi sumber terjadinya hujan asam dan kerusakan permanen pada lingkungan permukaan (Yang *dkk.*, 2017; Xue *dkk.*, 2019). Industri peleburan bijih mineral yang menggunakan reduktor batubara juga berkontribusi terhadap peningkatan kontaminan SO<sub>2</sub> (Sun *dkk.*, 2020). Oleh karena itu dalam proses industrinya, sebagian besar negara telah menggunakan teknologi untuk menghilangkan SO<sub>2</sub> (Zhao *dkk.*, 2020).

Salah satu teknologi untuk menghilangkan gas SO<sub>2</sub> yaitu menggunakan adsorben seperti logam-logam organik, zeolit dan karbon aktif (Chen *dkk.*, 2020). Penggunaan adsorben karbon aktif pada proses desulfurisasi memiliki peluang yang cukup kompetitif karena proses preparasi yang sederhana, biaya rendah, dan sumber bahan baku yang melimpah (Xiong *dkk.*, 2015) seperti limbah polimer, biomassa, *petroleum coke* dan batubara (Ding *dkk.*, 2016). Meskipun karbon aktif memiliki kapasitas penyerapan yang baik tetapi efektivitasnya adsorpsinya rendah (Ou *dkk.*, 2020).

Fotokatalis TiO<sub>2</sub> dapat menurunkan kontaminan dengan proses dekomposisi dan oksidasi permukaan (Xing *dkk.*, 2016), tetapi dalam proses oksidasi lanjutan kelemahan TiO<sub>2</sub> yaitu mudah terjadi aglomerasi, kapasitas adsorpsi yang rendah, dan dalam larutan sulit untuk dipisahkan dan didaur ulang (Eliyas *dkk.*, 2013). Kelebihan penyisipan TiO<sub>2</sub> pada karbon aktif selain memiliki kemampuan untuk memecah berbagai senyawa organik, dapat diregenerasi pada suhu ruang (Basuki, 2007), juga stabil terhadap cahaya, tidak beracun, reaksi TiO<sub>2</sub> dapat berlangsung pada suhu

rendah dan tekanan atmosfer (Xu *dkk.*, 2017), murah, dan tersedia secara luas (Grätzel, 2003).

Untuk mengatasi kekurangan sifat karbon aktif dan sifat fotokatalisis TiO<sub>2</sub>, maka pada penelitian ini dilakukan penggabungan teknik berbasis karbon aktif katalis melalui pembuatan komposit karbon aktif/TiO<sub>2</sub> sehingga dapat meningkatkan kapasitas dan kestabilan adsorpsi SO<sub>2</sub>. Komposit adalah bahan yang heterogen yang terdiri dari beberapa bahan dan diberi penguat (Agustin, Prasetya dan Widodo, 2013). Penggabungan karbon aktif/TiO<sub>2</sub> mempunyai banyak keuntungan karena menghasilkan berbagai gugus kimia permukaan (Zhang *dkk.*, 2016), yaitu katalis akan terdispersi secara keseluruhan ke struktur karbon secara sistematis dan merata (Przepiórski, 2005). Pencampuran oksida logam dan karbon aktif sangat disarankan karena dapat membantu meningkatkan struktur pori dan karakteristik kimia karbon aktif yang diinginkan sehingga dapat meningkatkan efektivitas desulfurisasi (Fan *dkk.*, 2013).

## METODE

Dalam penelitian ini, pembuatan komposit dilakukan dengan menggunakan batubara peringkat rendah dan semi kokas hasil karbonisasi batubara yang dicampur dengan TiO<sub>2</sub>. Untuk mengetahui kemampuan adsorpsi komposit dilakukan pengujian daya serap iodine, analisisnya menggunakan *fourier-transform infrared* (FTIR) *spectroscopy* untuk mengetahui gugus fungsi yang terbentuk, dan *X-ray diffraction* (XRD) untuk mengetahui struktur kristalin TiO<sub>2</sub> sebelum dan setelah dicampur dengan TiO<sub>2</sub>. Gugus fungsi yang bersifat amfoter basa merupakan gugus fungsi yang reaktif untuk menyerap gas-gas yang bersifat asam seperti SO<sub>2</sub>, sedangkan kristalin TiO<sub>2</sub> anatase dan rutil merupakan kristalin yang memiliki efektivitas katalitik yang baik dalam proses desulfurisasi (Zhang *dkk.*, 2016).

Dalam penelitian ini, bahan baku komposit yaitu batubara sub-bituminus dan batubara yang telah mengalami karbonisasi pada suhu tinggi (semi kokas). Penambahan semi kokas dengan kadar karbon tetap tinggi (>80%), terindikasi dapat meningkatkan sifat kekuatan mekanik karbon aktif (Yang *dkk.*, 2015),

sedangkan tar batubara digunakan sebagai pengikat atau *binder* (Ishii dkk., 2019).

### Sintesis Komposit Karbon Aktif/TiO<sub>2</sub>

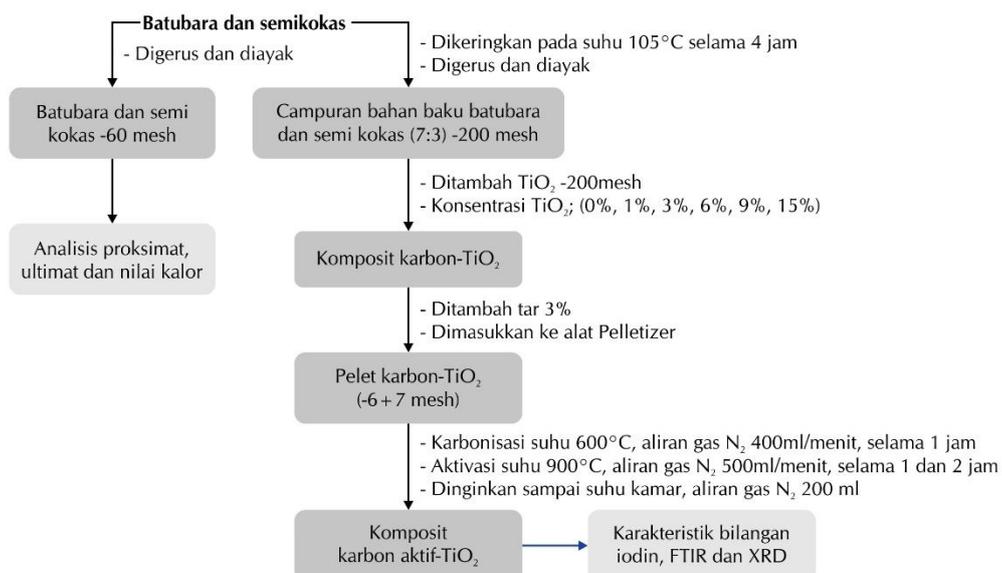
Proses modifikasi pembuatan karbon aktif dengan menambahkan katalis oksida logam umumnya dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama, yaitu karbonisasi yang dilanjutkan dengan proses pendinginan terlebih dahulu pada suhu kamar. Arang hasil karbonisasi kemudian dicampur dengan katalis yang dilanjutkan dengan proses aktivasi (Cagnon dkk., 2003). Dalam penelitian ini, proses aktivasi dan karbonisasi dilakukan dalam satu tahap, tanpa pendinginan terlebih dahulu dengan metode mengacu pada hasil penelitian Zhang dkk. (2016) yang menggunakan batubara sub-bituminus dan batubara *cooking* (*cooking coal*). Gambar 1 menunjukkan bagan alir proses pembuatan komposit dan analisis karakteristik komposit.

Sintesis komposit karbon aktif/TiO<sub>2</sub> dilakukan dalam lima tahap;

- Tahap pertama, batubara dan semi kokas digerus dan diayak untuk memperoleh ukuran butir -60 mesh yang digunakan untuk analisis karakteristik bahan baku yang meliputi analisis proksimat, ultimat dan nilai kalor. Selanjutnya sebagian batubara dan semi kokas dikeringkan pada suhu 105°C selama 4 jam, kemudian digerus dan diayak untuk memperoleh

ukuran butir -200 mesh dan dicampur dengan perbandingan 7:3

- Tahap kedua, terhadap campuran batubara dan semi kokas ditambahkan TiO<sub>2</sub> yang berukuran -200 mesh. Penetapan konsentrasi TiO<sub>2</sub> 1, 3, 6, 9 dan 15% berat selain mengacu pada hasil penelitian Zhang dkk., (Zhang dkk., 2016) yang menggunakan konsentrasi TiO<sub>2</sub> 0-12% dengan interval 3%, juga penelitian Pujiono, Mulyati dan Fizakia (2020) yang melakukan modifikasi karbon aktif tempurung kelapa dengan konsentrasi TiO<sub>2</sub> 5 dan 10%.
- Tahap ketiga, terhadap komposit karbon-TiO<sub>2</sub> ditambahkan tar sebanyak 3%, kemudian dimasukkan ke alat *pelletizer* sehingga diperoleh pelet komposit karbon/TiO<sub>2</sub> berukuran -6 + 7 mesh.
- Tahap keempat, pembuatan komposit karbon aktif/TiO<sub>2</sub> dengan cara pelet karbon/TiO<sub>2</sub> dipanaskan pada suhu 600°C selama 1 jam untuk meningkatkan kerapatan antar partikel dan menurunkan kadar zat terbang dalam kondisi aliran gas nitrogen dengan laju alir 400 ml/menit. Penetapan suhu 600°C, selain karena proses karbonisasi batubara untuk karbon aktif berlangsung pada suhu berkisar antara 500-600°C juga mengacu pada hasil penelitian Siwińska-Stefańska dkk. (2018) bahwa kalsinasi pada 600°C dapat menghasilkan campuran fasa *anatase* dan *rutile* bergantung pada batas atas dari reaksi eksotermik.



Gambar 1. Bagan alir proses sintesis komposit karbon aktif/TiO<sub>2</sub>

- Setelah karbonisasi selesai, suhu dinaikkan menjadi 900°C untuk proses aktivasi dengan laju alir gas nitrogen dinaikkan menjadi 500 ml/menit dan waktu aktivasi selama 1 dan 2 jam. Proses pendinginan komposit karbon aktif/TiO<sub>2</sub> dilakukan tanpa mengeluarkan komposit dari *furnace*, dengan laju alir nitrogen 200 ml/menit sampai mencapai suhu kamar. Penetapan kondisi proses aktivasi mengacu pada hasil penelitian Zhang *dkk.* (2016).
- Tahap kelima, terhadap komposit karbon aktif/TiO<sub>2</sub> dilakukan analisis atau pengujian bilangan iodin, gugus fungsi dan struktur kristal menggunakan alat FTIR dan XRD, dan masing-masing perlakuan diberi nama percontoh karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 0% (tanpa penambahan TiO<sub>2</sub>), karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 1%, karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 3%, karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 6%, karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 9%, dan karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 15%.

Gas nitrogen merupakan gas yang bersifat *inert*, sehingga penggunaan gas nitrogen selama proses karbonisasi dan aktivasi dapat mengurangi oksidasi lanjut yang mengakibatkan material karbon terbakar menjadi abu.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik Bahan Komposit

Analisis karakteristik batubara, semi kokas dan tar ditunjukkan pada Tabel 1. Bahan baku

semi kokas diperoleh dari hasil karbonisasi pada suhu 900°C menggunakan *tunnel kiln* kapasitas 2 ton/hari, yang merupakan semi kokas dengan peruntukkan untuk kokas pengecoran. Tar yang digunakan diperoleh dari hasil proses gasifikasi batubara. Pengamatan secara fisik pelet komposit sebelum proses karbonisasi dan aktivasi cenderung berwarna coklat kusam (Gambar 2a), dan setelah mengalami pemanasan (karbonisasi dan aktivasi) menjadi berwarna hitam pekat (Gambar 2b).

### Karakterisasi Komposit Karbon Aktif/TiO<sub>2</sub>

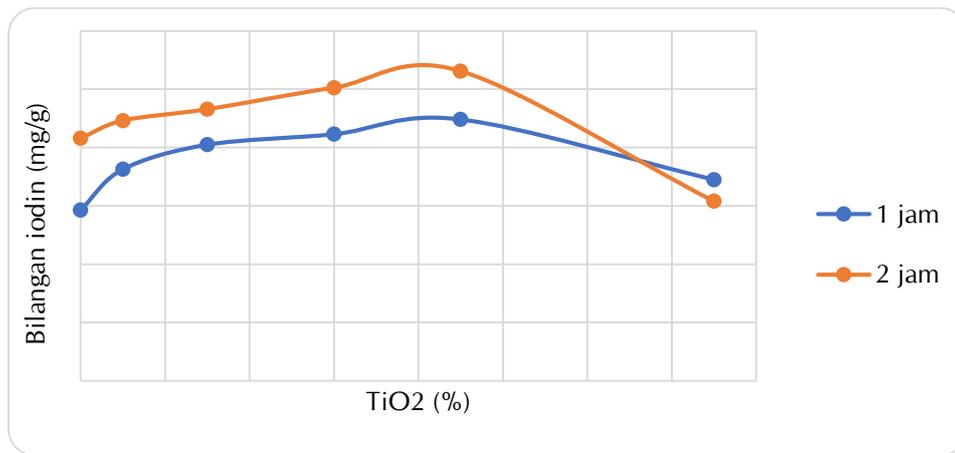
- Pengujian bilangan iodin  
 Bilangan iodin adalah salah satu parameter yang menjadi indikator untuk menentukan kualitas karbon aktif. Bilangan iodin adalah kemampuan per gram karbon aktif dalam menyerap per miligram zat iodin. Bilangan iodin juga menggambarkan ukuran volume pori-pori mikro dan total luas permukaan internal karbon aktif (Huang *dkk.*, 2017). Berdasarkan hasil uji coba pembuatan karbon aktif batubara yang dilakukan pada rentang waktu 2008-2010 dengan menggunakan alat *rotary kiln* kapasitas 1 ton/hari, bilangan iodin batubara sub-bituminus sangat rendah yaitu 70-80 mg/gr, sedangkan bilangan iodin setelah menjadi semi kokas berkisar antara 100-120 mg/gr. Pengaruh penambahan TiO<sub>2</sub> terhadap bilangan iodin dapat dilihat pada Gambar 3.

Tabel 1. Hasil analisis karakteristik batubara, semi kokas dan tar

Parameter	Bahan Baku Komposit		
	Batubara	Semi Kokas	Tar
Kadar air total (%) ar	14,00	9,43	-
Kadar air lembab (%) adb	11,83	9,43	-
Kadar abu (%) adb	7,31	4,11	-
Kadar zat terbang (%) adb	44,58	4,27	-
Kadar karbon padat (%) adb	36,28	82,19	-
Kadar sulfur (%) adb	0,63	0,51	0,23
Kadar karbon (%) adb	55,26	82,80	51,12
Kadar hidrogen (%) adb	5,30	1,61	7,73
Kadar nitrogen (%) adb	0,88	0,43	0,15
Nilai kalor (kal/g) adb	5.071	6.762	-



Gambar 2. Fisik pelet komposit karbon-TiO<sub>2</sub> sebelum dipanaskan (a) dan setelah pemanasan (b)



Gambar 3. Grafik pengaruh penambahan TiO<sub>2</sub> terhadap bilangan iodin

Pada Gambar 3, pola adsorpsi iodin selama waktu aktivasi 1 dan 2 jam relatif sama, dengan diperolehnya nilai iodin berkisar antara 300-550 mg/gr. Semakin tinggi konsentrasi TiO<sub>2</sub> yang ditambahkan semakin tinggi nilai bilangan iodin yang diperoleh, tetapi pada konsentrasi TiO<sub>2</sub> sebesar 15%, nilai iodin turun. Lamanya waktu aktivasi menunjukkan pengaruh yang cukup signifikan terhadap pembentukan daya serap karbon aktif. Daya serap tertinggi diperoleh pada komposit karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 9% dengan waktu aktivasi selama 2 jam dengan diperolehnya nilai iodin sebesar 531 mg/gr. Meskipun pengaruh penambahan TiO<sub>2</sub> tidak menunjukkan kenaikan bilangan iodin secara signifikan, tetapi adanya TiO<sub>2</sub> yang menyisip dan mengisi ruang antar lapis pada stuktur karbon aktif yang kemudian mengalami pemanasan akan meningkatkan stabilitas struktur karbon aktif. Struktur lapisan karbon aktif akan stabil dengan proses pemanasan pada

suhu minimal 120°C. Pemanasan karbon aktif pada suhu tersebut menyebabkan struktur lapisan karbon aktif mengalami pengerasan, sedangkan molekul TiO<sub>2</sub> sebagai penyangga antar lapisan karbon aktif juga lebih kokoh dan stabil. Struktur lapisan dan struktur penyangga pada karbon aktif yang stabil ini akan terhindar dari resiko keruntuhan antar lapisan yang dapat menyebabkan kerusakan karbon aktif secara fisik (Basuki, 2007). Dengan demikian material komposit karbon aktif/TiO<sub>2</sub> tidak cepat rusak dan hancur pada saat digunakan, meskipun pada kondisi adanya panas dan tekanan. Hasil analisis bilangan iodin yang rendah kemungkinan disebabkan oleh keberadaan gas nitrogen yang berlebih. Trewearanuwat dkk. (2020) dalam penelitiannya menyatakan bahwa nitrogen berlebih dapat menyebabkan meningkatnya volume pori-pori meso dan mengurangi volume pori-pori mikro yang

merupakan pori-pori yang dapat menghasilkan nilai iodine tinggi.

- b. Pengujian gugus fungsi dengan FTIR  
 Uji FTIR menunjukkan keberadaan suatu gugus fungsi dengan merepresentasikan puncak besaran serapan spektrum % transmittan (sumbu Y) yang terbentang pada suatu bilangan gelombang (sumbu X). Setiap jenis gugus fungsi memiliki bentang bilangan gelombang tersendiri (Zustriani, 2019). Analisis FTIR secara kuantitatif dapat dilakukan dengan menggunakan hukum Lambert Beer yang menghitung absorptivitas molar zat pada panjang gelombang tertentu, yaitu salah satu komponennya mengadsorpsi dengan kuat sedang komponen lainnya lemah atau tidak mengadsorpsi. Semakin tinggi nilai absorbansi semakin besar konsentrasi zat yang teradsorpsi. Absorbansi berbanding

terbalik dengan transmittan. Semakin tinggi absorbansi (A) semakin rendah transmittan (T).

$$A = -\log T$$

Melalui pendekatan persamaan Lambert Beer ini, maka dapat diartikan semakin kecil persen transmisi yang diperoleh, semakin semakin besar konsentrasi zat yang terukur.

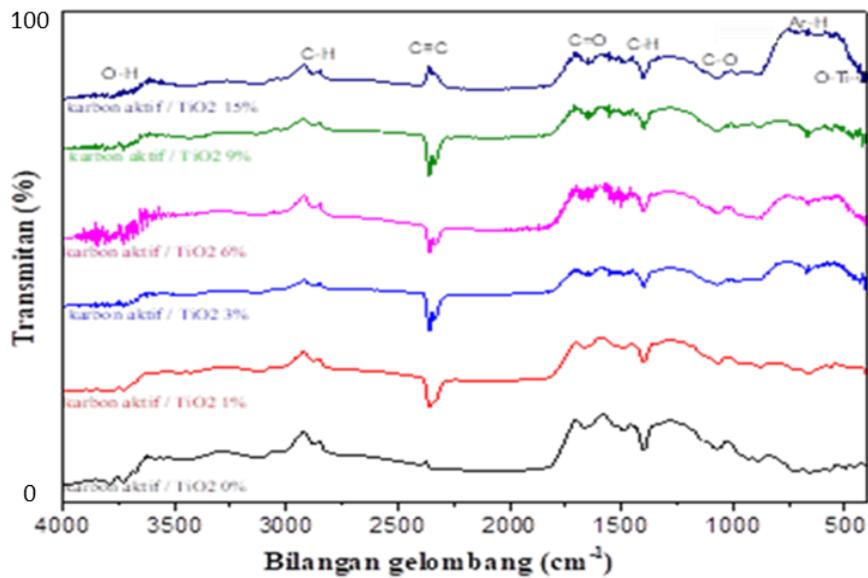
Tabel 2 menunjukkan daerah serapan masing-masing gugus fungsi yang dijadikan acuan untuk penentuan gugus fungsi komposit karbon aktif/TiO<sub>2</sub>, sedangkan Tabel 3, 4, 5 dan 6, dan Gambar 4, 5, 6 merupakan hasil pengujian contoh komposit karbon aktif/TiO<sub>2</sub>.

Tabel 2. Identifikasi gugus fungsi *infra red*

Ikatan	Tipe senyawa	Daerah serapan m <sup>-1</sup>	Intensitas
C-H	Alkana	2850-2970 1340-1470	Kuat Kuat
C-H	Alkena	3010-3095 675-995	Sedang Kuat
C-H	Alkuna	3300	Kuat
O-H	Fenol, monomer alkohol alkohol ikatan hidrogen, fenol Monomer asam karboksilat, ikatan hidrogen asam karboksilat	3590-3650 3200-3600 3500-3650 2500-2700	Berubah-ubah Berubah-ubah, terkadang melebar Sedang Melebar
N-H	Amina, amida	3300-3500	Sedang
C=C	Alkena	1610-1680	Berubah-ubah
C=C	Aromatik	1500-1600	Berubah-ubah
C≡C	Alkuna	2100-2260	Berubah-ubah
C-N	Amida	1180-1360	Kuat
C≡N	Nitril	2210-2280	Kuat
C-O	Alkohol, eter, asam karboksilat, ester	1050-1300	Kuat
C=O	Aldehid, keton, asam karboksilat, ester	1690-1760	Kuat
NO <sub>2</sub>	Senyawa nitro	1500-1570 1300-1370	Kuat Kuat

Tabel 3. Bilangan gelombang gugus fungsi komposit karbon aktif/TiO<sub>2</sub>

Gugus fungsi	Jenis senyawa	Bilangan gelombang (cm <sup>-1</sup> )
O-H	Fenol	3420
C-H	Alkena	2960
C≡C	Alkuna	2350
C=O	Keton/aldehid	1630
C-H	Alkana	1370
C-O	Alkohol	1630
Ar-H	Alkil halida	825
O-Ti-O	Mineral TiO <sub>2</sub>	550



Gambar 4. Intensitas serapan karbon aktif/TiO<sub>2</sub> sebelum pemanasan

Tabel 4. Transmittan gugus fungsi karbon aktif/TiO<sub>2</sub> sebelum pemanasan

Karbon aktif/TiO <sub>2</sub> (%)	Konsentrasi transmittan gugus fungsi (%T)							
	O-H	C-H alkana	C≡H	C=O	C-H alkana	C-O	Ar-H	O-Ti-O
0	71,1	67,8	73,1	65,0	65,5	68,0	70,6	72,6
1	86,3	81,9	97,1	77,9	78,2	81,3	83,3	83,9
3	83,2	79,9	89,4	76,4	76,1	78,6	75,0	73,7
6	66,7	64,0	75,9	60,9	61,8	64,8	64,6	61,8
9	87,7	83,2	93,8	80,4	80,2	64,8	82,8	84,2
15	75,8	72,0	72,7	69,4	69,5	72,2	67,2	63,9

Puncak spektrum pada Gambar 4 menunjukkan sebelum dilakukan pemanasan atau proses karbonisasi dan aktivasi, teridentifikasi permukaan komposit karbon aktif/TiO<sub>2</sub> terdiri atas gugus fungsi O-H, C-H, C≡C, C=O, C-H, C-O, Ar-H, dan O-Ti-O. Gugus fungsi O-H merupakan senyawa fenol bersifat cenderung asam yang dapat melepaskan ion H<sup>+</sup>. Gugus fungsi lainnya yang bersifat asam yaitu C-H alkana pada bilangan gelombang 3100-2800 cm<sup>-1</sup> memiliki tingkat keasaman yang lebih tinggi dibandingkan C-H alkana pada bilangan gelombang 1400-1340 cm<sup>-1</sup>, dan juga gugus fungsi C-O alkohol (1200-1100 cm<sup>-1</sup>). Bilangan gelombang <1500 cm<sup>-1</sup> dikategorikan sebagai daerah spektrum sidik jari (*finger print*). Sedikit saja perbedaan dalam struktur dan susunan

molekul, akan menyebabkan distribusi puncak absorpsi berubah. Pada daerah ini terjadi bermacam-macam interaksi, sehingga tidak mungkin dapat menginterpretasikan dengan tepat. Gugus fungsi C=O merupakan gugus fungsi senyawa keton atau aldehid yang bersifat basa yang dapat menyerap gas SO<sub>2</sub> yang bersifat asam. Dengan penambahan katalis TiO<sub>2</sub> dan keberadaan O<sub>2</sub> dan uap H<sub>2</sub>O akan mentransformasi SO<sub>2</sub> menjadi asam sulfat (Zhang dkk., 2016).

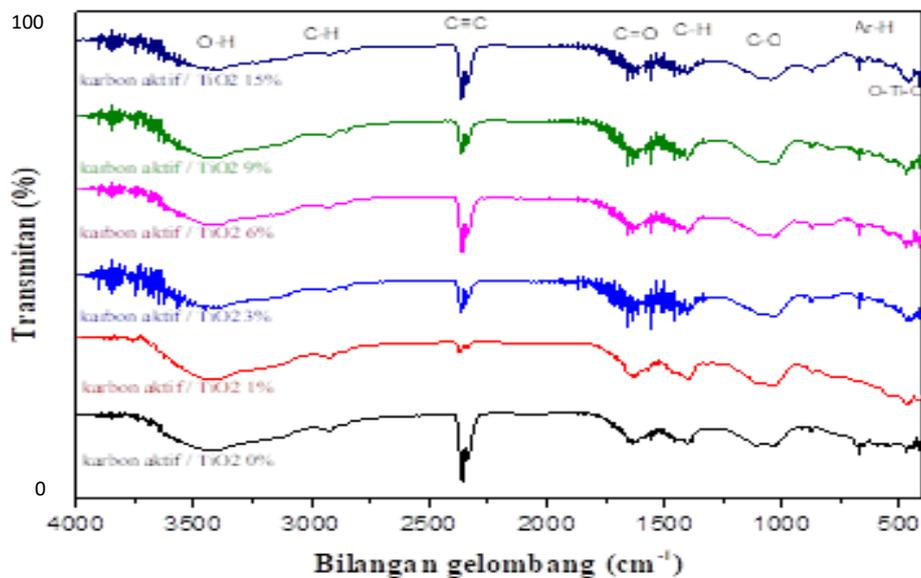
Hasil analisis FTIR menunjukkan puncak spektrum sebelum pemanasan (Gambar 4) dan data pada Tabel 4 memiliki pola kenaikan dan penurunan konsentrasi yang fluktuatif dan tidak stabil. Hal ini terlihat dengan terjadinya penurunan konsentrasi pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 1% dengan naiknya

persen transmisi untuk seluruh gugus fungsi yang teridentifikasi, kemudian mengalami penurunan pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 3% dan 6%, dan naik-turun kembali pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 9% dan 15%. Sebelum pemanasan, kenaikan konsentrasi optimum untuk semua gugus fungsi terjadi pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 6%, dengan kenaikan berkisar antara 4,0-6,0% dari konsentrasi sebelumnya pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 3%. Konsentrasi gugus fungsi C=O yang merupakan gugus fungsi yang bersifat basa mengalami peningkatan dengan turunnya persen transmisi dari 65,0% menjadi 60,9% atau terjadi peningkatan konsentrasi sebesar 6,3%. Demikian pula dengan gugus fungsi O-H, C-H alkena, C-H alkana dan C-O, kecuali C≡C alkuna konsentrasi turun sebesar 3,8% dengan naiknya persen transmisi dari 73,1% menjadi 75,9%.

Setelah dilakukan pemanasan selama 1 jam, terjadi perubahan pola puncak spektrum yang dapat dilihat pada Gambar 5 dengan diperolehnya puncak spektrum O-H yang semakin turun, melebar dan mengarah ke bawah. Demikian pula dengan gugus fungsi lainnya yang semakin lancip dan melebar. Data pada Tabel 5

menunjukkan terjadi kenaikan konsentrasi semua gugus fungsi dengan semakin turunnya persen transmisi pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 1%, 3% dan 6%. Pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 9% dan 15%, menunjukkan pola yang sama seperti sebelum dipanaskan, yaitu konsentrasi gugus fungsi turun pada aktif/TiO<sub>2</sub> 9% dan meningkat kembali pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 15%. Kenaikan konsentrasi optimum terjadi pada penambahan karbon aktif TiO<sub>2</sub> 6% dengan diperolehnya persen transmisi terendah untuk semua gugus fungsi dengan kenaikan konsentrasi C=O sebesar 49,5%.

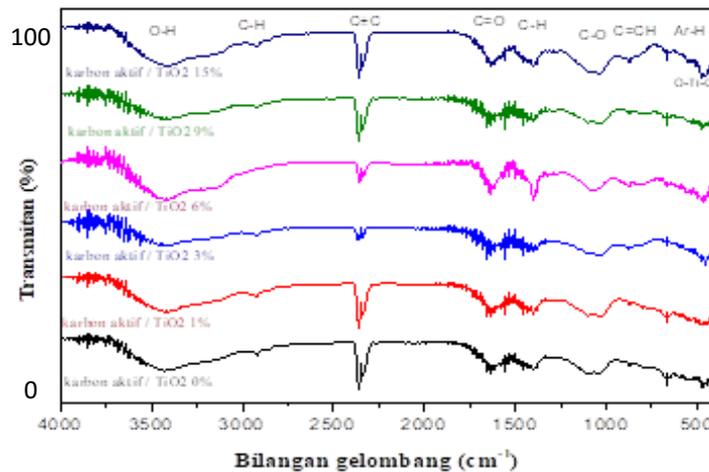
Pola puncak spektrum pada pemanasan selama 2 jam hampir sama dengan pemanasan selama 1 jam (Tabel 6), tetapi peningkatan konsentrasi optimumnya terjadi pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 3%. Hal ini ditunjukkan oleh persen transmisi terendah untuk semua gugus fungsi. Gugus fungsi basa C=O mengalami kenaikan konsentrasi sebesar 33,2% dari semula persen transmisi pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 0% sebesar 50,0% turun menjadi 33,4%. Selanjutnya pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 6%, 9% dan 15% mengalami penurunan dan kenaikan secara fluktuatif.



Gambar 5. Intensitas serapan karbon aktif/TiO<sub>2</sub> setelah pemanasan 1 jam

Tabel 5. Transmittan gugus fungsi karbon aktif/TiO<sub>2</sub> setelah pemanasan 1 jam

Karbon aktif/TiO <sub>2</sub> (%)	Konsentrasi transmittan gugus fungsi (%T)							
	O-H	C-H alkena	C≡H	C=O	C-H alkana	C-O	Ar-H	O-Ti-O
0	79,8	72,6	79,3	76,8	74,1	77,5	73,0	77,7
1	57,8	51,8	49,6	57,0	54,9	58,2	56,1	62,0
3	43,3	38,5	38,1	42,3	41,0	43,9	40,4	42,2
6	38,4	34,5	37,9	38,8	37,5	39,7	38,2	40,2
9	59,9	53,8	53,5	58,5	56,4	59,9	56,3	60,1
15	49,2	44,4	49,4	49,0	47,7	50,8	47,8	47,8



Gambar 6. Intensitas serapan karbon aktif/TiO<sub>2</sub> setelah pemanasan 2 jam

Tabel 6. Konsentrasi transmittan gugus fungsi karbon aktif/TiO<sub>2</sub> setelah pemanasan 2 jam

Karbon aktif/TiO <sub>2</sub> (%)	Konsentrasi transmittan gugus fungsi (%T)							
	O-H	C-H alkena	C≡H	C=O	C-H alkana	C-O	Ar-H	O-Ti-O
0	51,0	72,6	49,1	50,0	48,2	51,3	49,4	53,4
1	46,7	51,8	44,7	46,5	44,8	44,1	45,1	48,3
3	33,1	38,5	28,7	33,4	32,6	34,8	33,3	34,4
6	64,9	34,5	60,1	63,0	61,2	62,1	62,1	63,5
9	37,9	53,8	37,0	37,4	36,2	38,2	36,1	38,4
15	46,5	44,4	43,8	45,7	43,9	47,1	44,1	45,1

Secara keseluruhan, setelah dilakukan pemanasan gugus fungsi komposit karbon aktif/TiO<sub>2</sub> mengalami kenaikan konsentrasi dengan turunnya persen transmisi. Kenaikan konsentrasi optimum pada pemanasan 1 jam terjadi pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 6%, sedangkan pada pemanasan selama 2 jam pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 3%. Hal ini menunjukkan penambahan katalis TiO<sub>2</sub> dapat meningkatkan keberadaan

gugus fungsi basa C=O yang merupakan gugus fungsi yang dapat menyerap gas SO<sub>2</sub>.

- c. Pengujian struktur kristalin dengan XRD  
XRD adalah teknik non-destruktif untuk menganalisis struktur kristal atau semi-kristal dari material organik dan juga anorganik. Pengujian XRD bertujuan

untuk mengetahui keberadaan struktur kristalin TiO<sub>2</sub>.

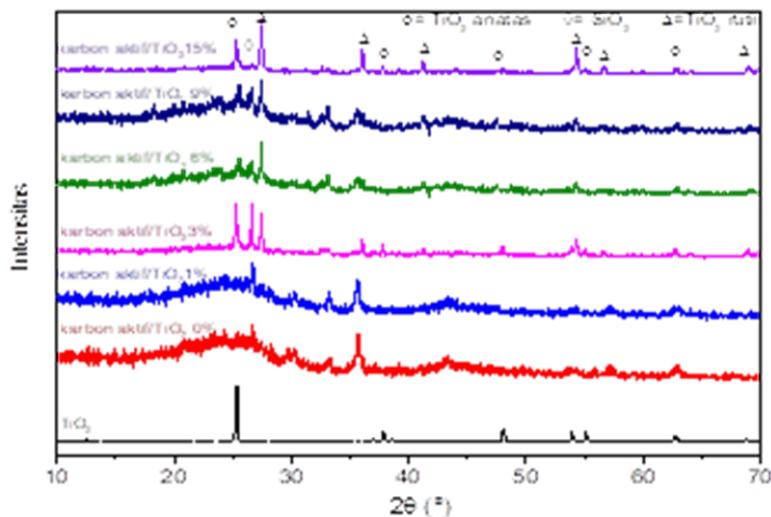
Pengujian XRD hanya dilakukan terhadap waktu pemanasan selama 2 jam. Penetapan pengujian ini berdasarkan hasil pengujian FTIR ketika terjadi penurunan konsentrasi *impurities* komposit yang terdeteksi pada daerah sidik jari dengan bilangan gelombang 1000-500 cm<sup>-1</sup>. Penurunan konsentrasi *impurities* mencapai 11,4% pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 6% dari rata-rata konsentrasi transmittan awal 51,4% menjadi 62,8%. Keberadaan *impurities* memengaruhi aktivitas fotokatalis TiO<sub>2</sub> (Rissa, Priatmoko dan Harjito, 2012).

Identifikasi struktur kristalin TiO<sub>2</sub> mengacu pada data *reference International Center for Diffraction Data* (JCPDs) pada alat XRD. Hasil pengujian dengan pemanasan selama 2 jam (Gambar 7) menunjukkan struktur kristal TiO<sub>2</sub> (tanpa karbon aktif) sebagai TiO<sub>2</sub> anatase pada sudut diafragma (2θ) = 25,4°, 37,8°, 48,1°, 55,1° dan 62,7°, sedangkan TiO<sub>2</sub> rutil hanya teridentifikasi pada 2θ = 68,8°.

Peningkatan kristalin TiO<sub>2</sub> rutil terjadi pada contoh karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 3%, karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 6%, dan karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 15%, dengan 2θ = 27,4°, 35,7°, 41,2°, 54,3°, dan 69,0°. Kristalin TiO<sub>2</sub> anatase teridentifikasi pada sudut diafragma (2θ)

yang sama dengan contoh TiO<sub>2</sub> (tanpa karbon aktif) yaitu pada contoh karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 3% dan karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 6%. Difraksi puncak SiO<sub>2</sub> hanya teridentifikasi pada 2θ = 26,6° dengan intensitas tertinggi pada karbon/aktif TiO<sub>2</sub> 3%. Senyawa SiO<sub>2</sub> terbentuk dari material batubara yang digunakan. Difraktrogram pada Gambar 7 menunjukkan bahwa TiO<sub>2</sub> anatase dan TiO<sub>2</sub> rutil terdapat bersama di dalam komposit dan terbukti bahwa pemanasan dapat meningkatkan kandungan TiO<sub>2</sub> anatase dan TiO<sub>2</sub> rutil.

Anatase merupakan jenis TiO<sub>2</sub> yang relatif stabil dan dapat dipreparasi dengan mudah pada temperatur rendah (Aravindan *dkk.*, 2015). Fasa TiO<sub>2</sub> anatase terbentuk pada suhu 500°C, sedangkan TiO<sub>2</sub> fasa rutil pembentukannya meningkat pada suhu >500°C (Subagja *dkk.*, 2017). Hasil analisis XRD, kedua fasa anatase dan rutil teridentifikasi secara bersama pada suhu 600°C. Zhang, Gao dan Guo (2000) dan Zhang *dkk.* (2016) dalam penelitiannya melaporkan bahwa keberadaan campuran fasa TiO<sub>2</sub> anatase dan TiO<sub>2</sub> rutil menunjukkan aktivitas yang lebih tinggi dibandingkan fasa tunggal dari masing-masing anatase dan rutil. Dengan demikian, keberadaan bersama dua fasa kristalin TiO<sub>2</sub> pada komposit karbon aktif dapat memberikan aktivitas desulfurisasi yang lebih baik.



Gambar 7. Difraktogram karbon aktif/TiO<sub>2</sub> pada pemanasan 2 jam

## KESIMPULAN

Penelitian untuk meningkatkan daya adsorpsi dan aktivitas karbon aktif dengan modifikasi penambahan logam katalis TiO<sub>2</sub> menghasilkan kesimpulan sebagai berikut;

- Semakin tinggi konsentrasi TiO<sub>2</sub> yang ditambahkan, daya serap iodin semakin tinggi. Daya serap iodin tertinggi diperoleh pada komposit karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 9%, dan turun pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 15%
- Gugus fungsi permukaan karbon aktif yang bersifat basa yaitu gugus fungsi C=O sebagian besar mengalami peningkatan konsentrasi. Sebelum dipanaskan gugus fungsi C=O karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 6% mengalami kenaikan konsentrasi sebesar 6,3%. Setelah dipanaskan selama 1 jam meningkat menjadi 49,5% pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 6%, dan sebesar 33,2% pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 3% untuk pemanasan selama 2 jam.
- Kristalin TiO<sub>2</sub> anatas dan rutil terdapat secara bersama dengan intensitas terbesar pada karbon aktif/TiO<sub>2</sub> 3% dengan waktu pemanasan selama 2 jam.
- Penggabungan metode adsorpsi karbon aktif dan fotokatalitik TiO<sub>2</sub> terbukti dapat meningkatkan sifat gugus fungsi permukaan karbon aktif dan membentuk fase kristalin anatas dan rutil secara bersama sehingga meningkatkan kapasitas dan kestabilan proses adsorpsi terhadap SO<sub>2</sub>

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Kepala Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara (tekMIRA) atas terlaksananya penelitian ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada mahasiswa dan pembimbing dari Universitas Achmad Yani yang telah membantu sehingga penelitian ini berjalan dengan baik dan lancar.

## DAFTAR PUSTAKA

Agustin, T., Prasetya, N. B. A. dan Widodo, D. S. (2013) "Sintesis komposit TiO<sub>2</sub>-Karbon aktif untuk fotokatalisis larutan zat warna direct blue 19 dan ion logam Pb<sup>2+</sup> dan Cd<sup>2+</sup>

secara simultan," *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 16(3), hal. 102–107.  
doi: 10.14710/jksa.16.3.102-107.

Aravindan, V., Lee, Y.-S., Yazami, R. dan Madhavi, S. (2015) "TiO<sub>2</sub> polymorphs in "rocking-chair" Li-ion batteries," *Materials Today*. Elsevier, 18(6), hal. 345–351.  
doi: 10.1016/j.mattod.2015.02.015.

Barbarelli, S., Florio, G., Amelio, M. dan Scornaienchi, N. M. (2018) "Preliminary performance assessment of a novel on-shore system recovering energy from tidal currents," *Applied Energy*, 224, hal. 717–730.  
doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.029.

Basuki, K. T. (2007) "Penurunan konsentrasi HC dan SO<sub>2</sub> pada emisi kendaraan dengan menggunakan TiO<sub>2</sub> lokal yang disisipkan karbon aktif," in *Prosiding PPI - PDIPTN 2007*. Yogyakarta: BATAN, hal. 105–114.

Cagnon, B., Py, X., Guillot, A. dan Stoekli, F. (2003) "The effect of the carbonization/activation procedure on the microporous texture of the subsequent chars and active carbons," *Microporous and Mesoporous Materials*, 57(3), hal. 273–282.  
doi: 10.1016/S1387-1811(02)00597-8.

Cai, L.-X., Li, S.-C., Yan, D.-N., Zhou, L.-P., Guo, F. dan Sun, Q.-F. (2018) "Water-soluble redox-active cage hosting polyoxometalates for selective desulfurization catalysis," *Journal of the American Chemical Society*, 140(14), hal. 4869–4876. doi: 10.1021/jacs.8b00394.

Chen, K., Li, W., Biney, B. W., Li, Z., Shen, J. dan Wang, Z. (2020) "Evaluation of adsorptive desulfurization performance and economic applicability comparison of activated carbons prepared from various carbon sources," *RSC Advances*, 10(66), hal. 40329–40340.  
doi: 10.1039/D0RA07862J.

Ding, L., Wei, J., Dai, Z., Guo, Q. dan Yu, G. (2016) "Study on rapid pyrolysis and in-situ char gasification characteristics of coal and petroleum coke," *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(38), hal. 16823–16834.  
doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.101.

Eliyaz, A., Ljutzkanov, L., Stambolova, I., Blaskov, V., Vassilev, S., Razkazova-Velkova, E. dan Mehandjiev, D. (2013) "Visible light photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> deposited on activated carbon," *Open Chemistry*, 11(3), hal. 464–470. doi: 10.2478/s11532-012-0183-2.

- Fan, L., Chen, J., Guo, J., Jiang, X. dan Jiang, W. (2013) "Influence of manganese, iron and pyrolusite blending on the physiochemical properties and desulfurization activities of activated carbons from walnut shell," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 104, hal. 353–360. doi: 10.1016/j.jaap.2013.06.014.
- Grätzel, M. (2003) "Dye-sensitized solar cells," *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. Elsevier, 4(2), hal. 145–153. doi: 10.1016/S1389-5567(03)00026-1.
- Huang, S., Wu, S., Wu, Y. dan Gao, J. (2017) "Structure characteristics and gasification activity of residual carbon from updraft fixed-bed biomass gasification ash," *Energy Conversion and Management*, 136, hal. 108–118. doi: 10.1016/j.enconman.2016.12.091.
- Ishii, J., Asanuma, M., Murai, R. dan Sumi, I. (2019) "Development of a binder manufacturing process for molded coal utilizing used plastics," *ISIJ International*, 59(4), hal. 665–671. doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-344.
- Ou, H. W., Fang, M. L., Chou, M. S., Chang, H. Y. dan Shiao, T. F. (2020) "Long-term evaluation of activated carbon as an adsorbent for biogas desulfurization," *Journal of the Air & Waste Management Association*, 70(6), hal. 641–648. doi: 10.1080/10962247.2020.1754305.
- Przepiórski, J. (2005) "Deposition of additives onto surface of carbon materials by blending method—general conception," *Materials Chemistry and Physics*, 92(1), hal. 1–4. doi: 10.1016/j.matchemphys.2005.01.010.
- Pujiono, F. E., Mulyati, T. A. dan Fizakia, M. N. (2020) "Activated carbon of coconut shell modified TiO<sub>2</sub> as a batik waste treatment," *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 11(2), hal. 1–10. doi: 10.21771/jrtppi.2020.v11.no2.p1-10.
- Rissa, L. V., Priatmoko, S. dan Harjito (2012) "Sintesis lapis tipis berbasis nanopartikel titania termodifikasi silika secara sol-gel sebagai bahan antifogging," *Jurnal MIPA Unnes*, 35(1), hal. 57–65.
- Siwińska-Stefańska, K., Kubiak, A., Piasecki, A., Goscińska, J., Nowaczyk, G., Jurga, S. dan Jesionowski, T. (2018) "TiO<sub>2</sub>-ZnO binary oxide systems: Comprehensive characterization and tests of photocatalytic activity," *Materials*, 11(5), hal. 841. doi: 10.3390/ma11050841.
- Subagja, R., Royani, A., Suharyanto, A., Andriyah, L. dan Natasha, N. C. (2017) "Pengaruh temperatur dan waktu kalsinasi terhadap perubahan fasa TiO<sub>2</sub>," *Metalurgi*, 29(3), hal. 245. doi: 10.14203/metalurgi.v29i3.298.
- Sun, Z., Wang, M., Fan, J., Zhou, Y. dan Zhang, L. (2020) "Regeneration performance of activated carbon for desulfurization," *Applied Sciences*, 10(17), hal. 6107. doi: 10.3390/app10176107.
- Treeweranuwat, P., Boonyoung, P., Chareonpanich, M. dan Nueangnoraj, K. (2020) "Role of nitrogen on the porosity, surface, and electrochemical characteristics of activated carbon," *ACS Omega*, 5(4), hal. 1911–1918. doi: 10.1021/acsomega.9b03586.
- Xing, B., Shi, C., Zhang, C., Yi, G., Chen, L., Guo, H., Huang, G. dan Cao, J. (2016) "Preparation of TiO<sub>2</sub>/activated carbon composites for photocatalytic degradation of RhB under UV light irradiation," *Journal of Nanomaterials*, 2016, hal. 1–10. doi: 10.1155/2016/8393648.
- Xiong, J., Zhu, W., Li, Hongping, Yang, L., Chao, Y., Wu, P., Xun, S., Jiang, W., Zhang, M. dan Li, Huaming (2015) "Carbon-doped porous boron nitride: metal-free adsorbents for sulfur removal from fuels," *Journal of Materials Chemistry A*, 3(24), hal. 12738–12747. doi: 10.1039/C5TA01346A.
- Xu, M., Wang, Y., Geng, J. dan Jing, D. (2017) "Photodecomposition of NO<sub>x</sub> on Ag/TiO<sub>2</sub> composite catalysts in a gas phase reactor," *Chemical Engineering Journal*, 307, hal. 181–188. doi: 10.1016/j.cej.2016.08.080.
- Xue, D.-M., Qi, S.-C., Zeng, Q.-Z., Lu, R.-J., Long, J.-H., Luo, C., Liu, X.-Q. dan Sun, L.-B. (2019) "Fabrication of nitrogen-doped porous carbons derived from ammoniated copolymer precursor: Record-high adsorption capacity for indole," *Chemical Engineering Journal*, 374, hal. 1005–1012. doi: 10.1016/j.cej.2019.06.024.
- Yang, L., Jiang, X., Yang, Z.-S. dan Jiang, W.-J. (2015) "Effect of MnSO<sub>4</sub> on the removal of SO<sub>2</sub> by manganese-Modified activated coke," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(5), hal. 1689–1696. doi: 10.1021/ie503729a.
- Yang, Y., Lv, G., Deng, L., Lu, B., Li, J., Zhang, J., Shi, J. dan Du, S. (2017) "Ultra-deep desulfurization of diesel fuel via selective adsorption over modified activated carbon assisted by pre-oxidation," *Journal of Cleaner*

- Production*, 161, hal. 422–430. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.05.112.
- Zhang, C., Yang, D., Jiang, X. dan Jiang, W. (2016) "Desulphurization performance of TiO<sub>2</sub>-modified activated carbon by a one-step carbonization-activation method," *Environmental Technology*. Taylor & Francis, 37(15), hal. 1895–1905. doi: 10.1080/09593330.2015.1135991.
- Zhang, Q., Gao, L. dan Guo, J. (2000) "Effects of calcination on the photocatalytic properties of nanosized TiO<sub>2</sub> powders prepared by TiCl<sub>4</sub> hydrolysis," *Applied Catalysis B: Environmental*, 26(3), hal. 207–215. doi: 10.1016/S0926-3373(00)00122-3.
- Zhao, Y., Dou, J., Duan, X., Chai, H., Oliveira, J. dan Yu, J. (2020) "Adverse effects of inherent CaO in coconut shell-Derived activated carbon on its performance during flue gas desulfurization," *Environmental Science & Technology*, 54(3), hal. 1973–1981. doi: 10.1021/acs.est.9b06689.
- Zustriani, A. K. (2019) "Pengaruh aktivasi adsorben biji pepaya terhadap adsorpsi logam besi (Fe) dan tembaga (Cu) dalam air limbah," *Integrated Lab Journal*, 7(1), hal. 29–43. doi: 10.5281/zenodo.2656804.

