

SINTESIS $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ MENGGUNAKAN DAUN KELAPA SAWIT SEBAGAI SUMBER SILIKA POTENSIAL DAN APLIKASINYA SEBAGAI DEKOLORISASI ZAT WARNA

Setyo Eko Nugroho¹, Sal Prima Yudha S^{1*}, Evi Maryanti¹, Muhamad Alvin Reagen¹

¹Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Bengkulu,
Jalan WR. Supratman, Kandang Limun, Kota Bengkulu 38371

* alamat email korespondensi: sp.yudha.s.2022@gmail.com

Abstract

This study aims to synthesize $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ solids from oil palm leaves used for the decolorization of malachite green oxalate. Oil Palm leaves are prepared through washing using 10% HCl. $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ is synthesized using the solid state method in the presence of small amount of solvent. The synthesis results were characterized using X-ray Diffractometer (XRD), X-Ray Fluorescence (XRF), and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). XRD analysis showed that $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ has an amorphous phase for SiO_2 and SnO_2 crystals. FTIR analysis showed the peaks of Si-O-Si and O-Si-O at wave numbers of 1067 cm^{-1} and 796 cm^{-1} and the peak of Sn-O-Sn at wave number of 542 cm^{-1} . $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ shows decolorization in the decolorization process of malachite green oxalate. The best percentage of decolorization efficiency and capacity was obtained in the treatment of $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ under sunlight radiation duration of 180 minutes with a decolorization efficiency percentage of 46.33% with a capacity of 6.952 mg/g. The kinetic and isothermal models obtained in the process of decolorization of MGO by $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ are the first quasi-order reaction kinetics models with a constant value of -0.0135 min^{-1} and the Freundlich isothermal model with a K_f value of 16,545 L/mg. The resulting decolorization performance is a synergistic result between SnO_2 and the solid materials produced by combustion of oil palm leaves.

Keyword: Oil Palm Leaves, $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$, and malachite green oxalate decolorization

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ dari daun kelapa sawit yang digunakan untuk dekolorisasi malachite green oxalate. Daun kelapa sawit disiapkan melalui pencucian dengan menggunakan HCl 10%. $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ disintesis menggunakan metode solid state dengan bantuan sedikit pelarut. Hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan X-ray Diffractometer (XRD) X-Ray Fluorescence (XRF), dan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Analisis XRD memperlihatkan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ memiliki fasa amorf untuk SiO_2 dan kristal SnO_2 . Analisis FTIR memperlihatkan puncak Si-O-Si dan O-Si-O pada bilangan gelombang 1067 cm^{-1} dan 796 cm^{-1} serta puncak Sn-O-Sn pada bilangan gelombang 542 cm^{-1} . $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ menunjukkan dekolorisasi pada proses dekolorisasi malachite green oxalate. Persentase efisiensi dekolorisasi dan kapasitas terbaik didapatkan pada perlakuan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ pada lama penyinaran 180 menit dengan persentase efisiensi dekolorisasi 46,33 % dengan kapasitas 6,952 mg/g. Model kinetika dan isoterm yang didapatkan dalam proses dekolorisasi MGO oleh $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ merupakan model kinetika reaksi orde satu pertama dengan nilai konstanta $-0,0135\text{ menit}^{-1}$ dan Model isoterm Freundlich dengan nilai K_f 16.545 L/mg. Kinerja dekolorisasi yang dihasilkan merupakan hasil sinergis antara SnO_2 dan padatan hasil pembakaran daun kelapa sawit.

Kata Kunci: Daun kelapa Sawit, $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$, dan Dekolorisasi malachite green oxalate

I. PENDAHULUAN

Timah dioksida (SnO_2) merupakan material yang dikenal luas dengan kemampuan katalitiknya yang baik. SnO_2 telah banyak dipelajari tentang aplikasinya dalam proses penghilangan dan degradasi [1], deteksi gas [2], anoda dalam baterai [3], dan aplikasi bidang perangkat optik dan elektronik lainnya. Silika (SiO_2) merupakan material yang paling banyak ditemukan di kerak bumi. Silika dapat ditemukan pada bahan alam seperti mineral dan limbah agrikultur seperti sekam padi [4], daun bambu [5], bagas tebu [6], dan daun kelapa sawit [7], [8], [9], [10]. Silika telah dipelajari aplikasinya dalam

bidang biomedikal [11], pemurnian air limbah [12], dan bahan pendukung dalam sintesis material berbasis logam oksida-silika. $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ merupakan material komposit berbasis logam oksida-silika yang menarik.

$\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ memiliki kemampuan sebagai bahan katalis dalam sintesis material organik seperti Imina [13], 5-hidroksimetilfurfural [14], dan pyrano [2,3-d] pyrimidinone [15]. $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ juga telah banyak digunakan untuk proses dekolorisasi zat warna seperti eosin-Y [16] dan rhodamin B [17].

$\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ telah berhasil disintesis menggunakan metode sol-gel dan dilanjutkan

dengan tahap hidrotermal. Metode ini menggunakan xerogel timah oksida yang disintesis menggunakan dekomposisi termal dari gel asam stannat yang diendapkan dari larutan H_2SnCl_6 menggunakan larutan amonia yang kemudian akan dihidrolisis dengan tetra ortosilikat (TEOS) pada medium asam (pH 4). Material ini memiliki kemampuan sebagai sensor gas CO dalam lingkungan [18].

Penelitian lain, silika mesopori lainnya seperti SBA-15 telah digunakan sebagai templat untuk mengurangi agregat pada SnO_2 . Metode sintesis impegrasi menjadi pilihan terbaik untuk meningkatkan luas permukaan spesifik dari SnO_2 . Metode ini menggunakan media larutan dengan merendam material silika berpori ke dalam larutan yang berisi prekursor SnCl_4 sebagai sumber Sn dan agen pereduksi seperti NaBH_4 . Kemudian SnO_2 secara perlahan akan terperangkap pada pori-pori SBA-15 [19].

Mesoporus $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ telah berhasil disintesis menggunakan jalur sintesis sol-gel non-hidrolitik (NHSG). Metode ini menerapkan polikondensasi dari silikon tetraasetat (SiOAc_4) dengan tetrakis(diethylamido)tin yang menghasilkan penghilangan gugus asatemida dan menghasilkan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ yang memiliki gugus Si-O-Sn. Kompoist ini memiliki kemampuan aminolisis stirena oksida dengan anilin yang baik. kemampuan katalitik yang

baik ini dikarenakan terdapat situs aktif Brønsted pada katalis $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ [20].

Selain menggunakan prekursor komersil, penggunaan bahan alam berbasis mineral dan limbah agrikultur telah diterapkan dalam sintesis komposit $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$. Kaolin telah digunakan sebagai prekursor silika pada sintesis komposit $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ dengan menggunakan metode deposisi-presipitasi. Mekanisme sintesis dengan menggunakan metode tersebut adalah ketika pH larutan meningkat, silika dari silika berpori menjadi bermuatan negatif dan pH menjadi lebih besar dari pada point of zero charge (PZD pH 2) sehingga SnO_2 akan teradsorp secara elektrostatik. Hasilnya terjadi penurunan ukuran pori-pori dari silika yang disebabkan karena masuknya partikel SnO_2 ke dalam pori-pori silika tersebut. Material ini memiliki kemampuan dekolorisasi Rhodamin B di bawah lampu UV 4 W dengan persentase degradasi sebesar 15,28 % [17].

Disisi lain, penggunaan sekam padi juga telah dimanfaatkan dalam sintesis komposit $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$. SiO_2 dari sekam padi disiapkan melalui proses isolasi menggunakan NaOH yang kemudian akan dititrasi menggunakan larutan asam nitrat yang mengandung 10 % berat Sn (0,57 g $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Material ini memiliki kemampuan dekolorisasi metilen biru pada lampu UV λ 320 nm [21]. Penelitian lain melaporkan sekam padi dapat langsung

digunakan sebagai sumber silika biogenik dalam sintesis material $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ dengan mencampurkan sekam padi ke dalam larutan SnCl_2 dan amonium hidroksida sebagai pengatur pH dan kemudian dipanaskan di dalam microwave furnace dengan suhu 500°C selama 5 jam. Namun dari hasil analisis XRD puncak dari silika amorf tidak terlihat dikarenakan sifat kristal yang tinggi dari partikel SnO_2 terbentuk di permukaan silika amorf [4].

Berdasarkan uraian jalur sintesis komposit $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ hanya sedikit yang berfokus pada pemanfaatan sumber biogenik silika dari sumber daya yang berkelanjutan. Secara spesifik telah dilakukan penelitian terkait penggunaan daun kelapa sawit sebagai prekursor silika pada pembuatan material tingkat lanjut. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan potensi silika dari daun kelapa sawit dalam preparasi material komposit $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ dengan cara degradasi in situ dari kompleks Si serta aplikasinya dalam dekolorisasi zat warna malachite green oxalate (MGO).

II. METODELOGI

2.1. Alat

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini meliputi timbangan analitik, blender (philip), *magnetic stirrer*, ayakan 100 mesh, serta alat-alat gelas seperti Erlenmeyer,

gelas kimia, dan labu ukur, furnace (Nabertherm), Spektrofotometer UV-Vis (Carry 60) *X-Ray Diffraction* (Rigaku Miniflex 600). *X-Ray Fluorescence* (Rigaku ZSX Primus), dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (Alpha bruker).

2.2. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah daun kelapa sawit yang didapatkan disekitar wilayah Universitas Bengkulu, kertas saring, $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (*sigma aldrich*), HCl 37%, *malachite green oxalate*, akuades dan air demineralisasi (Akua DM).

2.3. Preparasi Daun Kelapa Sawit

Daun kelapa sawit (DKS) yang telah dibersihkan menggunakan air mengalir kemudian dipotong kecil-kecil dan dikeringkan pada suhu ruangan tanpa terkena sinar matahari langsung selama 16 hari. Selanjutnya daun kelapa sawit dihaluskan menggunakan *blender*, daun yang telah halus kemudian diayak menggunakan ayakan 100 mesh. Sebanyak 50 g daun kelapa sawit yang telah diayak kemudian ditimbang dan dimasukkan ke dalam gelas kimia. Sebanyak 500 mL HCl 10% dimasukkan ke dalam gelas kimia tersebut. Campuran kemudian diaduk selama 2 jam pada suhu 80°C . Campuran dibiarkan selama 7 hari untuk kemudian dipisahkan melalui metode dekantasi. Residu DKS kemudian dicuci beberapa kali hingga pHnya ≤ 5 dan dikeringkan hingga benar-benar

kering dibawah sinar matahari selama 7 hari. DKS yang telah kering diayak kembali menggunakan ayakan 100 mesh untuk mendapatkan bubuk DKS.

2.4. Pembuatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ dari Daun Kelapa Sawit

Metode yang digunakan merupakan modifikasi dari metode sebelumnya [9]. 2,256 g $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (10 mmol) ditimbang dan dimasukkan ke dalam krus lalu ditambahkan HCl 37% sebanyak 5 mL kemudian campuran diaduk hingga homogen. Air demineralisasi sebanyak 25 mL dan 5 g bubuk DKS ditambahkan ke dalam campuran, kemudian campuran diaduk sembari dipanaskan pada suhu 80 °C untuk menguapkan pelarut. Campuran yang dihasilkan kemudian dikalsinasi pada suhu 900 °C selama 3 jam.

2.5. Karakterisasi Menggunakan XRD, XRF, dan FTIR

Material yang sudah didapatkan dianalisis menggunakan XRD untuk menentukan fasa dan kristalinitas, FTIR untuk mengetahui gugus fungsional, dan XRF untuk mengetahui komponen senyawa yang terdapat pada material yang dihasilkan. Hasil karakterisasi kemudian dibandingkan dengan data standar dan data dari literatur.

2.6. Pengujian dekolorisasi *Malachite Green Oxalate*

Dekolorisasi *malachite green oxalate* (MGO) dilakukan dengan cara dekolorisasi menggunakan padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ dan bantuan sinar matahari. Sebanyak 0,01 g $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ dimasukkan ke dalam gelas beker, lalu sebanyak 20 mL larutan MGO 8 ppm ditambahkan ke dalam gelas beker dan diaduk selama 15 menit pada ruang gelap terlebih dahulu untuk mencapai kesetimbangan adsorpsi-desorpsi sebelum disinari dengan matahari pada pukul 10.30-13.30 WIB. Campuran disinari dengan cara ditutup menggunakan penutup kaca dan hasil reaksi dilakukan pengamatan setiap 30 menit sekali. Larutan diambil menggunakan pipet tetes langsung tanpa dipisahkan terlebih dahulu dengan sentrifugasi untuk dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis dan dikembalikan setelah dianalisis. Aktivitas dekolorisasi konsentrasi MGO dievaluasi berdasarkan kinetika reaksi dan isoterm adsorpsi berdasarkan perubahan efisiensi dekolorisasi (%DE) dan kapasitas (Q).

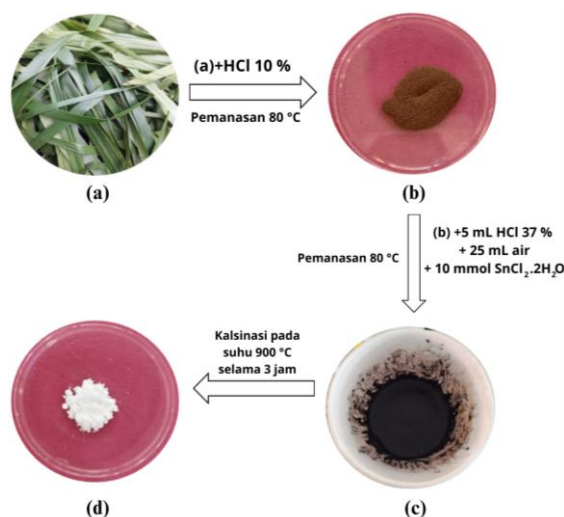
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Preparasi Material Padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ dan Karakterisasi

Skema proses reaksi sintesis $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ dapat dilihat pada Gambar 1. Daun kelapa sawit (DKS) (Gambar 1a, 1b) dihaluskan menjadi bubuk kemudian diberikan perlakuan pencucian dengan HCl 10% untuk

menghilangkan pengotor organik dan meningkatkan kadar silika yang terdapat pada DKS [7]. Di dalam wadah, DKS ditambahkan ke dalam campuran yang telah berisi campuran 5 mL HCl 37%, 10 mmol $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, dan 25 mL air demineral (Gambar 1c). HCl 37% ditambahkan bertujuan agar SnCl_2 dapat larut dengan baik pada proses reaksi dan tidak membentuk garam bewarna putih yang tak larut yaitu $\text{Sn}(\text{OH})\text{Cl}$ atau timah hidroklorida [22]. Campuran reaksi dipanaskan diruangan terbuka dengan suhu 80 °C untuk menghilangkan sisa pelarut yang digunakan, kemudian dilanjutkan dengan proses kalsinasi pada suhu 900 °C selama 2 jam dengan perlahan untuk menguraikan bahan-bahan organik yang terkandung di dalam DKS. Campuran didinginkan perlahan di dalam furnace selama semalaman. Hasil proses degradasi karbotermik menghasilkan bubuk bewarna putih (Gambar 1d). Untuk DKS sebanyak 5 g tanpa penambahan campuran 5 mL HCl 37%, 10 mmol $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, dan 25 mL air demineral, diberikan perlakuan yang sama.

Gambar 2a menampilkan difraktogram dari produk hasil sintesis. Pola difraktogram dari produk hasil sintesis menunjukkan puncak yang melebar pada $2\theta = 21,18^\circ$ yang merupakan puncak khas dari silika amorf.

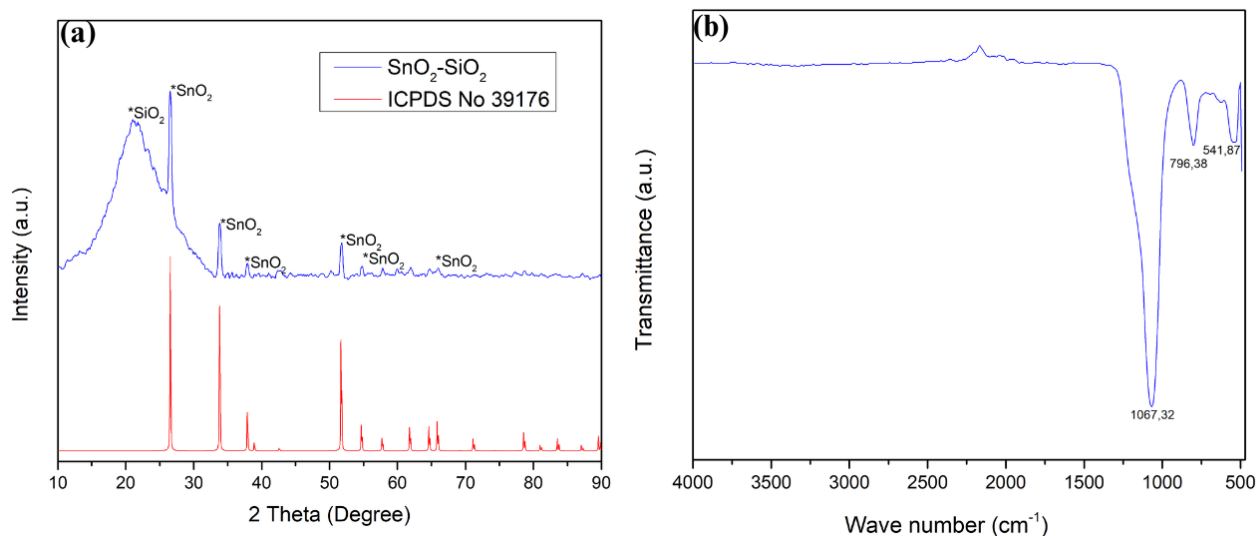


Gambar 1. (a) daun kelapa sawit, (b) bubuk daun kelapa sawit yang telah diberikan perlakuan HCl 10%, (c) campuran reaksi sebelum kalsinasi, dan (d) produk reaksi.

Sementara puncak tajam terbentuk pada $2\theta = 26,6^\circ, 33,9^\circ, 38,2^\circ, 42,7^\circ, 51,8^\circ, 62,02^\circ, 64,84^\circ, \text{ dan } 68,82^\circ$ mengkonfirmasi telah terbentuknya kristal SnO_2 berdasarkan data ICSD No 39176 untuk SnO_2 . Hasil karakterisasi menggunakan XRD mengkonfirmasi bahwasanya material yang didapatkan merupakan padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$. Hasil yang sama juga telah dilaporkan pada penelitian sebelumnya [13]. Gambar 2b menampilkan hasil analisis FTIR dari produk hasil sintesis. Puncak pada bilangan gelombang $1067,32 \text{ cm}^{-1}$ dan $796,38 \text{ cm}^{-1}$ merupakan pola vibrasi dari Si-O-Si dan O-Si-Oi [23]. Puncak lain pada bilangan gelombang $541,87 \text{ cm}^{-1}$ merupakan pola vibrasi molekul dari Sn-O. Pola serapan pada daerah $650\text{-}500 \text{ cm}^{-1}$ merupakan pola vibrasi *stretching* dari

Sn-O dan vibrasi *bending* O-Sn-O [24]. Hasil karakterisasi menggunakan XRF pada Tabel 1 terlihat mineral pengotor dengan jumlah

sangat kecil yang tidak sepenuhnya hilang pada tahap perlakuan dengan HCl 10%.



Gambar 2. (a) pola difraktogram dari SnO_2 - SiO_2 dan (b) spektrum FTIR dari SnO_2 - SiO_2

Table 1. Hasil analisis XRF dari SnO_2 - SiO_2

Senyawa	SnO_2 - SiO_2 dari DKS (% massa)
Al_2O_3	0,135
SiO_2	97,8
P_2O_5	0,385
K_2O	0,315
CaO	0,837
Fe_2O_3	0,0760
PdO	0,0557
SnO_2	0,405

3.2. Aplikasi Padatan SnO_2 - SiO_2

Padatan SnO_2 - SiO_2 diaplikasikan untuk menghilangkan pewarna *malachite green oxalate* (MGO). Proses dekolorisasi MGO oleh SnO_2 - SiO_2 dilakukan dengan cara pengujian di bawah sinar matahari dan di

tempat tertutup. Pengujian dekolorisasi dilakukan pada pukul 10.30-13.30 WIB. Wadah botol tempat proses adsorpsi berlangsung ditutup dengan tutup kaca bertujuan untuk meningkatkan efisiensi adsorpsi dari MGO dan untuk mengurangi penguapan pelarut air akibat pemanasan oleh sinar matahari [25]. Secara garis besar hasil analisis terhadap kapasitas adsorpsi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 menjelaskan kinerja dekolorisasi yang dihasilkan oleh padatan SnO_2 - SiO_2 dan padatan hasil pembakaran DKS. Proses dekolorisasi di bawah sinar matahari menggunakan padatan SnO_2 - SiO_2 menghasilkan persentase dekolorisasi

46,33%. Namun, persentase ini merupakan gabungan dari dekolorisasi $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ tanpa penyinaran sebesar 19,09% dan MGO tanpa padatan dengan penyinaran sebesar 21,3%. Maka, proses dekolorisasi di bawah sinar matahari langsung menggunakan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ menghasilkan persentase sebesar 5,94%.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ tidak menghasilkan dekolorisasi MGO yang cukup tinggi, yang mungkin saja dapat disebabkan oleh beberapa hal seperti tidak adanya penambahan zat pengoksidasi kuat seperti H_2O_2 [26].

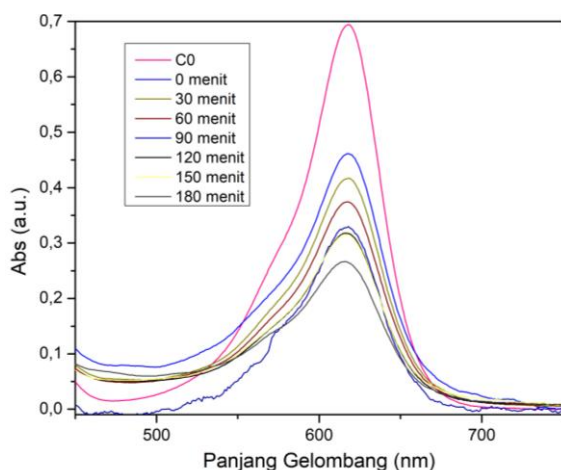
Table 2. Hasil dekolorisasi MGO menggunakan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$.

Material	Kondisi	% dekolorisasi	Kapasitas
Padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$	Di bawah sinar	46,33%	6,952 mg/g
Padatan hasil pembakaran DKS	matahari	41,2%	4,33 mg/g
MGO		21,3%	
Padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$	Di tempat	19,09%	2,864 mg/g
Padatan hasil pembakaran DKS	tertutup	42,61%	4,478 mg/g
MGO		0,5%	

Dekolorisasi MGO menggunakan padatan hasil pembakaran DKS dan dibantu penyinaran matahari menghasilkan persentase 41,2%. Jika dibandingkan dengan perlakuan di tempat tertutup, padatan yang sama menghasilkan persentase yang kurang lebih sama. Hal ini menandakan bahwa padatan hasil pembakaran DKS sudah efektif dalam proses dekolorisasi baik di ruang gelap maupun di bawah sinar matahari. Persentase dekolorisasi padatan hasil pembakaran DKS dengan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ di bawah sinar matahari menghasilkan perbedaan persentase sebesar 5,13%. Hal ini menandakan bahwa kinerja

dekolorisasi yang dihasilkan dalam penelitian ini merupakan kinerja sinergis antara padatan SnO_2 dengan hasil pembakaran daun kelapa sawit. Hasil ini juga membuktikan bahwa proses utama yang terjadi di dalam proses dekolorisasi adalah proses adsorpsi.

Gambar 3 menunjukkan proses dekolorisasi MGO menggunakan padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ selama 180 menit dengan selang waktu 30 menit.



Gambar 3. Hasil spektrofotometer UV Vis dekolorisasi MGO menggunakan SnO₂-SiO₂

Berdasarkan Gambar 3, nilai efisiensi dekolorisasi dan kapasitas menggunakan SnO₂-SiO₂ dapat dirangkum dalam Tabel 3.

Table 3. Hasil kapasitas dekolorisasi MGO menggunakan SnO₂-SiO₂

Material	t (menit)	% DE (%)	Q (mg/g)
SnO ₂ -SiO ₂	0	0	0
	30	12,54	1,881
	60	19,99	2,999
	90	29,50	4,427
	120	33,68	5,053
	150	40,95	6,145
	180	46,33	6,952

Dua model kinetika digunakan untuk menganalisis data kinetika yang berkaitan dengan proses adsorpsi MGO oleh sampel SnO₂-SiO₂. Model kinetika reaksi orde semu-pertama memenuhi persamaan 1.

$$(Q_e - Q_t) = \log \log Q_e - \frac{k}{2.303} t \quad (1)$$

Model kinetika reaksi orde semu-kedua memenuhi persamaan 2.

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{kQ_e^2} + \frac{1}{Q_e} t \quad (2)$$

Pada persamaan tersebut Q_e dan Q_t adalah jumlah MGO yang terserap pada waktu kesetimbangan (mg/g), t adalah waktu (menit) dan k adalah konstanta (menit⁻¹).

Untuk menggambarkan desain sistem adsorpsi zat warna MGO pada kesetimbangan, digunakan model isoterm adsorpsi yaitu isoterm Langmuir dan isoterm Freundlich. Isoterm Langmuir memenuhi persamaan 3.

$$\frac{C_e}{Q} = \frac{1}{K_L Q_{maks}} + \frac{C_e}{Q_{maks}} \quad (3)$$

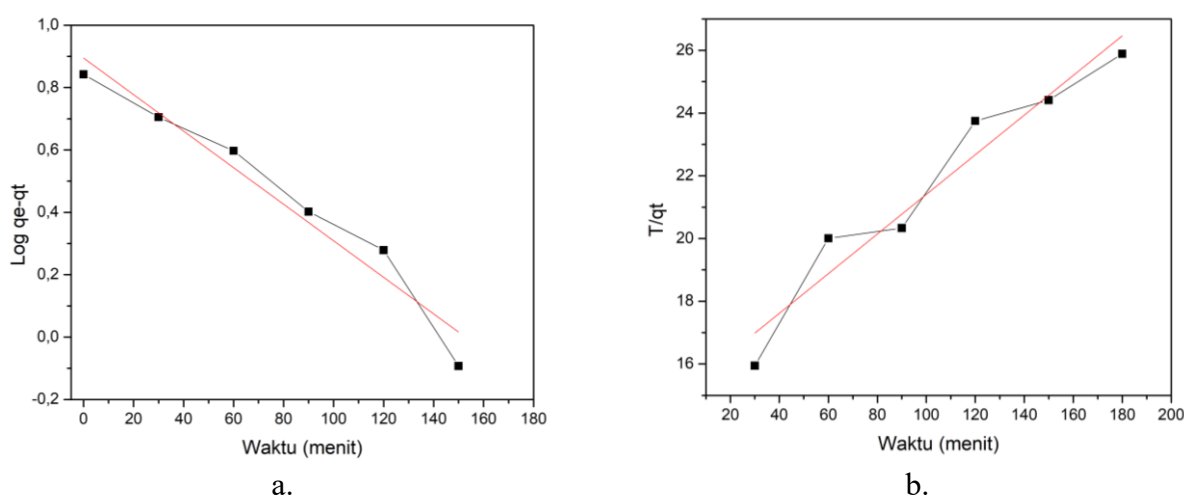
Isoterm Freundlich memenuhi persamaan 4.

$$Q = k_f \cdot C_e^{\frac{1}{n}}$$

$$\log \log Q = \log \log k_f + \log \frac{1}{n} \log C_e \quad (4)$$

Pada persamaan tersebut, C_e adalah konsentrasi MGO pada waktu kesetimbangan (ppm), K_L dan K_f adalah konstanta (L/mg), Q dan Q_{maks} adalah jumlah MGO yang terserap dan kapasitas adsorpsi maksimal (mg/g), dan n adalah konstanta empiris. Hasil penggabungan antar masing-masing variabel dapat dilihat pada Gambar 4.

Gambar 4a memperlihatkan grafik untuk kinetika orde semu pertama, sedangkan Gambar 4b memperlihatkan grafik untuk kinetika orde semu kedua. Nilai masing-masing orde dirangkum pada Tabel 4.



Gambar 4. Kinetika reaksi untuk proses dekolorisasi MGO menggunakan padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ (a) orde semu pertama dan (b) orde semu kedua

Table 4. Model kinetika dekolorisasi MGO oleh padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$

Material	Kinetika Reaksi	
	Orde Semu Pertama	Orde Semu Kedua
Padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$	$k = -0,0135 \text{ menit}^{-1}$	$k = 0,0013 \text{ menit}^{-1}$
	$R^2 = 0,94164$	$R^2 = 0,92429$

Tabel 4 menunjukkan nilai konstanta dan nilai regresi (R^2) kinetika dari proses dekolorisasi MGO oleh padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$. Dari hasil perbandingan nilai R^2 dari kedua model kinetika reaksi yang digunakan, model kinetika reaksi orde semu-pertama menghasilkan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan model kinetika reaksi orde semu kedua. Model kinetika reaksi orde semu pertama menandakan bahwasanya larutan MGO dapat teradsorpsi ke permukaan padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ [27]. Gambar 5 menunjukkan pola isoterm adsorpsi dari

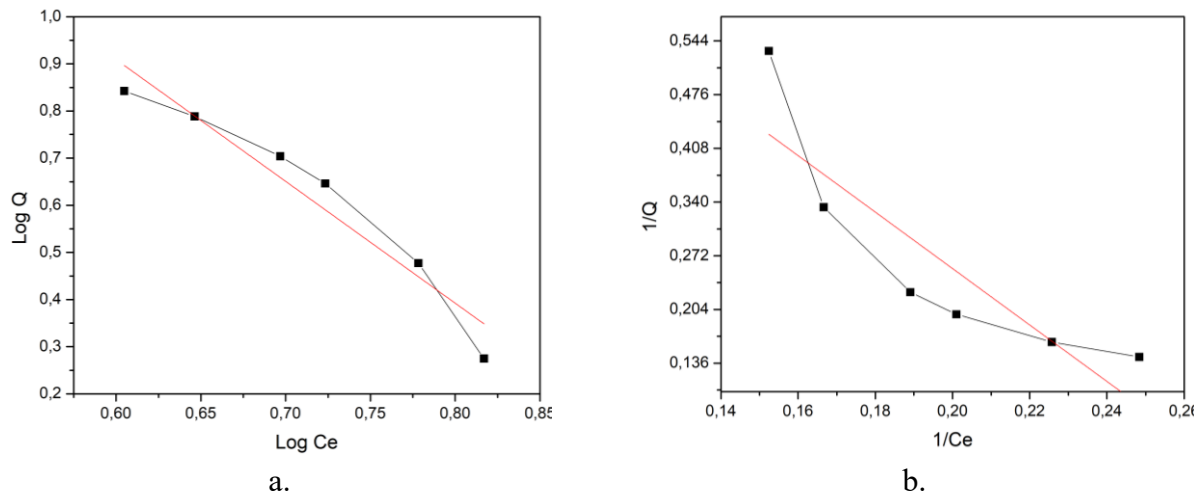
proses dekolorisasi MGO oleh padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$.

Data nilai isoterm dan regresi dirangkum dalam Tabel 5. Dari hasil perhitungan terlihat bahwasanya model isoterm Freundlich memiliki nilai R^2 yang lebih besar jika dibandingkan dengan nilai R^2 dari isoterm Langmuir. Sehingga dapat disimpulkan bahwasanya proses dekolorisasi MGO terjadi secara multilayer [28].

Nilai $1/n$ kurang dari satu merupakan indikasi bahwa signifikan terjadi pada konsentrasi rendah tetapi peningkatan jumlah yang teradsorpsi dengan konsentrasi menjadi

kurang signifikan pada konsentrasi yang lebih tinggi dan sebaliknya [29]. Nilai negatif pada K_L mengindikasikan bahwasanya model

Isoterm Langmuir kurang cocok untuk diterapkan pada padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$.



Gambar 5. Isoterm untuk proses dekolorisasi MGO menggunakan padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ (c) Isoterm Freundlich dan (d) Isoterm Langmuir

Table 5. Model isoterm dekolorisasi MGO oleh padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$

Material	Isoterm Adsorpsi	
	Isoterm freundlich	Isoterm lagmuir
Padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$	$n = -0,3231$	$Q_{\max} = 1,03 \text{ mg/g}$
	$K_F = 16.545 \text{ l/mg}$	$K_L = -0,2881 \text{ l/mg}$
	$R^2 = 0,9394$	$R^2 = 0,7724$

IV. KESIMPULAN

Daun kelapa sawit dapat dimanfaatkan sebagai prekursor pengganti silika komersil dalam sintesis material padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ dengan SnO_2 yang diperoleh berfasa kristal. Padatan $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ memiliki kemampuan yang baik dalam dekolorisasi *malachite green oxalate* dengan hasil terbaik pada penyinaran matahari selama 180 menit dengan persentase

dekolorisasi dan kapasitasnya masing-masing 46,33% dan 6,952 mg/g. Tetapi, kinerja ini sebenarnya dibantu dengan adanya padatan hasil pembakaran daun kelapa sawit dan juga proses dekolorisasi MGO tanpa adanya padatan di bawah sinar matahari. Maka, hasil ini menunjukkan bahwa kinerja dekolorisasi MGO yang diperoleh pada penelitian ini, merupakan kinerja sinergis antara padatan

hasil pembakaran DKS dengan material SnO_2 . Model kinetika dan isoterm juga mendukung proses terjadinya dekolorisasi MGO dengan dibuktikannya bahwa dekolorisasi yang terjadi mengikuti model kinetika orde satu semu sedangkan isoterm mengikuti isoterm Freundlich.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada DRTPM-DIKTI 2024 yang telah memberikan dukungan dan pendanaan penelitian ini dengan skema Penelitian Tesis Magister (PTM).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Bathula, T. R. Gurugubelli, J. Yoo, and K. Yoo, "Recent Progress in the Use of SnO_2 Quantum Dots: From Synthesis to Photocatalytic Applications," *Catalysts*, vol. 13, no. 4, p. 765, Apr. 2023, doi: 10.3390/catal13040765.
- [2] Y. Masuda, "Recent advances in SnO_2 nanostructure based gas sensors," *Sens Actuators B Chem*, vol. 364, p. 131876, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.snb.2022.131876.
- [3] S. Zhao *et al.*, " SnO_2 as Advanced Anode of Alkali-Ion Batteries: Inhibiting Sn Coarsening by Crafting Robust Physical Barriers, Void Boundaries, and Heterophase Interfaces for Superior Electrochemical Reaction Reversibility," *Adv Energy Mater*, vol. 10, no. 6, Feb. 2020, doi: 10.1002/aenm.201902657.
- [4] R. Vijayan, G. S. Kumar, G. Karunakaran, N. Surumbarkuzhali, S. Prabhu, and R. Ramesh, "Microwave combustion synthesis of tin oxide-decorated silica nanostructure using rice husk template for supercapacitor applications," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 31, no. 7, pp. 5738–5745, Apr. 2020, doi: 10.1007/s10854-020-03142-y.
- [5] I. Fatimah, G. Fadillah, I. Sahroni, A. Kamari, S. Sagadevan, and R.-A. Doong, "Nanoflower-like composites of ZnO/SiO_2 synthesized using bamboo leaves ash as reusable photocatalyst," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 14, no. 3, p. 102973, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.arabjc.2020.102973.
- [6] W. Hendra Saputera, C. Egiyawati, A. Setyani Putrie, A. Fathoni Amri, J. Rizkiana, and D. Sasongko, "Titania Modified Silica from Sugarcane Bagasse Waste for Photocatalytic Wastewater Treatment," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1143, no. P. 1, 012073, Apr. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1143/1/012073.

- [7] E. Onoja *et al.*, “Insights into the physicochemical properties of the Malaysian oil palm leaves as an alternative source of industrial materials and bioenergy,” *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, vol. 13, no. 4, p. 623–631, Dec. 2017, doi: 10.11113/mjfas.v0n0.681.
- [8] S. Yudha S., P. Robkhob, T. Imboon, A. Falahudin, Asdim, and S. Thongmee, “ZnO-SiO₂ and Zn₂SiO₄ Synthesis Utilizing Oil Palm Leaves for Degradation of Methylene Blue Dye in Aqueous Solution,” *Journal of the Indonesian Chemical Society*, vol. 3, no. 2, p. 94, Aug. 2020, doi: 10.34311/jics.2020.03.2.94.
- [9] S. Yudha S, A. Falahudin, Asdim, and J. I. Han, “In Situ Preparation of Gold–Silica Particles from a Mixture of Oil Palm Leaves and Chloroauric Acid for Reduction of Nitroaromatic Compounds in Water,” *Waste Biomass Valorization*, vol. 12, no. 7, p. 3773–3780, Jul. 2021, doi: 10.1007/s12649-020-01273-1.
- [10] S. Yudha S, C. Banon, A. Falahudin, M. A. Reagen, N. H. M. Kaus, and S. Salaeh, “Fabrication of Silver-Silica Composite using the Carbo-thermal Degradation of Oil Palm Leaves for the Reduction of p-nitrophenol,” *International Journal of Technology*, vol. 14, no. 2, p. 290, Apr. 2023, doi: 10.14716/ijtech.v14i2.5608.
- [11] Y. Huang *et al.*, “Silica nanoparticles: Biomedical applications and toxicity,” *Biomedicine & Pharmacotherapy*, vol. 151, p. 113053, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.biopha.2022.113053.
- [12] S. Nasreen, A. Urooj, U. Rafique, and S. Ehrman, “Functionalized mesoporous silica: absorbents for water purification,” *Desalination Water Treat*, vol. 57, no. 60, p. 29352–29362, Dec. 2016, doi: 10.1080/19443994.2016.1185744.
- [13] G. G. kumar, C. J. Kirubaharan, A. Rhan Kim, and D. J. Yoo, “Catalytic Activity of Green and Recyclable Nanometric Tin Oxide-Doped Silica Nanospheres in the Synthesis of Imines,” *Ind Eng Chem Res*, vol. 51, no. 48, p. 15626–15632, Dec. 2012, doi: 10.1021/ie302301p.
- [14] T. Zhang *et al.*, “Efficient production of 5-hydroxymethylfurfural from glucose over silica-tin oxide composite catalysts,” *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 311, p. 110717, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.micromeso.2020.110717.
- [15] A. A. Yelwande and M. K. Lande, “An

- efficient one-pot three-component synthesis of 7-amino-2, 4-dioxo-5-aryl-1,3,4,5-tetrahydro-2 H-pyrano[2,3-d]pyrimidine-6-carbonitriles catalyzed by SnO₂/SiO₂ nanocomposite,” *Research on Chemical Intermediates*, vol. 46, no. 12, p. 5479–5498, Dec. 2020, doi: 10.1007/s11164-020-04273-x.
- [16] A. Shaikh and G. Q. Shar, “Preparation of Silica Coated Tin Oxide Nano-Catalyst as an Efficient Applicant for Catalytic Degradation of Eosin-Y Dye,” *Türk Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Dergisi/Turkish Journal of Physiotherapy and Rehabilitation*, vol. 32, p. 28888–28912, Nov. 2021.
- [17] L. Hermida, L. Purwati, and J. Agustian, *Inkoporasi Oksida Timah (SnO₂) ke dalam Silika Berpori dari Kaolin Alam Lampung dan Kajian Aplikasinya sebagai Fotokatalis untuk Fotodegradasi Rhodamin B Incorporation of Tin Oxide (SnO₂) into Porous Silica from Lampung Natural Kaolinite and Its Application Study as a Photocatalyst for Photodegradation of Rhodamine B*. 2020.
- [18] D. Gulevich *et al.*, “Nanocomposites SnO₂/SiO₂ for CO Gas Sensors: Microstructure and Reactivity in the Interaction with the Gas Phase,” *Materials*, vol. 12, no. 7, p. 1096, Apr. 2019, doi: 10.3390/ma12071096.
- [19] N. R. Srinivasan and R. Bandyopadhyaya, “Highly accessible SnO₂ nanoparticle embedded SBA-15 mesoporous silica as a superior photocatalyst,” *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 149, no. 1, p. 166–171, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.micromeso.2011.06.037.
- [20] D. Skoda *et al.*, “Mesoporous SnO₂ – SiO₂ and Sn–silica–carbon nanocomposites by novel non-hydrolytic templated sol–gel synthesis,” *RSC Adv*, vol. 6, no. 73, p. 68739–68747, 2016, doi: 10.1039/C6RA16556G.
- [21] F. Adam, J. N. Appaturi, Z. Khanam, R. Thankappan, and Mohd. A. M. Nawi, “Utilization of tin and titanium incorporated rice husk silica nanocomposite as photocatalyst and adsorbent for the removal of methylene blue in aqueous medium,” *Appl Surf Sci*, vol. 264, p. 718–726, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.apsusc.2012.10.106.
- [22] D. de Guzman and R. de Leon, “Preliminary Optimization and Kinetics of SnCl₂-HCl Catalyzed Hydrothermal Conversion of

- Microcrystalline Cellulose to Levulinic Acid,” *J Renew Mater*, vol. 9, no. 1, p. 145–162, 2021, doi: 10.32604/jrm.2021.011646.
- [23] M. Waseem, S. Mustafa, A. Naeem, K. Shah, I. Shah, and Ihsan-Ul-Haque, “Synthesis and characterization of silica by sol-gel method,” *J. Pak. Mater. Soc.*, vol. 3, pp. 19–21, Jul. 2009.
- [24] K. C. Suresh, S. Surendhiran, P. Manoj Kumar, E. Ranjith Kumar, Y. A. S. Khadar, and A. Balamurugan, “Green synthesis of SnO₂ nanoparticles using *Delonix elata* leaf extract: Evaluation of its structural, optical, morphological and photocatalytic properties,” *SN Appl Sci*, vol. 2, no. 10, p. 1735, Oct. 2020, doi: 10.1007/s42452-020-03534-z.
- [25] P. Paredes *et al.*, “Sunlight-Driven Photocatalytic Degradation of Methylene Blue with Facile One-Step Synthesized Cu-Cu₂O-Cu₃N Nanoparticle Mixtures,” *Nanomaterials*, vol. 13, no. 8, p. 1311, Apr. 2023, doi: 10.3390/nano13081311.
- [26] I. Fatimah *et al.*, “Physicochemical characteristics and photocatalytic performance of TiO₂/SiO₂ catalyst synthesized using biogenic silica from bamboo leaves,” *Heliyon*, vol. 5, no. 11, p. e02766, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02766.
- [27] G. Asefa, D. Negussa, G. Lemessa, and T. Alemu, “The Study of Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Malachite Green Dye on Ni–TiO₂ Surface Modified with Polyaniline,” *J Nanomater*, vol. 2024, p. 1–11, Feb. 2024, doi: 10.1155/2024/5259089.
- [28] B. Brazesh, S. M. Mousavi, M. Zarei, M. Ghaedi, S. Bahrani, and S. A. Hashemi, “Chapter 9 - Biosorption,” in *Interface Science and Technology*, vol. 33, M. Ghaedi, Ed., Elsevier, 2021, p. 587–628. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818805-7.00003-5>.
- [29] J. C. Igwe and A. A. Abia, “Adsorption isotherm studies of Cd (II), Pb (II) and Zn (II) ions bioremediation from aqueous solution using unmodified and EDTA-modified maize cob,” *Eclética Química*, vol. 32, no. 1, p. 33–42, 2007, doi: 10.1590/S0100-46702007000100005.