



Pengaruh Variasi Surfaktan Terhadap Struktur, Morfologi, dan Aktivitas Katalitik TiO_2 Mesopori yang Disintesis dengan Metode Kopresipitasi

Sarinah Pakpahan^{1,*}), Rimawanto Gultom², Aswin¹

¹⁾ Program Studi D-IV Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan, Sekolah Vokasi, Universitas Negeri Gorontalo

Jl. Jend. Sudirman No.6, Dulalowo Tim., Kec. Kota Tengah, Kota Gorontalo, Gorontalo 96128

²⁾ Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Pattimura

Jln. Ir. M. Putuhena, Ambon, Maluku 97233, Indonesia

*E-mail korespondensi: [sarinhpakpahan@ung.ac.id](mailto:sarinahpakpahan@ung.ac.id)

Article Info:

Received: 14-11-2025

Revised: 18-12-2025

Accepted: 29-12-2025

Keywords:

DSSC, Coprecipitation, Mesoporous TiO_2 , Surfactant



Abstract

This study examines the effect of different surfactants: Cetyltrimethylammonium Bromide (CTAB), Didodecyldimethylammonium Bromide (DDAB), and Methyltriocetylammonium Bromide (MTAB) on the synthesis of mesoporous TiO_2 using the co-precipitation method. Characterization was performed using Raman Spectroscopy, BET (Brunauer-Emmett-Teller) surface area measurement, Differential Scanning Calorimetry (DSC), and X-ray Diffraction (XRD) techniques. The results indicate that the highest surface area was achieved by CTAB 98.32 m²/g, while MTAB yielded the greatest pore volume 0.2517 cc/g and the largest average pore diameter 10.498 nm. Furthermore, a simple catalytic activity test was performed through the degradation of methylene blue under UV irradiation, which showed that the TiO_2 -MTAB sample had the highest degradation rate of 0.032 min⁻¹. This indicates a positive correlation between pore size and photocatalytic efficiency.

PENDAHULUAN

Pengembangan material semikonduktor berbasis TiO_2 telah menjadi fokus penting dalam berbagai aplikasi energi dan katalisis karena stabilitas kimia, aktivitas fotokatalitik, serta kemampuannya membentuk struktur berpori[1]. TiO_2 mesopori secara khusus banyak menarik perhatian karena memiliki luas permukaan dan volume pori yang lebih besar dibandingkan TiO_2 padat, sehingga dapat meningkatkan proses adsorpsi, difusi reaktan, dan jumlah situs aktif pada berbagai reaksi katalitik. Karakteristik ini menjadikan TiO_2 mesopori relevan dalam beragam teknologi, termasuk fotokatalisis, sensor, dan konversi energi berbasis semikonduktor [2].

Salah satu pendekatan penting dalam pembentukan struktur mesopori adalah penggunaan surfaktan sebagai templat. Surfaktan seperti *cetyltrimethylammonium bromide* (CTAB), *didodecyldimethylammonium bromide* (DDAB), dan *methyltriocetylammonium bromide* (MTAB) diketahui mampu mempengaruhi ukuran pori, keteraturan struktur, serta morfologi partikel TiO_2 [3]. Variasi struktur molekul surfaktan dapat menghasilkan perbedaan signifikan dalam interaksi surfaktan dan prekursor, sehingga berdampak pada sifat fisik dan kimia material akhir, termasuk kristalinitas, luas permukaan spesifik, dan distribusi pori[4].

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji peran surfaktan dalam sintesis TiO_2 mesopori, namun studi yang secara langsung membandingkan pengaruh surfaktan CTAB, DDAB, dan MTAB dalam sistem sintesis yang sama, khususnya menggunakan metode

kopresipitasi masih terbatas. Selain itu, pemahaman mengenai bagaimana variasi surfaktan memodifikasi struktur, morfologi, serta aktivitas katalitik TiO_2 mesopori masih memerlukan kajian yang lebih sistematis.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi surfaktan CTAB, DDAB, dan MTAB terhadap struktur, morfologi, dan aktivitas katalitik TiO_2 mesopori yang disintesis menggunakan metode kopresipitasi. Meskipun TiO_2 mesopori juga memiliki potensi aplikasi pada perangkat berbasis konversi energi seperti *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC), penelitian ini difokuskan pada karakterisasi material dan kinerja katalitiknya tanpa melakukan pengukuran performa DSSC secara langsung. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman fundamental mengenai peran surfaktan dalam pembentukan struktur mesopori dan implikasinya terhadap peningkatan sifat katalitik TiO_2 .

METODE PENELITIAN

Sintesis TiO_2 mesopori dilakukan dengan metode kopresipitasi menggunakan prekursor titanium tetrachloride (TiCl_4) dan tiga jenis surfaktan kationik, CTAB, DDAB, serta MTAB sebagai templat pembentuk pori. Proses diawali dengan melarutkan TiCl_4 dalam isopropanol, kemudian menambahkan surfaktan sesuai variasi. Pengendapan dilakukan menggunakan NH_4OH hingga terbentuk endapan TiO_2 , yang selanjutnya dikeringkan dan dikalsinasi pada suhu 400–500°C untuk menghilangkan surfaktan dan memperoleh struktur mesopori.

Karakterisasi dilakukan menggunakan beberapa instrumen, antara lain Difraksi Sinar-X (XRD) untuk analisis fasa kristal, Spektroskopi Raman untuk menentukan tingkat kristalinitas, serta analisis BET dan BJH guna mengukur luas permukaan spesifik, volume, dan distribusi pori. Selain itu, uji aktivitas katalitik dilakukan melalui degradasi metilen biru (MB) di bawah iradiasi UV untuk mengevaluasi kinerja fotokatalitik material yang dihasilkan. Uji fotokatalitik dilakukan dengan konsentrasi awal MB sebesar 10 mg/L, menggunakan lampu UV-A 365 nm dengan daya 15 W, dengan jarak sampel dengan lampu adalah 10 cm. Sebanyak 20 mg katalis ditambahkan ke dalam 100 mL larutan MB, kemudian campuran diaduk dalam kondisi gelap selama 30 menit untuk mencapai kesetimbangan adsorpsi sebelum penyinaran.

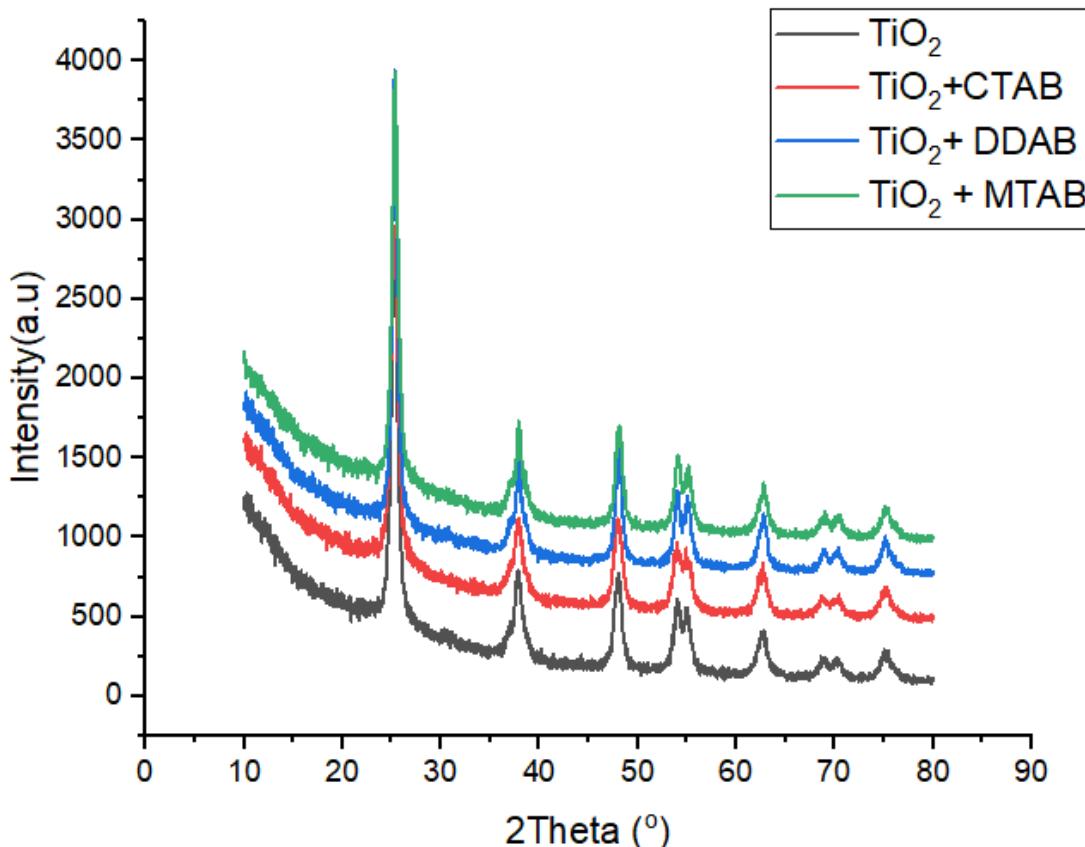
HASIL DAN PEMBAHASAN

Fase Kristal dan Kristalinitas

Analisis menunjukkan bahwa sampel TiO_2 tetap berada pada fase anatase hingga mencapai suhu kalsinasi, tanpa menunjukkan perubahan signifikan pada struktur kristalnya akibat variasi surfaktan. Gambar 1 menyajikan pola XRD dari sampel TiO_2 , TiO_2 +CTAB, TiO_2 +DDAB, dan TiO_2 +MTAB. Seluruh sampel memperlihatkan puncak difraksi pada $2\theta \approx 25,3^\circ$, $37,8^\circ$, $48,0^\circ$, $54,0^\circ$, $62,7^\circ$, $69,0^\circ$, dan $75,0^\circ$, yang sesuai dengan fase anatase TiO_2 (JCPDS No. 21-1272) [5]. Tidak ditemukan puncak rutile maupun brookite, sehingga mengonfirmasi bahwa semua sampel berada dalam fase anatase tunggal.

Penambahan surfaktan kationik meningkatkan intensitas puncak difraksi, yang menunjukkan peningkatan kristalinitas. Urutan kristalinitas yang diperoleh adalah TiO_2 +MTAB > TiO_2 +DDAB > TiO_2 +CTAB > TiO_2 . Temuan ini mengindikasikan bahwa surfaktan berperan sebagai *structure directing agents* yang mampu meningkatkan keteraturan kristal.

Kristalinitas TiO_2 dianalisis dengan memfokuskan pada puncak difraksi pada sudut $2\theta \approx 23,5^\circ$, yang merupakan puncak dengan intensitas tertinggi dan paling representatif untuk mengevaluasi perubahan derajat kristalinitas antar sampel. Puncak ini dipilih karena memiliki rasio signal-to-noise yang paling baik serta menunjukkan sensitivitas tertinggi terhadap perubahan ukuran kristalit dan tingkat keteraturan struktur kristal akibat penambahan surfaktan [6]. Puncak-puncak difraksi lainnya menunjukkan tren yang serupa namun memiliki intensitas relatif lebih rendah dan tidak menunjukkan pergeseran posisi atau perubahan signifikan yang mengindikasikan transformasi fase, sehingga tidak dianalisis secara terpisah.



Gambar 1. Pola XRD dari TiO_2 dan TiO_2 yang disintesis dengan surfaktan CTAB, DDAB, dan MTAB

Penambahan surfaktan kationik (CTAB, DDAB, MTAB) menurunkan nilai FWHM dan meningkatkan ukuran kristalit TiO_2 , yang menunjukkan peningkatan keteraturan kristal. Surfaktan dengan rantai alkil lebih panjang (DDAB dan MTAB) lebih efektif dalam mengontrol pertumbuhan kristalit dibandingkan CTAB, tanpa menyebabkan distorsi parameter kisi anatase. Kristalinitas yang lebih tinggi pada TiO_2 +MTAB disebabkan oleh parjang rantai alkilnya yang lebih besar, sehingga mendukung pertumbuhan kristal yang lebih baik. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya, yang menegaskan bahwa penambahan surfaktan dapat meningkatkan kristalinitas TiO_2 tanpa mengubah fase anatase [7].

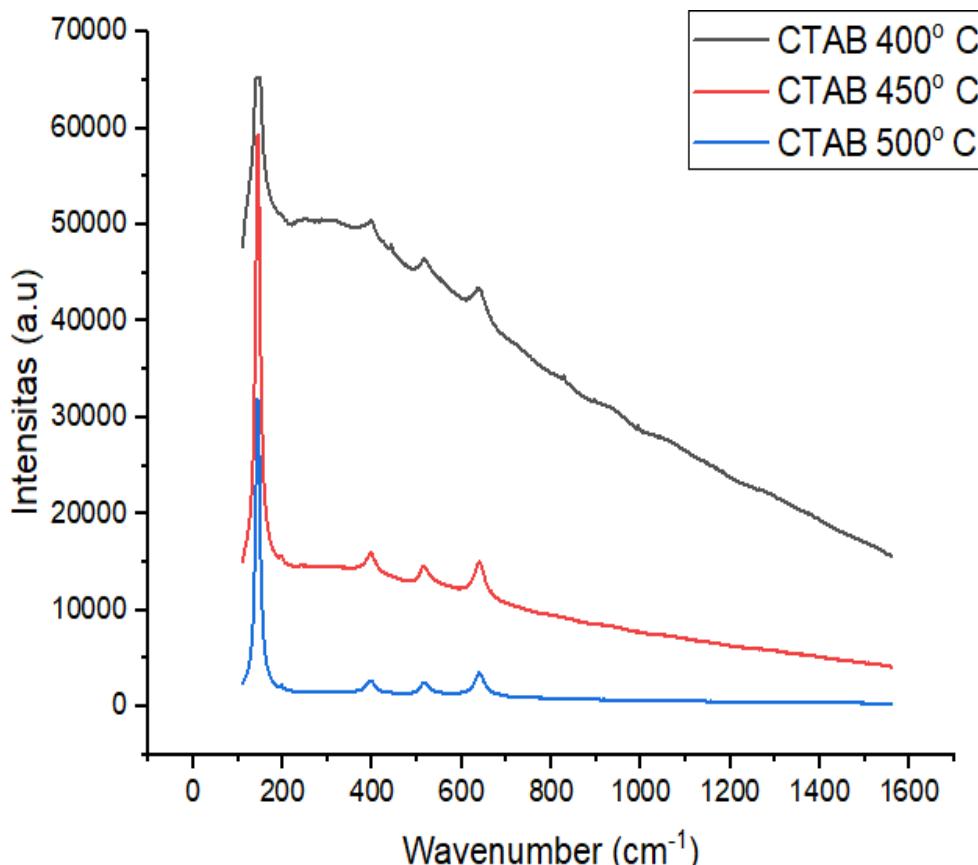
Tabel 1 Parameter kisi TiO_2

Sampel	2θ (°)	hkl	FWHM (°)	Ukuran kristalit (nm)	d (Å)	a=b (Å)	c (Å)
TiO_2	23,5	(101)	1,2867	6,82	3,78	3,79	9,52
TiO_2 + CTAB	23,5	(101)	1,0052	8,97	3,78	3,78	9,51
TiO_2 + DDAB	23,5	(101)	0,7639	12,14	3,78	3,78	9,50
TiO_2 + MTAB	23,5	(101)	0,7648	12,17	3,78	3,78	9,50

Untuk mengkaji pengaruh suhu kalsinasi terhadap kristalinitas TiO_2 mesopori yang disintesis dengan bantuan surfaktan, dilakukan karakterisasi Raman sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.

Spektrum Raman menunjukkan puncak karakteristik TiO_2 fase anatase pada sekitar 145 cm^{-1} dan 397 cm^{-1} , yang masing-masing berkaitan dengan mode getaran kisi anatase dan menandakan terbentuknya struktur kristal yang stabil. Selain puncak utama tersebut, teramati pula puncak tambahan pada kisaran 500–520 cm^{-1} serta sekitar 640 cm^{-1} , yang merupakan mode getaran khas anatase dan berkaitan dengan distorsi kisi serta getaran simetris ikatan O-Ti-O.

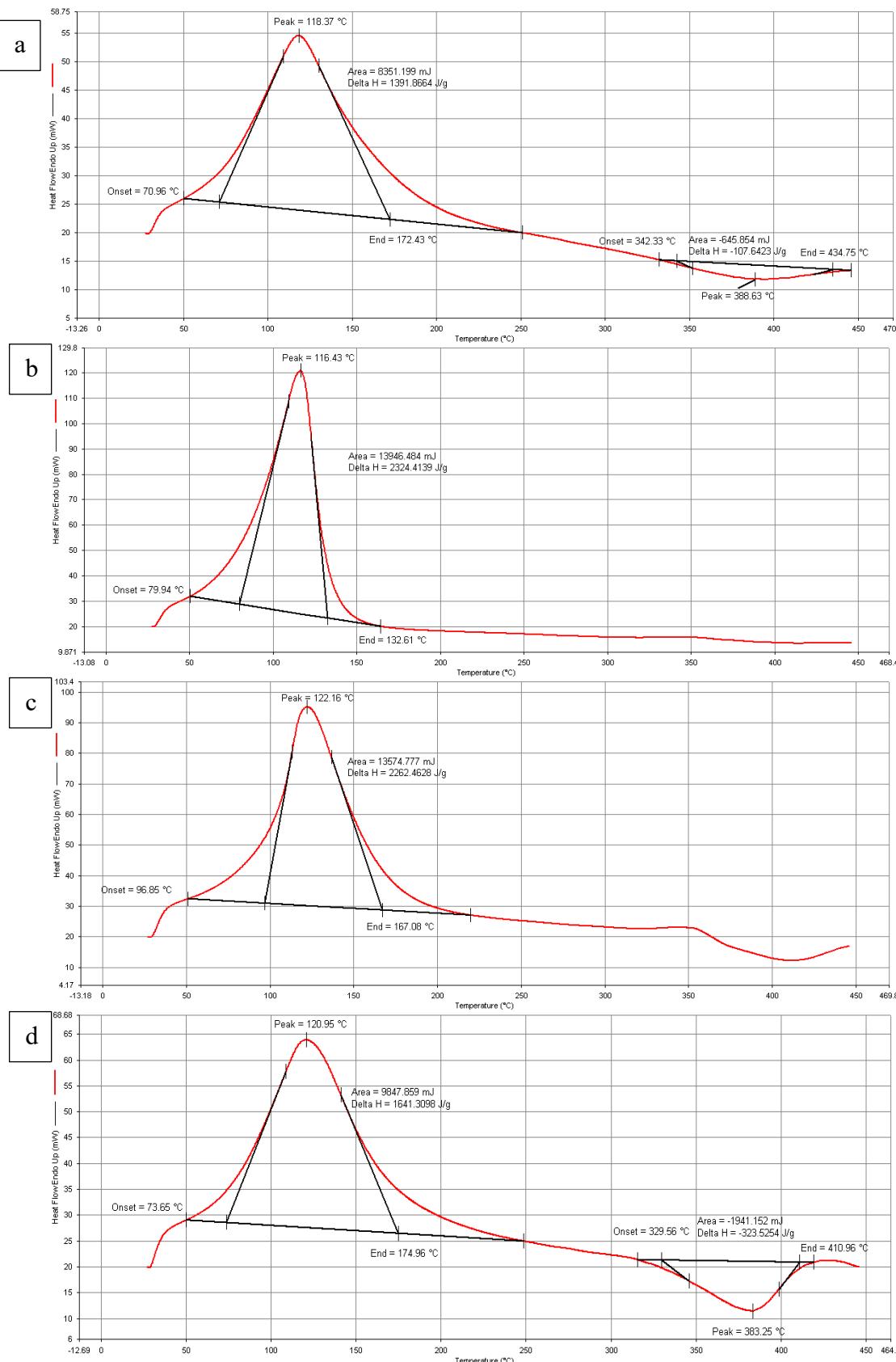
Kehadiran seluruh puncak ini mengonfirmasi bahwa fase anatase tetap dominan pada seluruh variasi suhu kalsinasi. Peningkatan intensitas dan ketajaman puncak Raman seiring kenaikan suhu kalsinasi menunjukkan peningkatan kristalinitas TiO_2 , yang dipengaruhi oleh peran surfaktan dalam mengontrol pertumbuhan kristal selama proses sintesis. [8][9]. Proses kopresipitasi yang berlangsung secara homogen pada tahap awal menghasilkan nukleasi yang seragam, sehingga mampu menstabilkan fase anatase dan menghambat transformasi langsung menuju fase rutile hingga suhu kalsinasi 500°C [10].



Gambar 2. Perbedaan spektra Raman $\text{TiO}_2 + \text{CTAB}$ menurut suhu kalsinasi ($400, 450$ dan 500°C)

Selain analisis Raman, analisis DSC dilakukan untuk mengkaji perilaku termal dan penentuan suhu kalsinasi pada material TiO_2 yang disintesis dengan penambahan surfaktan. Hasil DSC pada Gambar 3 menunjukkan satu puncak eksoterm pada masing-masing sampel, yaitu pada suhu $118,37^\circ\text{C}$ untuk TiO_2 tanpa surfaktan, $120,95^\circ\text{C}$ untuk TiO_2/MTAB , $116,43^\circ\text{C}$ untuk TiO_2/CTAB , dan $122,16^\circ\text{C}$ untuk TiO_2/DDAB . Puncak eksoterm ini dikaitkan dengan pelepasan air terikat dan proses kondensasi awal gugus hidroksil Ti-OH yang terbentuk selama tahap sintesis awal [11].

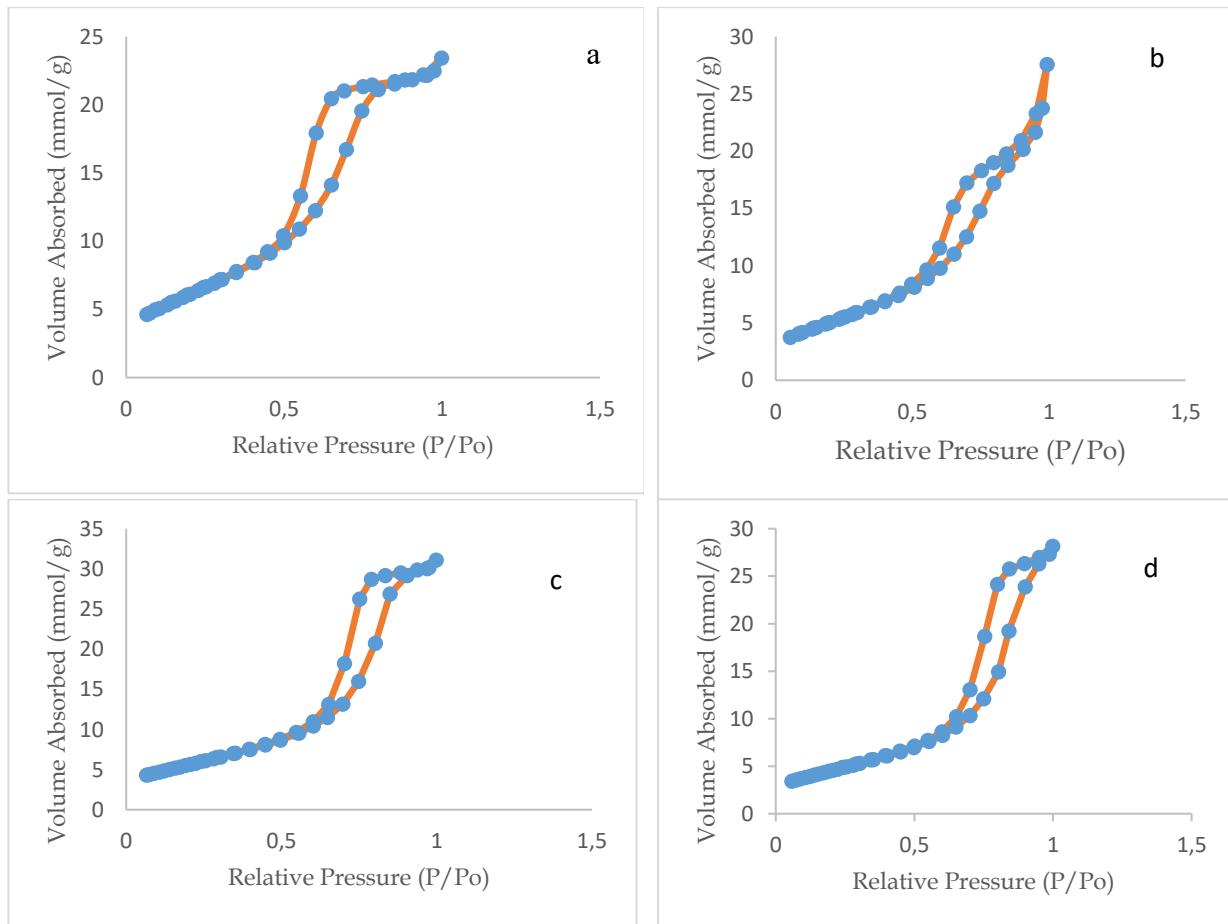
Sementara itu, puncak endoterm yang muncul pada kisaran $360-370^\circ\text{C}$, yaitu pada $366,63^\circ\text{C}$ untuk TiO_2 tanpa surfaktan dan $363,25^\circ\text{C}$ untuk TiO_2/MTAB , diatribusikan pada dekomposisi dan penghilangan surfaktan serta sisa spesies organik yang terperangkap di dalam struktur mesopori TiO_2 . Puncak endoterm ini tidak berkaitan dengan transformasi fase anatase ke rutile, karena hasil XRD dan Raman tidak menunjukkan kemunculan fase rutile hingga suhu kalsinasi 500°C [12]. Hal ini mengindikasikan bahwa proses termal pada suhu tersebut didominasi oleh penghilangan komponen organik dan relaksasi struktur pori, bukan perubahan fase kristal. Stabilitas termal yang relatif lebih tinggi pada sampel dengan penambahan MTAB menunjukkan bahwa surfaktan ini lebih efektif dalam mempertahankan struktur mesopori TiO_2 selama pemanasan, sehingga berpotensi meningkatkan kestabilan struktur pada aplikasi yang melibatkan suhu tinggi, seperti pada sistem energi terbarukan [13].



Gambar 3. Kurva DSC TiO₂ tanpa surfaktan (a) dan TiO₂ dengan penambahan surfaktan CTAB (b), DDAB (c), dan MTAB (d)

Luas Permukaan dan Volume Pori

Karakteristik tekstural TiO_2 dianalisis menggunakan isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen. Kurva adsorpsi-desorpsi yang ditampilkan pada Gambar 2 menunjukkan isoterm tipe IV menurut klasifikasi IUPAC dengan keberadaan *loop* histeresis yang jelas, yang mengonfirmasi terbentuknya struktur mesopori pada seluruh sampel. Peningkatan volume adsorpsi pada tekanan relatif menengah hingga tinggi berkaitan dengan kondensasi kapiler di dalam pori meso, yang merupakan ciri khas material mesopori.



Gambar 4 Isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen TiO_2 tanpa surfaktan (a) dan TiO_2 dengan penambahan CTAB (b), DDAB (c) dan MTAB (d)

Hasil kuantitatif analisis BET dan BJH disajikan pada Tabel 2, yang memuat parameter luas permukaan spesifik dan karakteristik pori TiO_2 murni serta TiO_2 yang dimodifikasi dengan surfaktan CTAB, DDAB, dan MTAB. Parameter yang dianalisis meliputi Multipoint BET, luas permukaan Langmuir, serta luas permukaan adsorpsi dan desorpsi BJH, yang secara kolektif menggambarkan kualitas struktur pori dan permukaan material.

Berdasarkan Tabel 2, TiO_2 -CTAB menunjukkan nilai luas permukaan BET tertinggi ($98,32 \text{ m}^2/\text{g}$), yang mengindikasikan bahwa CTAB efektif dalam meningkatkan keteraturan struktur mesopori. Sebaliknya, TiO_2 -DDAB memiliki luas permukaan BET terendah ($80,92 \text{ m}^2/\text{g}$), yang mengindikasikan bahwa DDAB kurang optimal sebagai *templating agent*. TiO_2 -MTAB menunjukkan nilai BET yang relatif tinggi disertai dengan peningkatan luas permukaan BJH, yang mencerminkan kontribusi signifikan terhadap pembentukan pori meso yang berkembang dengan baik.

Nilai luas permukaan Langmuir pada Tabel 2 menunjukkan bahwa TiO_2 -DDAB memiliki kapasitas adsorpsi monolayer tertinggi, namun nilai BJH adsorpsinya relatif rendah. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun jumlah situs aktif tinggi, distribusi pori meso pada TiO_2 -DDAB

kurang berkembang. Sebaliknya, TiO_2 -CTAB dan TiO_2 -MTAB menunjukkan keseimbangan yang lebih baik antara luas permukaan dan distribusi pori mesopori.

Tabel 2 Data Karakterisasi Tekstur TiO_2 Mesopori Berdasarkan Variasi Surfaktan

Parameter (m^2/g)	TiO_2 Murni	TiO_2 -CTAB	TiO_2 -DDAB	TiO_2 -MTAB
Multipoint BET	95,06	98,32	80,92	95,91
Luas Permukaan Langmuir	155,2	125,10	166,70	154,60
Luas Permukaan Adsorpsi BJH	85,65	91,10	81,28	91,67
Luas Permukaan Desorpsi BJH	120,9	117,8	106,20	124,20

Multipoint BET (m^2/g) mengukur luas permukaan spesifik material berdasarkan adsorpsi gas pada beberapa titik tekanan. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa TiO_2 Murni memiliki luas permukaan sebesar $95,06 \text{ m}^2/\text{g}$, TiO_2 -CTAB menunjukkan sedikit peningkatan dengan $98,32 \text{ m}^2/\text{g}$. Penggunaan surfaktan CTAB memiliki potensi meningkatkan interaksi permukaan material dengan gas adsorbat, yang berhubungan dengan peningkatan kemampuan adsorpsi dan distribusi ukuran pori [14]. Di sisi lain, TiO_2 -DDAB dan TiO_2 -MTAB memiliki nilai luas permukaan yang lebih rendah, yaitu $80,92 \text{ m}^2/\text{g}$ dan $95,91 \text{ m}^2/\text{g}$, yang dapat dipengaruhi oleh perubahan struktur permukaan akibat modifikasi dengan DDAB dan MTAB.

Luas Permukaan Langmuir merupakan parameter material berpori yang bertujuan untuk mengukur kapasitas adsorpsi monolayer pada permukaan material. Dari data Tabel 1 TiO_2 murni menunjukkan nilai tertinggi, yaitu $155,20 \text{ m}^2/\text{g}$. Ini menunjukkan bahwa TiO_2 murni memiliki banyak situs aktif untuk adsorpsi molekul, membuatnya menjadi material yang ideal untuk aplikasi seperti deodorisasi gas atau sensor katalitis [15]. Modifikasi dengan TiO_2 -CTAB serta TiO_2 -MTAB menunjukkan penurunan luas permukaan Langmuir, walaupun tetap memiliki jumlah relatif tinggi yakni $125,10 \text{ m}^2/\text{g}$ dan $154,60 \text{ m}^2/\text{g}$, yang berarti bahwa modifikasi ini tidak dapat mengurangi kapasitas adsorpsi secara signifikan, meskipun ditemukan perubahan struktural pada material. Sementara itu, TiO_2 -DDAB memiliki luas permukaan Langmuir yang lebih tinggi ($166,70 \text{ m}^2/\text{g}$), yang menunjukkan bahwa modifikasi dengan DDAB dapat meningkatkan luas permukaan monolayer pada material tersebut.

Luas Permukaan Adsorpsi BJH bertujuan untuk mengukur distribusi pori mikropori dan mesopori pada material, yang penting dalam pemahaman bagaimana kemampuan adsorpsi gas dalam berbagai rentang tekanan. TiO_2 Murni menunjukkan nilai BJH adsorpsi sebesar $85,65 \text{ m}^2/\text{g}$, sedikit lebih rendah jika dibandingkan dengan nilai TiO_2 -CTAB ($91,10 \text{ m}^2/\text{g}$) serta TiO_2 -MTAB ($91,67 \text{ m}^2/\text{g}$). Penurunan nilai adsorpsi di TiO_2 Murni ini menunjukkan bahwa meskipun material itu memiliki luas permukaan yang besar, kapasitas adsorpsi pori mesopori tidak sebaik material dengan modifikasi srfaktan. Sementara itu, TiO_2 -DDAB menunjukkan tentang nilai BJH adsorpsi yang lebih rendah hampir $81,28 \text{ m}^2/\text{g}$, menunjukkan bahwa meskipun memiliki luas permukaan Langmuir yang besar distribusi pori mikro dan mesopori nya terbatas.

Luas permukaan desorpsi BJH, yang mengukur kemampuan suatu bahan dalam dilepas gas setelah terjadi adsorpsi, lebih tinggi di TiO_2 Murni ($120,90 \text{ m}^2/\text{g}$) serta TiO_2 -MTAB ($124,20 \text{ m}^2/\text{g}$). Hasil ini mengindikasikan bahwa material dengan luas permukaan desorpsi yang lebih tinggi memiliki pori yang lebih besar atau lebih mudah melepaskan molekul adsorbatnya, yang berpotensi meningkatkan efisiensi dalam aplikasi yang membutuhkan desorpsi cepat, seperti dalam sistem penyimpanan energi atau katalisis berkelanjutan [16].

Analisis BET dan BJH menunjukkan bahwa modifikasi permukaan TiO_2 menggunakan surfaktan memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat permukaan dan kapasitas adsorpsi material. Berdasarkan data pada Tabel 3, TiO_2 -CTAB menunjukkan luas permukaan BET tertinggi, yaitu $98,32 \text{ m}^2/\text{g}$, yang mengindikasikan efektivitas CTAB dalam membentuk struktur mesopori yang lebih teratur. Kemampuan CTAB dalam membentuk micelle yang stabil berperan dalam meningkatkan area kontak antar partikel selama proses sintesis. Sesuai dengan teori *soft template synthesis*, semakin panjang rantai alkil surfaktan, semakin besar peluang terbentuknya struktur pori yang seragam dan luas permukaan yang berkembang dengan baik [17][18].

Table 3 Karakteristik Surfaktan dan Sifat Tekstural TiO_2 Mesopori

Surfaktan	Struktur Surfaktan Kationik	Luas Permukaan BET (m^2/g)	Volume Pori (cc/g)	Diameter Pori Rerata (nm)	Efek pada Morfologi	Utama
CTAB	Rantai Tunggal Panjang (C16)	98,32	0,2310	9,4	Pori seragam, area kontak maksimal.	
DDAB	Rantai Ganda (C12)	80,92	0,20	8,0	Agregasi partikel, porositas rendah.	
MTAB	Rantai Cabang/Bulky (C8x3)	95,91	0,2517	10,498	Pori besar dan volume tinggi, difusi optimal	

MTAB, dengan struktur alkil panjang, menghasilkan volume pori terbesar ($0,2517 \text{ cc/g}$) dan ukuran pori terbesar (10,498 nm). Efek ini disebabkan oleh kelabuan termal MTAB yang mudah terurai pada suhu tinggi, meninggalkan rongga besar yang dapat meningkatkan difusi ion elektrolit dalam DSSC [18][19]. Ukuran pori yang besar membantu mengurangi hambatan transport muatan dalam sel surya [20].

Sebaliknya, DDAB menghasilkan luas permukaan dan volume pori yang lebih rendah dibandingkan dengan CTAB dan MTAB. Hal ini menunjukkan bahwa DDAB kurang efektif sebagai template dalam sintesis mesopori TiO_2 , yang mungkin disebabkan oleh ikatan surfaktan DDAB dengan TiCl_4 yang tidak homogen selama presipitasi [21]. Fenomena ini serupa dengan temuan dari Buapuean et al. (2020) bahwa ketidakstabilan surfaktan dapat mengurangi efisiensi pembentukan pori yang terdistribusi merata [22]. Secara keseluruhan, hasil BET dan BJH ini memperlihatkan bahwa modifikasi permukaan TiO_2 menggunakan surfaktan CTAB dan MTAB dapat meningkatkan sifat adsorpsi dan distribusi pori material, yang penting untuk aplikasi seperti DSSC.

Analisis Korelasi Struktur dan Aktivitas Katalitik

Tabel 4 memuat parameter utama hasil karakterisasi yang meliputi luas permukaan BET, volume pori, diameter pori rata-rata, serta laju degradasi metilen biru yang dihasilkan oleh masing-masing sampel TiO_2 . Penyusunan data ini dimaksudkan untuk memberikan dasar komparatif yang lebih komprehensif dalam mengevaluasi peran surfaktan sebagai templating agent terhadap pembentukan struktur mesopori TiO_2 dan pengaruhnya terhadap aktivitas fotokatalitik. Melalui penyajian data ini, perbedaan sifat fisik dan kinerja fotokatalitik antar sampel dapat diamati secara lebih jelas, sehingga memungkinkan analisis yang lebih mendalam mengenai hubungan antara rekayasa struktur pori dan peningkatan efektivitas fotokatalitik.

Hasil komparasi pada Tabel 4 menunjukkan bahwa penambahan surfaktan selama sintesis secara konsisten meningkatkan karakteristik mesopori dan aktivitas fotokatalitik TiO_2 dibandingkan dengan sampel tanpa surfaktan. TiO_2 murni hanya menunjukkan efisiensi

degradasi sebesar 45% dan laju reaksi $0,010 \text{ min}^{-1}$, yang dijadikan sebagai acuan dasar untuk membandingkan performa sampel lainnya.

Table 4 Data Komparatif Karakteristik Mesopori dan Aktivitas Fotokatalitik TiO_2

Material	Luas Permukaan (m^2/g)	Volume Pori	Diameter Pori Rata-rata	Laju Degradasi MB (k) (min^{-1})	Efisiensi Degradasi (60 menit)
TiO_2	-	-	-	$0,010$	45%
TiO_2 -CTAB	98,32	0,2310	9,400	$0,027$	82%
TiO_2 -DDAB	80,92	0,2000	8,000	$0,015$	60%
TiO_2 -MTAB	95,91	0,2517	10,498	$0,032$	86%

Analisis data menunjukkan bahwa penambahan surfaktan berpengaruh signifikan terhadap kemampuan TiO_2 dalam mendegradasi metilen biru, yang dapat direpresentasikan sebagai indikator interaksi material terhadap molekul organik, serupa dengan proses adsorpsi dan injeksi elektron dye pada aplikasi DSSC. TiO_2 tanpa surfaktan memiliki laju degradasi paling rendah ($0,010 \text{ min}^{-1}$), yang mencerminkan struktur pori yang kurang mendukung penyerapan dye maupun transport elektron. Sebaliknya, keberadaan surfaktan menghasilkan peningkatan laju degradasi dengan urutan MTAB > CTAB > DDAB, yang menunjukkan bahwa modifikasi struktur pori yang dilakukan surfaktan sangat menentukan performa fotofisika TiO_2 .

TiO_2 -MTAB mencapai laju degradasi tertinggi ($0,032 \text{ min}^{-1}$), mengindikasikan bahwa struktur pori yang lebih besar dan volume pori yang lebih tinggi memfasilitasi difusi molekul dan meningkatkan jumlah dye yang dapat teradsorpsi. Hal ini penting bagi DSSC, karena pori yang lebih terbuka memungkinkan penyerapan dye lebih banyak dan mendukung transport ion elektrolit yang lebih efisien, yang pada akhirnya meningkatkan injeksi elektron dan mengurangi resistansi internal [23]. TiO_2 -CTAB juga menunjukkan peningkatan signifikan ($0,027 \text{ min}^{-1}$), konsisten dengan penelitian terdahulu yang melaporkan bahwa CTAB mampu membentuk mesopori teratur yang mendukung performa fotoanoda. Sebaliknya, TiO_2 -DDAB menghasilkan laju yang lebih rendah ($0,015 \text{ min}^{-1}$), menandakan bahwa pori yang lebih kecil membatasi penetrasi dye dan menghambat difusi elektrolit, sebagaimana juga dilaporkan oleh González-Verjan et al. (2020) [18].

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa pemilihan surfaktan sangat mempengaruhi karakteristik mesopori TiO_2 dan berdampak langsung pada mekanisme kerja DSSC. Temuan bahwa MTAB memberikan kinerja paling tinggi merupakan kontribusi penting, karena mengindikasikan bahwa struktur rantai alkil surfaktan dapat menjadi faktor kunci dalam menghasilkan fotoanoda dengan kapasitas adsorpsi dye dan transport ion yang lebih unggul.

KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa jenis surfaktan berpengaruh signifikan terhadap struktur mesopori dan kinerja fotokatalitik TiO_2 . CTAB mampu meningkatkan luas permukaan hingga $98,32 \text{ m}^2/\text{g}$, sedangkan MTAB menghasilkan volume pori terbesar ($0,2517 \text{ cc/g}$) serta ukuran pori tertinggi (10,498 nm). Sebaliknya, DDAB menunjukkan efektivitas rendah dengan luas permukaan $80,92 \text{ m}^2/\text{g}$ dan volume pori $0,2000 \text{ cc/g}$.

Variasi struktur ini berdampak langsung pada laju degradasi. TiO_2 -MTAB menunjukkan kinerja terbaik dengan laju degradasi $0,032 \text{ min}^{-1}$, diikuti TiO_2 -CTAB $0,027 \text{ min}^{-1}$, sementara TiO_2 -DDAB hanya mencapai $0,015 \text{ min}^{-1}$. Data ini menegaskan bahwa peningkatan ukuran dan volume pori berkontribusi pada difusi yang lebih baik serta meningkatnya jumlah situs aktif.

Dalam konteks aplikasi DSSC, karakteristik pori TiO_2 -MTAB yang lebih terbuka dan berukuran besar mampu mendukung penyerapan dye serta difusi elektrolit yang lebih efisien, sehingga berpotensi meningkatkan performa fotoanoda. Secara keseluruhan, MTAB merupakan

surfaktan yang paling efektif untuk menghasilkan TiO_2 mesopori dengan kinerja unggul pada aplikasi energi terbarukan, khususnya DSSC.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada institusi dan laboratorium yang telah menyediakan fasilitas serta dukungan selama pelaksanaan penelitian ini. Penghargaan juga diberikan kepada rekan-rekan sejawat yang turut membantu dalam proses eksperimen dan analisis data. Kontribusi dari berbagai pihak sangat berarti sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. B. Anucha, I. Altin, E. Bacaksiz, and V. N. Stathopoulos, "Titanium dioxide (TiO_2)-based photocatalyst materials activity enhancement for contaminants of emerging concern (CECs) degradation: In the light of modification strategies," *Chemical Engineering Journal Advances*, vol. 10, May 2022, doi: 10.1016/j.cejadv.2022.100262.
- [2] S. Wahyuni, T. Afandi, R. Januarti, and D. Rizka Fadhillah, "JURNAL REKAYASA, TEKNOLOGI PROSES DAN SAINS KIMIA Proses Penghilangan Surfaktan dengan Metode Ekstraksi Pelarut Pada Sintesis Silika Mesopori MCM-41," Online.
- [3] T. Purbaningtias, P. Kurniawati, B. Wiyantoko, D. Prasetyoko, and Suprapto, "Pengaruh Penambahan Surfaktan pada Modifikasi Material Alam," *Akta Kimia Indonesia*, vol. 4, no. 2, pp. 118–2, Sep. 2019, doi: 10.12962/j25493736.v4i2.5134.
- [4] B. Tunggal Dipowardani, Sriatun, and Taslimah, "Sintesis Silika Kristalin Menggunakan Surfaktan Cetiltrimetilamonium Bromida (CTAB) dan Trimetilamonium Klorida (TMACl) sebagai Pencetak Pori," *Jurnal Kimia Sains & Aplikasi*, no. 11, pp. 20–28, 2008.
- [5] S. C. Pillai *et al.*, "Synthesis of high-temperature stable anatase TiO_2 photocatalyst," *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 111, no. 4, pp. 1605–1611, Feb. 2007, doi: 10.1021/jp065933h.
- [6] L. He, D. R. T. Zahn, and T. I. Madeira, "Photocatalytic Performance of Sol-Gel Prepared TiO_2 Thin Films Annealed at Various Temperatures," *Materials*, vol. 16, no. 15, Aug. 2023, doi: 10.3390/ma16155494.
- [7] S. Kachbouri, Y. Moussaoui, and E. Elaloui, "The Effect of Surfactant Chain Length and Type on the Photocatalytic Activity of Mesoporous TiO_2 Nanoparticles Obtained via Modified Sol-Gel Process." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/324273696>
- [8] Y. Wang *et al.*, "Hierarchical Porous Activated Carbon Derived from Coconut Shell for Ultrahigh-Performance Supercapacitors," *Molecules*, vol. 28, no. 20, Oct. 2023, doi: 10.3390/molecules28207187.
- [9] W. Y. Ko, T. C. Wu, S. Y. He, and K. J. Lin, "Phosphorus-doped TiO_2 mesoporous nanocrystals for anodes in high-current-rate lithium ion batteries," *Nanotechnology*, vol. 35, no. 17, Apr. 2024, doi: 10.1088/1361-6528/ad22aa.
- [10] J. Liang *et al.*, "Enhanced photocatalytic performance of Nd^{3+} -doped TiO_2 nanosphere under visible light," *Chem Phys*, vol. 528, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.chemphys.2019.110538.
- [11] J. L. Barbosa, G. B. Perin, and M. I. Felisberti, "Plasticization of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) with an Oligomeric Polyester: Miscibility and Effect of the Microstructure and Plasticizer Distribution on Thermal and Mechanical Properties," *ACS Omega*, vol. 6, no. 4, pp. 3278–3290, Feb. 2021, doi: 10.1021/acsomega.0c05765.
- [12] N. Perkas *et al.*, "A mesoporous iron-titanium oxide composite prepared sonochemically," *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 107, no. 34, pp. 8772–8778, Aug. 2003, doi: 10.1021/jp022447v.

- [13] M. I. A. Abdel Maksoud *et al.*, "MoS₂-based nanocomposites: synthesis, structure, and applications in water remediation and energy storage: a review," Oct. 01, 2021, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s10311-021-01268-x.
- [14] E. Bayatloo and E. Saievar-Iranizad, "Performance enhancement of TiO₂-based dye-sensitized solar cells by carbon nanospheres in photoanode," Mar. 2015, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1311.0415>
- [15] N. Nasikhudin, N. A. Astarini, M. F. Rahman, M. Diantoro, A. Aripriharta, and Z. Osman, "Photovoltaic Performance of TiO₂ Mesoporous Films With Different Working Areas for Dye-Sensitized Solar Cells," *J Phys Conf Ser*, vol. 2243, no. 1, p. 012118, 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2243/1/012118.
- [16] A. Fisli *et al.*, "The effect of the number of hydrophobic tails of cationic ammonium surfactants on mesoporous TiO₂ synthesized," *Mater Res Express*, vol. 10, no. 8, Aug. 2023, doi: 10.1088/2053-1591/acec33.
- [17] H. Zhou, M. Aftabuzzaman, N. Masud, S. H. Kang, and H. K. Kim, "Key Materials and Fabrication Strategies for High-Performance Dye-Sensitized Solar Cells: Comprehensive Comparison and Perspective," Feb. 14, 2025, *American Chemical Society*. doi: 10.1021/acsenergylett.4c03579.
- [18] V. A. González-Verjan *et al.*, "Effect of TiO₂ particle and pore size on DSSC efficiency," *Mater Renew Sustain Energy*, vol. 9, no. 2, Jul. 2020, doi: 10.1007/s40243-020-00173-7.
- [19] H. L. Hsu, C. F. Tien, and J. Leu, "Effect of pore size/distribution in TiO₂ films on agarose gel electrolyte-based dye-sensitized solar cells," *Journal of Solid State Electrochemistry*, vol. 18, no. 6, pp. 1665–1671, 2014, doi: 10.1007/s10008-014-2401-7.
- [20] P. Gnida *et al.*, "Impact of TiO₂ nanostructures on dye-sensitized solar cells performance," *Materials*, vol. 14, no. 7, Apr. 2021, doi: 10.3390/ma14071633.
- [21] R. Thahir, "Direct synthesis of mesoporous TiO₂ using PVA as surfactant template and assessment of their photocatalytic activity."
- [22] T. Buapuean and S. Jarudilokkul, "Synthesis of mesoporous TiO₂ with colloidal gas aphrons, colloidal liquid aphrons, and colloidal emulsion aphrons for dye-sensitized solar cells," *Mater Today Chem*, vol. 16, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.mtchem.2019.100235.
- [23] Q. Y. Lin *et al.*, "Modulation of Hierarchical Pores in Metal-Organic Frameworks for Improved Dye Adsorption and Electrocatalytic Performance," *Inorg Chem*, vol. 61, no. 15, pp. 5800–5812, Apr. 2022, doi: 10.1021/acs.inorgchem.1c03937.