

DISERTASI

**APLIKASI FOTOKATALIS NANO KOMPOSIT TiO_2 PADA
PROSES HIDROGENASI CO_2 MENJADI METANOL
MENGUNAKAN *LOW COST PHOTOREACTOR***

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Doktor Bidang Kajian Utama Teknik Kimia



**LETY TRISNALIANI
NIM. 03013681924013**

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2024**

HALAMAN PENGESAHAN

APLIKASI FOTOKATALIS NANO KOMPOSIT TiO_2 PADA PROSES HIDROGENASI CO_2 MENJADI METANOL MENGGUNAKAN *LOW COST PHOTOREACTOR*

DISERTASI

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Doktor
Bidang Kajian Utama Teknik Kimia

Oleh :

LETY TRISNALIANI
03013681924013

Promotor

Palembang, Juli 2024
Ko-Promotor



Prof. Dr. Ir. M. Djoni Bustan, M.Eng, IPU
NIP. 195603071981031010



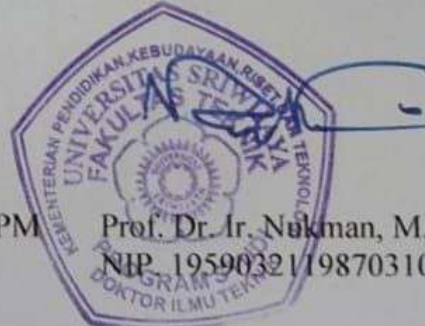
Prof. Dr. Ir. Sri Haryati, DEA, IPU
NIP. 195610241981032001

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik

Koordinator Program Studi
Doktor Ilmu Teknik



Dr. Ir. Bhakti Yudho Supranto, S.T., M.T., IPM
NIP. 197502112003121002



Prof. Dr. Ir. Nukman, M.T.
NIP. 195903211987031001

HALAMAN PERSETUJUAN

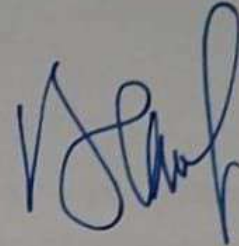
Karya tulis ilmiah berupa disertasi ini dengan judul “Aplikasi Fotokatalis Nano Komposit TiO_2 pada Proses Hidrogenasi CO_2 menjadi Metanol Menggunakan *Low Cost Photo-Reactor*” telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji karya tulis ilmiah Program Doktor Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada tanggal 19 Juli 2024.

Palembang, 19 Juli 2024

Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah berupa Disertasi

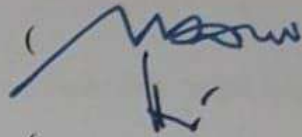
Ketua :

1. Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T., IPM
NIP. 197502112003121002

()

Anggota :

2. Prof. Dr. Ir. Muhammad Said, M.Sc.
NIP. 196108121987031003

()

3. Prof. Dr. Yohandri Bow, S.T., M.S.
NIP. 197110231994031002

()

4. Dr. Ir. David Bahrin, S.T., M.T.
NIP. 198010312005011003


()

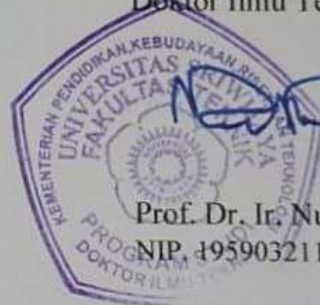
Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik


Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T., IPM.
NIP. 197502112003121002



Koordinator Program Studi
Doktor Ilmu Teknik


Prof. Dr. Ir. Nukman, M.T.
NIP. 195903211987031001



HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Lety Trisnaliani

NIM : 03013681924013

Judul : Aplikasi Fotokatalis Nano Komposit TiO₂ pada Proses
Hidrogenasi CO₂ menjadi Metanol Menggunakan Low Cost
Photo-Reactor

Menyatakan bahwa Disertasi saya merupakan hasil karya sendiri didampingi Promotor dan Ko-Promotor dan bukan hasil penjiplakan / plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan / plagiat dalam Disertasi ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai aturan yang berlaku.

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari siapapun.



Palembang, 5 Juli 2024



(Lety Trisnaliani)

RINGKASAN

APLIKASI FOTOKATALIS NANO KOMPOSIT TiO_2 PADA PROSES HIDROGENASI CO_2 MENJADI METANOL MENGGUNAKAN LOW COST PHOTO-REACTOR

Karya Tulis Ilmiah berupa Disertasi, Juli 2024

Lety Trisnaliani, dibimbing oleh Muhammad Djoni Bustan dan Sri Haryati
Program Studi Doktor Ilmu Teknik Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya
xv+ 170 Halaman, 53 Gambar, 9 Tabel, 2 Lampiran

Dalam penelitian ini, fotokatalis $\text{TiO}_2/\text{ZnO}/\text{Cu}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ dikembangkan untuk menyelidiki reduksi (hidrogenasi) CO_2 menjadi methanol dalam *Low Cost Photoreactor*. Semua katalis pada penelitian ini berhasil disintesis dengan metode microwave dan kopresipitasi. Hasil XRD menunjukkan serapan fotokatalis di daerah sinar tampak menjadikan fotokatalis ini merupakan kandidat yang valid untuk aplikasi fotokatalitik. Aktivitas katalis TiO_2 ditingkatkan dengan penambahan material heterojungsi ZnO/Cu dan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ dan aktivitas terbaik pada energi *band gap* yang paling kecil yaitu $\text{TiO}_2/\text{ZnO}/\text{Cu}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ ($T=140^\circ\text{C}$) sekitar 2,8 eV. Variabel yang digunakan dalam penelitian intensitas cahaya, jumlah katalis, dan laju alir gas H_2 . Intensitas cahaya UVA + UVC yang berbeda pada 60, 100 dan 110 Watt dan variasi berat katalis adalah 0,1, 0,2 dan 0,3 g katalis. Dari hasil analisa UV-VIS untuk kondisi reaksi yield metanol maksimum pada intensitas cahaya 60 W dan 0,3 g katalis dengan konsentrasi 26% metanol. Hal ini menunjukkan fotokatalis $\text{TiO}_2/\text{ZnO}/\text{Cu}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ merupakan kandidat yang potensial yang dapat beroperasi dibawah iradiasi sinar tampak untuk mengkonversi gas CO_2 menjadi metanol.

Kata Kunci : Fotokatalis, Nanokomposit, Hidrogenasi CO_2 , Metanol, Heterojungsi
Kepustakaan : 298 (1972 – 2024)

DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul	i
Halaman Pengesahan	ii
Halaman Persetujuan	iii
Halaman Pernyataan	iv
Kata Pengantar	v
Ringkasan	vii
Summary	viii
Daftar Isi	ix
Daftar Gambar	xii
Daftar Tabel	xiv
Daftar Lampiran	xv
BAB I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	8
1.3. Tujuan Penelitian	9
1.4. Manfaat Penelitian	10
1.5. Batasan Penelitian	10
1.6. Hipotesis	10
1.7. Sistematika Penulisan	11
1.8. Kebaruan Penelitian	12
1.9. Penelitian Terdahulu dan Terkait	12
1.9.1. Referensi Penelitian Fotoreaktor dengan Fotokatalis TiO ₂ dan Produk Metanol (CH ₃ OH)	12
1.9.2. Referensi Penelitian berbasis Material Fotokatalis TiO ₂ untuk Mereduksi CO ₂ menjadi Metanol	17
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Sejarah Fotokatalisis	24

2.2. Efektivitas Semikonduktor sebagai Material Fotokatalis	27
2.3. Titanium Oksida	29
2.4. Modifikasi Titanium Oksida.....	31
2.4.1. Doping	31
2.4.2. Penambahan Sensitizer	33
2.4.3. Pendepositan Logam.....	34
2.5. Zink Oksida	34
2.6. Nanopartikel Magnetik (Fe_3O_4).....	35
2.7. Reduksi Gas CO_2	37
2.7.1. Karbondioksida (CO_2)	37
2.7.2. Reduksi Gas CO_2 melalui Proses Fotokatalisis	39
2.8. Mekanisme Reduksi Gas CO_2 secara Fotokatalisis	43
2.9. Metode Sonokimia.....	48
2.10. Gelombang Mikro (<i>Microwave</i>).....	46
2.11. Desain Sistem Fotoreaktor.....	51

BAB III. KONSEP DESAIN PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	59
3.2. Alat dan Bahan Penelitian	59
3.2.1. Desain Low Cost Photoreactor LCP-21	59
3.2.2. Alat dan Bahan untuk Preparasi dan Sintesis Fotokatalis	60
3.3. Variabel Penelitian Fotokatalis $TiO_2/ZnO/Cu/Fe_3O_4/SiO_2$	60
3.3.1 Variabel Bebas.....	60
3.3.2. Variabel Kendali.....	61
3.3.3. Variabel Terikat.....	61
3.4. Metode Penelitian	61
3.4.1. Tahap Penelitian	61
3.4.2 Penelitian Tahap 1 Desain <i>Low Cost Photoreactor LCP-21</i>	61
3.4.3. Penelitian Tahap 2 untuk Sintesis dan Karakterisasi Fe_3O_4	69
3.4.4. Penelitian Tahap 3 Sintesis dan Karakterisasi Fe_3O_4/SiO_2	69
3.4.5. Penelitian Tahap 4 Sintesis dan Karakterisasi $TiO_2/ZnO/Cu/Fe_3O_4/SiO_2$..	70
3.4.6. Penelitian Tahap 5 Uji Aktivitas dengan LCP-21 menggunakan gas	

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Eksploitasi penggunaan bahan bakar fosil yang berlebihan seiring berkembangnya pertumbuhan ekonomi dunia yang cepat dan pertambahan populasi yang padat dapat mengganggu kestabilan batas bumi (Steffen *et al.*, 2015) karena sifatnya tidak dapat diperbarui (Hossain *et al.*, 2023). Pemanfaatan sumber energi berbasis karbon telah menambah konsentrasi CO₂ di atmosfer yang dapat menyebabkan perubahan iklim (Kabir *et al.*, 2023). Gas rumah kaca seperti CO₂, CH₄, dan CFC adalah penyebab utama pemanasan global. Atmosfer konsentrasi CO₂ terjadi peningkatan karena aktivitas manusia, semakin mempercepat efek rumah kaca (Nunes, 2023). Sebagai tanggapan, Protokol Kyoto dari konvensi kerangka kerja Perserikatan Bangsa – Bangsa tentang perubahan mengamanatkan pengembalian tingkat emisi CO₂ ke tingkat tahun 1990 (Wu and Lin, 2005). Oleh karena itu, krisis energi dan pemanasan global merupakan tantangan utama di abad ini (Dresselhaus and Thomas, 2001). Untuk mengatasi masalah CO₂ secara permanen membutuhkan pengubahan CO₂ menjadi senyawa lain yang berguna atau tidak beracun (Kumaravel, Bartlett and Pillai, 2020). Meningkatkan CO₂ menjadi sumber daya hidrokarbon yang dapat digunakan kembali sehingga bermanfaat bagi manusia dan lingkungan.

Tenaga matahari merupakan sumber energi yang tidak terbatas dan dapat dimanfaatkan untuk mengubah CO₂ menjadi bahan kimia dan bahan bakar seperti metana dan metanol (Lewis and Nocera, 2006). Namun ada banyak tantangan terkait mengenai fotokonversi CO₂. Pada satu sisi, CO₂ merupakan molekul linier dengan ikatan rangkap karbon dan oksigen memiliki energi disosiasi tinggi 750 kJ/mol. Hal ini menunjukkan kebutuhan input energi yang cukup tinggi untuk mentransformasi CO₂ (Kumar *et al.*, 2013). Pada sisi lain, evolusi reaksi hidrogen bersaing dengan reduksi CO₂ dengan keberadaan air sehingga mengurangi selektivitas produk yang mengandung karbon. Elektroreduksi pada CO₂ dengan foto katoda GaP tipe-p dan diamati menghasilkan HCOOH, HCHO, dan CH₃OH

dalam elektrolitnya (Halmann, 1978). Tahun berikutnya (Inoue *et al.*, 1979) pertamakali melaporkan fotoreduksi CO₂ dalam larutan suspensi fotokatalis misalnya WO₃, TiO₂, ZnO, CdS, GaP dan SiC dapat menghasilkan HCOOH, HCHO dan CH₃OH. Sejak saat itu, fotoreduksi CO₂ menjadi bahan bakar dengan menggunakan energi matahari banyak menarik perhatian dunia.

Metanol adalah sumber energi terbarukan yang dapat diproduksi dari bahan mentah yang mengandung karbon terutama CO₂ dan sebagai sumber energi yang bersih maka dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar transportasi. Untuk memenuhi permintaan pasar, bahan bakar harus diproduksi secara berkelanjutan, bersih dan dapat disintesis dari sumber daya alam yang terbarukan. Saat ini sebagian besar industri di seluruh dunia telah menggunakan metanol sebagai bahan baku untuk memproduksi berbagai barang. Metanol digunakan dalam memproduksi pelarut seperti asam asetat, yang mewakili 10% permintaan global dan dianggap sebagai salah satu organik terpenting sebagai bahan baku yang dapat digunakan dalam industri dengan produksi tahunan 65 juta ton di seluruh dunia (Marc Alvarado, 2016). Metanol juga dapat digunakan dalam sel bahan bakar metanol langsung (*DMFC*) yang digunakan untuk konversi energi kimia dalam metanol langsung menjadi tenaga listrik di bawah kondisi sekitar (Kimberly, GK and GA, 2004). Ada beberapa jalur yang dapat mengkonversi CO₂ menjadi metanol antara lain dengan cara konvensional, elektrokatalitik, fotokatalitik dan fotoelektrokatalitik (Kondratenko *et al.*, 2013).

Metode konversi CO₂ fotokimia atau fotokatalis digunakan untuk mengkonversi CO₂ menjadi metanol dan produk bernilai lainnya dengan menggunakan energi matahari seperti cahaya atau laser (Fan, Zhang and Wang, 2013). Meski selektivitas metanol relatif rendah, konversi CO₂ dengan teknologi fotokatalis telah banyak dipelajari (Doherty *et al.*, 2010). Proses konversi fotokatalis CO₂ menjadi metanol adalah kombinasi yang kompleks antara proses fotofisika dan fotokimia secara bersama-sama. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menguji kemampuan beberapa semikonduktor dan oksida logam untuk mengkonversi CO₂ menjadi metanol. Antara lain silikon karbida (Gondal *et al.*, 2013), TiO₂ (Xiong *et al.*, 2012) (N. Luo *et al.*, 2009), WO₃ (Chen *et al.*, 2012), NiO dan ZnO (Yahaya, Gondal and Hameed, 2004), InTaO₄ (Tsai *et al.*, 2011) baik

itu secara sendiri maupun digabung dengan katalis yang berbeda (*heterogen*) untuk mencapai tujuan yang sama. Tantangan utama dalam memproduksi metanol pada semikonduktor adalah dengan menggunakan energi matahari dengan reaksi pembentukan yang reversibel. Silicon karbida granular adalah fotokatalis yang menjanjikan untuk reduksi CO₂ menjadi metanol (Gondal *et al.*, 2013). Silikon karbida granular telah diuji sebagai suatu fotokatalis yang dapat mereduksi CO₂ dan menjadi metanol dengan panjang gelombang 355 nm. Sel reaksi diisi dengan butiran α 6H-SiC dan diberi tekanan gas CO₂ sebesar 50 psi dan akuadest. Fotokatalis nanotube CdS/TiO₂ dan Bi₂S₃ dapat meningkatkan aktivitas fotokatalitik dalam mereduksi CO₂ menjadi metanol di bawah iradiasi cahaya tampak (Li *et al.*, 2012). Nd/TiO₂ yang disintesis dengan metode sol-gel, dapat mereduksi CO₂ menjadi metanol dalam larutan air di bawah sinar UV (D. Luo *et al.*, 2009). Penelitian menunjukkan bahwa hasil metanol maksimum di bawah iradiasi UV selama 8 jam adalah 184,8 μ mol/g, membuktikan bahwa Nd/TiO₂ dapat meningkatkan efisiensi reduksi CO₂ bila dibandingkan dengan TiO₂ murni.

Penelitian fotokatalisis pada permukaan TiO₂ mulai berkembang pesat sejak publikasi mengenai fotoelektrokatalisis pemecahan air pada elektroda lapisan tipis TiO₂ (Fujishima and Honda, 1972). Berbagai usaha dilakukan untuk mendapatkan fotokatalis berefisiensi tinggi, antara lain sintesis nanokristal TiO₂, penyisipan dopan, dan penambahan sensitizer. Dari sisi aplikasi telah dirancang berbagai bentuk reaktor fotokatalisis untuk degradasi zat organik dalam fase cair maupun gas. Beberapa faktor yang mempengaruhi aktivitas fotokatalis TiO₂, salah satu yang terpenting adalah bentuk kristalnya. TiO₂ memiliki tiga macam bentuk kristal yaitu anatase, rutil dan brukit, namun yang memiliki aktivitas fotokatalis terbaik adalah anatase. Bentuk kristal anatase diamati terjadi pada pemanasan TiO₂ bubuk mulai dari suhu 120°C dan mencapai sempurna pada 500°C. Pada suhu 700°C mulai terbentuk kristal rutil (Hussain., 1993) dan terjadi penurunan luas permukaan serta pelemahan aktivitas fotokatalis secara drastis.

Pada proses fotokatalisis kristal rutil maupun anatase dapat digunakan namun dalam aplikasinya anatase memiliki potensi yang paling besar untuk digunakan sebagai fotokatalis (Tanaka, Capule and Hisanaga, 1991) karena memiliki struktur kisi yang sesuai dengan aktivitas fotokatalis yang tinggi. Struktur rutil lebih stabil

pada suhu tinggi dan anatase pada suhu rendah. Struktur rutil dan anatase dapat digambarkan dengan TiO_6 oktahedra, di mana setiap ion Ti^{4+} dikelilingi oleh enam ion O_2^- . Sementara anatase, distorsi jauh lebih besar, sehingga strukturnya kurang simetris dibandingkan orthorhombik. Sebagai fotokatalis yaitu bahan yang berfungsi mempercepat reaksi yang diinduksi oleh cahaya, TiO_2 mempunyai struktur semikonduktor yang memiliki struktur elektronik yang dikarakterisasi oleh adanya pita valensi terisi dan pita konduksi yang kosong. Kedua pita tersebut dipisahkan oleh celah terlarang (*band gap energy*) sebesar 3,2 eV untuk anatase dan 3,0 eV untuk fasa rutil. TiO_2 dalam fasa anatase mempunyai aktivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan fasa rutil, fasa anatase TiO_2 memiliki luas permukaan yang lebih besar dan ukuran yang lebih kecil dibanding rutil (Matthews and McEvoy, 1992).

Material titanium oksida (TiO_2) adalah fotokatalis yang paling banyak dikembangkan karena memiliki aktivitas fotokatalisis lebih tinggi (aktif pada panjang gelombang $300 \text{ nm} < \lambda < 390 \text{ nm}$), struktur yang stabil secara kimia dan fisika, memiliki kelimpahan besar di kerak bumi, serta bersifat ramah lingkungan (Huang *et al.*, 2008). Akan tetapi, aktifitas fotokatalis titanium oksida seringkali tidak maksimal karena adanya reaksi rekombinasi antara elektron dan *hole*. Rekombinasi *electron* dan *hole* menyebabkan berkurangnya spesies aktif di permukaan fotokatalis untuk proses oksidasi dan reduksi material (Low, Cheng and Yu, 2017). Oleh karena itu, diperlukan modifikasi untuk meningkatkan aktivitas titanium oksida. Beberapa penelitian pernah dilakukan untuk meningkatkan aktivitas fotokatalis titanium oksida, antara lain dengan penambahan dopant (Yuzheng Wang *et al.*, 2016), penambahan spesies sensitizer atau pendeositasi logam pada permukaan fotokatalis titanium oksida (Liu *et al.*, 2015), penggunaan material pendukung zeolite (Gole *et al.*, 2015), penggunaan material heterojunction antara titanium oksida dengan zinc oksida (Tao *et al.*, 2016), serta pelapisan titanium oksida dengan gugus karboksilat, amina dan amida (Calatayud *et al.*, 2015). Penggunaan material pendukung (*supporting material*) diperlukan untuk mempermudah perlakuan pemisahan material fotokatalis titanium oksida setelah reaksi dan meningkatkan luas permukaan material fotokatalis titanium oksida (MiarAlipour *et.al*, 2018). Fokus penelitian ini adalah modifikasi titanium oksida

dengan material logam lainnya karena berpotensi memiliki efek sinergis sebagai akseptor elektron dan pencegah reaksi rekombinasi elektron-hole (Linsebigler, Lu and Yates, 1995; Gupta and Tripathi, 2011).

Material semikonduktor seperti TiO_2 dan ZnO adalah bahan yang menjanjikan untuk digunakan dalam aplikasi lingkungan karena kurangnya toksisitas, banyak tersedia, biaya murah, dan reaksinya stabil (Gegova - Dzhurkova *et al.*, 2013). TiO_2 memiliki kekurangan karena sifat fotokatalitiknya rendah, sedangkan ZnO merupakan fotokatalis yang aktif yang dapat menyerap sebagian besar sinar UV iradiasi dari TiO_2 (Thangavel *et al.*, 2015). Beberapa penelitian telah menggabungkan TiO_2 dan ZnO seperti yang dilakukan oleh Wang, dkk (Yuan Wang *et al.*, 2016) mendekorasi ZnO dan TiO_2 dengan mengamati penekanan dalam rekombinasi muatan dan peningkatan penyerapan sinar UV dibandingkan dengan TiO_2 murni. Zha dkk (Zha, Nadimicherla and Guo, 2015) telah mensintesis TiO_2/ZnO dan terbukti meningkatkan fotokatalisis untuk mendegradasi jingga metil. Selain itu, Johra dkk (Johra and Jung, 2015) mempelajari heterostruktur TiO_2/ZnO lebih meningkatkan fotokatalitik dibandingkan ZnO sendiri. Sedangkan pada penelitian Zalani dkk (Zalani, Kaleji and Mazinani, 2019) nanokomposit $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ berhasil mendeteksi penyerapan optikal pada daerah sinar tampak (*visible light*) dan *band gap* sebesar 2.7 eV lebih rendah dibandingkan TiO_2 (P25) sendiri. Terlepas dari mobilitas elektron dan penggabungan TiO_2/ZnO yang memiliki fotokatalitik yang baik namun responnya kurang terhadap sinar tampak dan fotokorosi tinggi. Untuk membuat heterojungsi TiO_2/ZnO dengan sifat optik dan fotokatalis yang efisien maka nanopartikel logam seperti Fe, Cu, Al, Co dan Ce telah dimasukkan sebagai ko-katalis dalam bahan fotovoltaiik untuk mempromosikan penyerapan cahaya tampak dan pemisahan elektron yang diinduksi foto dan lubang (*hole*) (He *et al.*, 2016). Penelitian penggunaan katalis Cu/ZnO sudah dikembangkan pada proses hidrogenasi CO_2 dan efektif menghasilkan metanol (Saito *et al.*, 1995). Pada penelitian Yudha Ramanda (Ramanda *et al.*, 2017) telah mengembangkan katalis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ dengan feed CMC (*Carboxymethyl Cellulose*) untuk mendapatkan komponen biofuel diantaranya metanol. Pada penelitian ini nanokomposit memiliki sifat magnetik dengan melaminasi SiO_2 pada Fe_3O_4 agar tidak kontak langsung dengan TiO_2 yang

bisa menyebabkan *photodissolution*. Fotokatalis akan menghasilkan pasangan *electron-hole* dimana lubang (*hole*) memiliki karakteristik asam Lewis dan *photocracking* dapat terjadi pada kondisi *ambient*. Kemudian pada tahun 2019 penelitian Yudha Ramanda (Ramanda, Nuryono and Kunarti, 2019) dilanjutkan dengan penggunaan katalis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ untuk mereduksi CO_2 secara *indirect* dengan ion karbonat sebagai *intermediate*. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa fotokatalis dengan *indirect* CO_2 *reduction* menggunakan sinar UV dapat dikembangkan karena juga memiliki respon pada sinar tampak (*visible light*). Modifikasi TiO_2 dengan menggunakan material magnetik (Fe_3O_4) juga dapat memperkecil *band gap energy* (Banisharif *et al.*, 2013).

Proses fotokatalis untuk mengubah (mengurangi) gas CO_2 menjadi metanol telah banyak dipelajari dalam beberapa tahun terakhir. Proses ini menggunakan banyak reaktor dan sumber cahaya, baik ultraviolet maupun cahaya tampak (Cazar, 2019). Beberapa akademisi telah banyak melakukan penelitian tentang pengembangan reaktor fotokatalis (M. Bouchy, 2003) dan industri (Davies, 2017). Pengembang desain seperti desain fotoreaktor menggunakan LED daya tinggi (Khademalrasool, 2016), fotoreaktor dengan 24 LED (Wang and Ku, 2006), fotoreaktor dengan LED strip (Le, 2017), reaktor fotokatalis dengan lampu UV A (Ghosh, Achari and Langford, 2016), fotoreaktor untuk grafena oksida dengan menggunakan lampu UV A dan UV C (Katic, 2018), reaktor panel datar dengan lampu UV A (Robinson, 2004), reaktor panel datar untuk degradasi menggunakan metilen biru (Sutisna, 2017). Sebagian besar fotoreaktor dirancang dan dikembangkan menggunakan lampu LED, lampu UV A, dan lampu UV C. Namun, reaktor yang banyak digunakan terutama komersial dan mahal. Untuk mengembangkan desain dengan harga murah, peneliti menggunakan komponen diperoleh dari pasar online pada masa pandemi covid-19 (2019 – 2021). Untuk mendapatkan harga reaktor komersial relatif tinggi dan sulit diperoleh pada situasi tersebut. Dalam penelitian ini, peneliti merancang reaktor fotokatalis dengan menekankan penggunaan panel listrik dan biaya yang lebih rendah untuk mengontrol pengujian nanokomposit TiO_2 .

Berdasarkan uraian dari beberapa penelitian maka untuk mengatasi bahan pencemar gas CO_2 yaitu dengan cara mereduksinya menggunakan teknologi

fotokatalis. Material fotokatalis akan membantu proses gas CO₂ menjadi senyawa kimia yang lebih bermanfaat, seperti metanol dan metana (Dilla, Schlögl and Strunk, 2017). Aktivitas material fotokatalis dapat ditingkatkan dengan senyawa heterojungsi. Fotokatalis heterojungsi adalah bahan yang terdiri dari dua atau lebih semikonduktor berbeda dengan celah pita berbeda, yang digabungkan untuk membentuk sambungan (*junction*). Fotokatalis ini telah menarik perhatian besar karena potensinya dalam mengatasi tantangan energi dan lingkungan. Fotokatalis heterojungsi menunjukkan sifat fotokatalitik yang lebih baik dibandingkan dengan fotokatalis massal atau komponen tunggal. Struktur heterojungsi memungkinkan pemisahan pasangan lubang elektron yang difotogenerasi secara efisien, sehingga menghasilkan peningkatan aktivitas fotokatalitik. Selain itu, fotokatalis heterojungsi dapat dirancang untuk memiliki medan listrik internal, yang selanjutnya mendorong pemisahan muatan dan meningkatkan efisiensi secara keseluruhan. Bahan-bahan ini telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam aplikasi seperti pemisahan air untuk produksi hidrogen dan degradasi polutan organik (Ozer and Eroglu, 2023) (Lin *et al.*, 2023). Material heterojungsi dapat disintesis dengan berbagai metode seperti kopresipitasi, dekomposisi termal, hidrotermal, solvotermal dan dengan bantuan *microwave* (Kubiak *et al.*, 2020). Masing – masing metode menunjukkan beberapa keterbatasan baik dalam kompleksitas, biaya pemrosesan, dan hasil homogenitas. Sementara sintesis yang dibantu dengan *microwave* membutuhkan proses yang sederhana, murah, dan rute sintesis yang cepat. Sintesis dengan bantuan *microwave* (gelombang mikro) didasarkan pada interaksi ion gelombang mikro dengan materi dimana molekul dengan momen dipol menyerap gelombang mikro dan mengubah energi menjadi panas yang dihasilkan dalam bahan atau suspensi itu sendiri. Oleh karena itu gradien suhu dalam sintesis gelombang mikro berlawanan dengan pemanasan konvensional, yaitu dari dalam ke luar yang disebut inti dalam pemanasan. Perpindahan panas gelombang mikro tergantung pada karakteristik faktor spesifik *loss* untuk masing – masing pelarut. Semakin tinggi nilai ini, semakin baik pelarut akan menyerap gelombang mikro (Ćurković *et al.*, 2021). Selama sintesis, output energi tinggi memungkinkan tingkat pemanasan yang tinggi dan hasil produk yang tinggi yang dilakukan dengan kontrol pemanasan yang tepat sehingga

memungkinkan pembentukan fase cepat untuk distribusi ukuran partikel (*monodispersion*) (Kalan *et al.*, 2016). Waktu sintesis yang lebih cepat juga dimungkinkan oleh fenomena pemanasan yang berlebih, di mana pelarut ketika terkena gelombang mikro dalam reaktor tertutup dapat dipanaskan sampai suhu di atas titik didih atmosfer tanpa mendidih (Ćurković *et al.*, 2014). Menurut literatur yang tersedia, adsorpsi dan fotokatalitik nanokomposit $\text{TiO}_2/\text{ZnO}/\text{Cu}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ belum diselidiki sejauh ini. Oleh karena itu dalam penelitian ini dilakukan sintesis $\text{TiO}_2/\text{ZnO}/\text{Cu}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ dengan bantuan gelombang mikro (*microwave*) untuk mempelajari karakterisasi, adsorpsi dan sifat fotokatalis tersebut dengan menggunakan Low Cost Photoreactor LCP-21.

Penelitian tahap pertama adalah pembuatan desain fotoreaktor yang berbiaya murah (*Low Cost Photoreactor*). Penelitian tahap ke-dua, ke-tiga dan ke-empat adalah mensintesis Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ dengan metode konvensional, *sonochemical assisted co-precipitation* dan gelombang mikro (*microwave*). Penelitian tahap ke-lima adalah preparasi katalis $\text{TiO}_2/\text{ZnO}/\text{Cu}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$. Sedangkan penelitian tahap akhir adalah uji aktivitas fotokatalis $\text{TiO}_2/\text{ZnO}/\text{Cu}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ untuk mereduksi (hidrogenasi) gas CO_2 menggunakan gas Hidrogen (H_2) dan gas karbondioksida (CO_2). Uji aktivitas fotokatalis dilakukan dengan menggunakan *Low Cost Photoreactor* LCP-21 yang telah didesain sebelumnya.

1.2. Rumusan Masalah

Penggunaan bahan bakar fosil secara ekstensif menyebabkan peningkatan konsentrasi CO_2 di atmosfer setiap tahunnya. Gas ini merupakan polutan organik yang semakin hari semakin bertambah jumlahnya di udara. Suatu upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi kadar gas CO_2 tersebut adalah dengan menggunakan fotokatalisis. Fotokatalisis merupakan suatu proses kimia yang dibantu oleh adanya cahaya dan material katalis.

Fotoreaktor untuk mereduksi gas CO_2 sebagai wadah proses fotokatalisis masih tergolong cukup mahal di pasaran sehingga pada penelitian ini didesain suatu fotoreaktor dengan cara perakitan komponen secara mandiri (*self-assembly*) Fotokatalis yang paling banyak digunakan adalah TiO_2 karena stabil, tahan korosi, melimpah, dan murah. Beberapa upaya dan penelitian sudah dilakukan untuk

menangkap CO₂ dari atmosfer dan mengkonversi CO₂ menjadi produk kimia yang bernilai ekonomis. Titanium oksida (TiO₂) merupakan material fotokatalis yang paling banyak dikembangkan untuk reduksi CO₂ dalam fotokatalis (Huang *et al.*, 2008). Namun, aktivitas material TiO₂ masih perlu ditingkatkan karena adanya fenomena rekombinasi elektron-*hole* dan keterbatasan aktivitas TiO₂ di daerah sinar tampak (Low, Cheng and Yu, 2016). Pada penelitian ini TiO₂ (3,2 eV) dideposit dengan senyawa heterojungsi antara lain, Fe₃O₄, ZnO dan Cu untuk memperkecil nilai energi *band gap*-nya. Untuk senyawa Fe₃O₄ dilaminasi dengan SiO₂ agar tidak langsung kontak dengan TiO₂ karena dapat menyebabkan proses *photodissolution*. Untuk melakukan proses fotokatalis maka diperlukan desain fotoreaktor dengan biaya yang murah, efisien dan hemat energi. Pelaksanaan penelitian pendahuluan tahun 2021 dilakukan rancang bangun fotoreaktor yang diberi nama *Low Cost Photoreactor* (LCP-21). Kinerja fotoreaktor LCP-21 akan dipelajari dalam proses fotokatalisis reduksi (hidrogenasi) gas karbondioksida (CO₂).

Berdasarkan latar belakang maka permasalahan yang akan di kaji dalam penelitian adalah sebagai berikut.

1. Sintesis mana yang cepat dan tepat untuk memperoleh nanopartikel Fe₃O₄, Fe₃O₄/SiO₂ dari 3 (tiga) metode sintesis yang akan dilakukan diantaranya metode kopresipitasi (konvensional), kopresipitasi dengan bantuan ultrasonik (*sonochemical assisted co-precipitation*) dan gelombang mikro (*microwave*)?
2. Metode apa yang tepat untuk memodifikasi material fotokatalis TiO₂/ZnO/Cu/Fe₃O₄/SiO₂ dan bagaimana sifat materialnya?
3. Bagaimana aktivitas fotokatalis material TiO₂/ZnO/Cu/Fe₃O₄/SiO₂ dalam mereduksi gas karbondioksida (CO₂)?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian adalah sebagai berikut.

1. Untuk menganalisa produk sintesis nano partikel Fe₃O₄ dan Fe₃O₄/SiO₂ dan mengetahui sifat materialnya.
2. Untuk mendeposit material fotokatalis TiO₂/ZnO/Cu dengan nanopartikel Fe₃O₄/SiO₂ dan mengetahui sifat material heterojungsi TiO₂/ZnO/Cu/Fe₃O₄/SiO₂.

3. Untuk menguji aktivitas fotokatalis material $\text{TiO}_2/\text{ZnO}/\text{Cu}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ dalam mereduksi (hidrogenasi) karbondioksida (CO_2) menggunakan *Low Cost Photoreactor*.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Memberikan alternatif teknologi dalam mereduksi (hidrogenasi) gas CO_2 yang menggunakan material semikonduktor berbasis TiO_2 .
2. Menghasilkan produk reduksi dari gas CO_2 yang dapat dijadikan sebagai sumber energi maupun bahan baku dalam proses industri kimia.
3. Mendorong pengembangan aplikasi material fotokatalis dan mendapatkan teknologi desain reaktor dengan biaya yang murah (*Low Cost Photoreactor*), efisien dan hemat energi sehingga dapat digunakan pada skala industri.

1.5. Batasan Penelitian

Dalam penelitian ini penulis melakukan batasan sebagai berikut.

1. Penelitian ini memakai metode eksperimen laboratorium, dimana teknologi yang dilakukan adalah untuk pengolahan (*treatment*) gas pencemar yaitu gas CO_2 .
2. Material TiO_2 yang digunakan tidak mendapatkan pemurnian lebih lanjut.

1.6. Hipotesis

Material semikonduktor sering digunakan sebagai fotokatalis (Tong *et al.*, 2011). Menurut teori *band energy* (pita energi), struktur pita semikonduktor yang terputus (*discontinuous*) terdiri atas pita valensi energi rendah yang diisi dengan elektron, pita konduksi energi tinggi, dan celah pita (*band gap*). Ketika energi foton yang datang sama atau melebihi celah pita, fotoeksitasi pasangan *hole-electron* mengakibatkan kemungkinan terjadinya proses reaksi fotokatalis redoks (Grätzel, 2001). Fotokatalis melibatkan proses seperti generasi, pemisahan, rekombinasi, dan penangkapan permukaan elektron fotogenerasi dan *hole – pairs*. Reduksi gas CO_2 akibat adanya gugus aktif elektron yang ada di permukaan material. Dalam hal ini, elektron sebagai species pereduksi akan terakumulasi pada nanopartikel magnetic

(Fe₃O₄). Penambahan nanopartikel Fe₃O₄ diharapkan akan meningkatkan aktivitas fotokatalis material TiO₂/ZnO (Babudurai *et al.*, 2018).

Hipotesis 1. Modifikasi material TiO₂/ZnO/Cu dengan mendeposit nanopartikel magnetik (Fe₃O₄) dapat meningkatkan aktivitas fotokatalis dalam reduksi gas CO₂.

Hipotesis 2. Komposisi mol material TiO₂/ZnO/Cu berpengaruh terhadap penyerapan sinar tampak (*visible light*) dan *band gap* material tersebut.

Hipotesis 3. Sintesis Fe₃O₄ dengan menggunakan gelombang microwave dapat menghasilkan produk nanopartikel dengan lebih cepat dan efisien.

1.7. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan bertujuan untuk mempermudah pemahaman dan penelaahan penelitian. Dalam laporan disertasi ini, sistematika penulisan terdiri atas lima bab, masing – masing uraian yang secara garis besar dapat dijelaskan sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Dalam bab ini merupakan pendahuluan yang materinya sebagian besar menyempurnakan penelitian yang berisikan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan penelitian, hipotesis, sistematika penulisan, kebaruan penelitian serta penelitian terdahulu dan terkait.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini menguraikan teori – teori yang mendasari pembahasan secara terperinci yang memuat tentang sejarah fotokatalisis, efektivitas semikonduktor sebagai material fotokatalis, titanium oksida dan modifikasinya, zink oksida, nanopartikel magnetik, reduksi gas CO₂, mekanisme reduksi gas CO₂, metode sonokimia, gelombang mikro dan desain sistem fotoreaktor.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini berisikan tentang pengembangan metodologi yang terdiri dari alat dan bahan serta prosedur penelitian.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini menguraikan mengenai hasil dan pembahasan sintesis dan karakterisasi dari katalis dan produk yang dihasilkan.

BAB V : PENUTUP

Bab ini berisikan tentang kesimpulan dari serangkaian pembahasan disertasi berdasarkan analisis yang telah dilakukan serta saran – saran yang perlu disampaikan kepada obyek penelitian atau bagi penelitian selanjutnya.

1.8. Kebaruan Penelitian

Kebaruan dari penelitian (*novelty*) yang dihasilkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Reduksi CO₂ dengan menggunakan *Low Cost Photoreactor* hasil desain sendiri (*self-assembly*), hemat energi dan dapat diaplikasikan pada skala industri.

Fotoreaktor terdiri atas panel pengendali (*control panel*) dan kabinet pengaman. Panel pengendali (*control panel*) yang didesain terdiri atas rangkaian rangkaian *power supply*, rangkaian kontrol, rangkaian lampu indikator dan rangkaian sistim alarm. Untuk rangkaian kontrol (pengendali) temperatur di desain secara otomatis dimana proses dapat di atur sesuai temperatur yang diinginkan. Posisi saklar heater dan cooler dapat membantu terlaksananya proses fotokatalis. Bila proses menginginkan hasil reaksi panas maka heater diaktifkan, begitu pula sebaliknya.

2. Sintesis Fe₃O₄ menggunakan metode gelombang mikro (*microwave*).

Penelitian ini menggunakan metode gelombang mikro (*microwave*) untuk sintesis material Fe₃O₄.

3. Katalis baru yang dihasilkan adalah TiO₂/ZnO/Cu/Fe₃O₄/SiO₂ untuk mereduksi CO₂ menjadi metanol (CH₃OH). Dari beberapa sumber penelitian diketahui bahwa material ini belum pernah diaplikasikan untuk fotoreduksi / hidrogenasi CO₂.

1.9. Penelitian Terdahulu dan Terkait

1.9.1. Referensi Penelitian Fotoreaktor dengan Fotokatalis TiO₂ dan Produk Metanol (CH₃OH)

Beberapa penelitian menggunakan fotoreaktor disajikan pada Tabel 1.1. Seluruh penelitian ini masih merupakan penelitian pengembangan. Desain fotoreaktor dipengaruhi oleh faktor seperti sumber cahaya, konfigurasi geometris untuk mengakomodasi cahaya, bahan konstruksi, adanya pertukaran panas, adanya media pencampuran dan aliran.

Tabel 1.1. Penelitian penggunaan fotoreaktor dengan fotokatalis TiO₂ dan menghasilkan produk metanol (CH₃OH)

No	Ref.	Jenis Fotoreaktor	Desain reaktor	Katalis dan Aplikasi	Feed	Jenis Lampu	Parameter	Produk
1.	(Ola <i>et al.</i> , 2012)	External Illuminated Slurry	V = 8.9 cm x 7.9 cm batch (Likuid – Padat – Gas), quartz vessel	Pd dan Rh-TiO ₂	CO ₂ , H ₂ O	8 W UV A	T = 25°C P = 1.0 bar	CH ₄ , CH ₃ OH, CH ₃ CHO
2.	(Tseng, Chang and Wu, 2002)	Internal Illuminated Slurry	300 ml, batch, L-S-G, quartz vessel	TiO ₂ dan Cu/TiO ₂	CO ₂ , H ₂ O	8 W Hg	P = 101.3 – 135.6 kPa T = 50°C	O ₂ CH ₃ OH = 19.75 μmol g _{cat} ⁻¹ h ⁻¹
3.	(Kočí <i>et al.</i> , 2009)	Internal Annular slurry	Batch, L-S-G, stainless steel	Ag/TiO ₂	CO ₂ , H ₂ O	8 W Hg	P = 110 KPa	H ₂ , CH ₄ , CH ₃ OH, CO
4.	(Li <i>et al.</i> , 2012)	Internal Slurry	Continuous L-S-G	CdS(Bi ₂ S ₃)/TiO ₂ nanotube	CO ₂ , H ₂ O	500 W Xe	P = 1 atm, T = 298	CH ₃ OH = 44.92 μmol g _{cat} ⁻¹ h ⁻¹
5.	(Sharma and Lee, 2017)	Silinder fixed bed	L-S-G, Pyrex glass	NiO-TiO ₂ /ACF	CO ₂ , H ₂ O	20 W UV dan Sinar Tampak	Ambient pressure, 80°C	CH ₃ OH, 377 μmol g _{cat} ⁻¹ h ⁻¹ (UV), 493 μmol g _{cat} ⁻¹

								h^{-1} (sinar tampak)
6.	(Sharma and Lee, 2017)	Optical Fiber	G-S, stainless steel, continuous	Cu-Fe/TiO ₂ -SiO ₂	CO ₂ , H ₂ O	320 – 500 nm		CH ₄ , C ₂ H ₄ , CH ₃ OH
7.	(Ola <i>et al.</i> , 2012)	Internal Illuminated Monolith	Pyrex glass wrapped in alum. foil	Pd dan Rh-TiO ₂	CO ₂ , H ₂ O	Hg	1 bar 25°C	Metanol/ asetaldehid
8.	(Zhu <i>et al.</i> , 2016)	Slurry membran	L-S-G, fluidized bed, batch	Pt/SrTiO ₃ :Rh	CO ₂ : CO = 10 : 1, H ₂ O	Sinar matahari	pH = 2.5 T = 273 P = 1 – 20 atm	CH ₃ OH
9.	(Cheng <i>et al.</i> , 2015)	Slurry membran	L-S-G, fluidized bed, batch	Pt/SrTiO ₃ :Rh	CO ₂ CO H ₂ O	300 W Xe	pH = 2.5 T = ambient	CH ₃ OH
10.	(Xiong <i>et al.</i> , 2017)	Bubbling twin	L-S-G, Fluidized bed, cont.	Pt/SrTiO ₃ .Rh	CO ₂ CO H ₂ O	Sinar matahari	pH = 2.6 T = 273 – 333	CH ₃ OH = 1.16 $\mu\text{mol h}^{-1}$
11.	(Qin <i>et al.</i> , 2013)	Reaktor H		Pt/FTO	CO ₂ H ₂ O	300 W Xe		HCHO

12.	(Guan, Kida and Yoshida, 2003)	Concentrated sunlight	L-S-G, fluidized bed, batch S-G, batch, quartz	Pt/K ₂ Ti ₆ O ₁₃ Cu/ZnO	CO ₂ H ₂ O	Sinar matahari	583 K 202 kPa	CH ₃ OH = 0.03562 CH ₃ OH = 5.33 μmol h ⁻¹ gcat ⁻¹
-----	--------------------------------	-----------------------	---	---	-------------------------------------	----------------	------------------	---

1.9.2. Referensi Penelitian berbasis Material Fotokatalis TiO₂ untuk mereduksi CO₂ menjadi Metanol

Beberapa penelitian berbasis material fotokatalis TiO₂ telah dilaporkan dimanfaatkan untuk mereduksi gas CO₂. Tujuan utama pengembangan penelitian reduksi gas CO₂ menggunakan fotokatalis berbasis TiO₂ adalah untuk memodifikasi material dan meningkatkan aktivitas material TiO₂. Tingkat efektivitas reaksi reduksi dapat diketahui dari jumlah produk yang diperoleh. Sampai saat ini, belum ada standar baku mengenai tingkat efektivitas fotokatalis titanium oksida dalam reduksi gas CO₂. Beberapa penelitian fotoreduksi CO₂ menjadi metanol dengan menggunakan TiO₂ disajikan pada Tabel 1.2. Penelitian – penelitian tersebut masih merupakan penelitian pengembangan. Tingkat efektivitas reaksi dan jumlah produk yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh desain reaktor, sistem pengujian (*batch* atau *flow*), jenis dan jumlah katalis, jenis reaktan, panjang gelombang cahaya yang digunakan, tingkat kemurnian, ada atau tidaknya proses pretreatment terhadap material fotokatalis, dan lain – lain.

Tabel 1.2. Penelitian fotoreduksi CO₂ menjadi metanol menggunakan fotokatalis TiO₂

No	Referensi	Metode Sintesis	Kondisi	Produk
1.	(Wang <i>et al.</i> , 2017)	Solvothermal menggunakan reduktan isopropanol dan fotokatalis Bi ₂ S ₃ QDs/TiO ₂	Lampu : Hg Daya : 250 W Panjang gelombang : 365 nm Fase : cair Berat katalis : 12 mg Lama radiasi : 6 jam Proses : batch Cleaning : tidak disebutkan	CH ₃ OH = 1169,15 μmol/g/h
2.	(Kočí <i>et al.</i> , 2010)	Sol gel menggunakan reduktan air dan fotokatalis Ag/doped TiO ₂	Lampu : Hg Daya : 8 W Panjang gelombang : 254 & 365 nm Fase : cair Berat katalis : 0,1 g Lama radiasi : 24 jam Proses : batch Cleaning : tidak disebutkan	CH ₃ OH = 2 μmol/gcat
3.	(Sharma and Lee, 2017)	Sol gel menggunakan reduktan air deionisasi dan fotokatalis Ni/TiO ₂	Lampu : Xe Daya : 20 W Panjang gelombang : 395 nm Fase : cair Berat katalis : tidak disebutkan Lama radiasi : 2 jam Proses : batch Cleaning : tidak disebutkan	CH ₃ OH = 986,3 μmol/g

4.	(Li <i>et al.</i> , 2012)	Menggunakan reduktan sodium hidroksida dan absolut sodium sulfit (dissolved) dalam air destilat dan fotokatalis CdS(Bi ₂ S ₃)/TiO ₂	Lampu : Xe Daya : 500 W Panjang gelombang : - Fase :- Berat katalis : 200 mg Lama radiasi :- Proses : batch Cleaning : tidak disebutkan	CH ₃ OH = 224,6 μmol/gcat
5.	(Wang <i>et al.</i> , 2009)	Menggunakan reduktan air dan fotokatalis CdSe/Pt/TiO ₂	Lampu : Xe Daya : 300 W Panjang gelombang :- Fase :- Berat katalis : 300 mg Lama radiasi :- Proses : batch Cleaning : tidak disebutkan	CH ₃ OH = 3.3 ppm/gcat
6.	(Wang <i>et al.</i> , 2012)	Menggunakan reduktan NaOH dan fotokatalis ZnPc/TiO ₂	Lampu : Xe Daya : 500 W Panjang gelombang :- Fase :- Berat katalis : 150 mg Lama radiasi :- Proses : batch Cleaning : tidak disebutkan	CH ₃ OH = 248,06 μmol/gcat
7.	(Selvi and Sivakumar, 2017)	Sol gel menggunakan reduktan air / NaOH dan fotokatalis Cu Impregnasi TiO ₂	Lampu : Hg Daya : 6 W Panjang gelombang : 254 nm Fase : cair	CH ₃ OH = 4120 μmol/gcat

		Berat katalis : 0,1 g Lama radiasi : 20 jam Proses : batch Cleaning : tidak disebutkan	
8. (Kočí <i>et al.</i> , 2010)	Sol gel menggunakan reduktan air dan fotokatalis Ag doped TiO ₂	Lampu : Hg Daya : 8 W Panjang gelombang :- Fase :- Berat katalis : 1 g/dm ³ Lama radiasi :- Proses :-	CH ₃ OH = 9 μmol/gcat
9. (Tu <i>et al.</i> , 2017)	Menggunakan reduktan NaHCO ₃ dan fotokatalis MoS ₂ -TiO ₂ hybrid	Lampu : Xe Daya : 300 W Panjang gelombang :- Fase :- Berat katalis :- Lama radiasi :- Proses :- Cleaning : tidak disebutkan	CH ₃ OH = 10,6 μmol/gcat
10. (Liu, Zhou and Huang, 2015)	Menggunakan reduktan air distilasi dan fotokatalis Amine functionalized TiO ₂	Lampu : Xe Daya : 300 W Panjang gelombang :- Fase :- Berat katalis : 100 mg Lama radiasi :- Proses :- Cleaning : tidak disebutkan	CH ₃ OH = 2 μmol/gcat

11. (Cheng <i>et al.</i> , 2016)	Menggunakan reduktan air dan fotokatalis porous TiO ₂	Lampu : LED Daya : 100 W Panjang gelombang :- Fase :- Berat katalis : 1,7 mg/cm ² Lama radiasi :- Proses :- Cleaning : tidak disebutkan	CH ₃ OH = 454,6 μmol/gcat.h
12. (Truong <i>et al.</i> , 2017)	Menggunakan reduktan air distilasi yang mengandung sodium bikarbonat NaHCO ₃ dan fotokatalis anatase TiO ₂ nanocrystals	Lampu : Xe Daya : 500 W Panjang gelombang :- Fase :- Berat katalis : 0,05 g Lama radiasi :- Proses :- Cleaning : tidak disebutkan	CH ₃ OH = 0,289 μmol/gcat.h
13. (He <i>et al.</i> , 2014)	Menggunakan reduktan NaOH dan fotokatalis Flourinated anatase TiO ₂ nanosheet	Lampu : Hg Daya : 18 W Panjang gelombang :- Fase :- Berat katalis : 0,3 g Lama radiasi :- Proses :- Cleaning : tidak disebutkan	CH ₃ OH = 0,09 μmol
14. (Li <i>et al.</i> , 2013)	Menggunakan reduktan NaHCO ₃ dan fotokatalis ZnO-rGO	Lampu : Xe Daya : 500 W	CH ₃ OH = 4,58 μmol/gcat

		Panjang gelombang :- Fase :- Berat katalis : 100 mg Lama radiasi :- Proses :- Cleaning : tidak disebutkan	
15. (Zhang <i>et al.</i> , 2014)	Menggunakan reduktan NaOH dan fotokatalis Graphene – TiO ₂	Lampu :- Daya : 150 W Panjang gelombang :- Fase :- Berat katalis : 2 mg/l Lama radiasi :- Proses :- Cleaning : tidak disebutkan	CH ₃ OH = 150 μmol/gcat
16. (Liu <i>et al.</i> , 2016)	Menggunakan reduktan air distilasi yang mengandung KOH dan fotokatalis TiO ₂ - graphene	Lampu : Hg Daya : 250 W Panjang gelombang :- Fase :- Berat katalis : 0,1 g Lama radiasi :- Proses :- Cleaning : tidak disebutkan	CH ₃ OH = 2,2 μmol/gcat
17. (Li <i>et al.</i> , 2015)	Menggunakan reduktan NaHCO ₃ dan fotokatalis AgBr/C ₃ N ₄ /N-graphene	Lampu : Xe Daya : 500 W Panjang gelombang :- Fase :- Berat katalis : 0,02 g Lama radiasi :-	CH ₃ OH = 105,89 μmol/gcat.

		Proses :- Cleaning : tidak disebutkan	
18. (Ramanda, Nuryono and Kunarti, 2019)	Menggunakan reduktan Ca(OH)_2 dan fotokatalis $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$	Lampu : UV 253,7 nm Lama radiasi : 1 jam	$\text{CH}_3\text{OH} = 55,01\%$ selective
19. (PRADIPTA, 2019)	Menggunakan reduktan Na_2CO_3 dan fotokatalis $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$	Lampu UV : 275 nm Lama radiasi : 1 jam	$\text{CH}_3\text{OH} = 16,82\%$

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, H. *et al.* (2017) 'Modified TiO₂ photocatalyst for CO₂ photocatalytic reduction: An overview', *Journal of CO₂ Utilization*, 22, pp. 15–32.
- Ablat, A. *et al.* (2016) 'Communication', *Solid State Communications*, 243(C), pp. 7–11.
- Advanced Resources International* (2010) *White Paper*.
- Agrawal, D. (2010) '9 - Microwave sintering of ceramics, composites and metal powders', in Fang, Z.Z.B.T.-S. of A.M. (ed.) *Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*. Woodhead Publishing, pp. 222–248.
- Ahmad, F. *et al.* (2022) 'Unique Properties of Surface-Functionalized Nanoparticles for Bio-Application : Functionalization Mechanisms and Importance in Application', *Nanomaterials*, 12.
- Ahn, T. *et al.* (2012) 'Formation Pathways of Magnetite Nanoparticles by Coprecipitation Method', *The Journal of Physical Chemistry C*, 116(10), pp. 6069–6076.
- Ajinkya, N. *et al.* (2020) 'Magnetic Iron Oxide Nanoparticle (IONP) Synthesis to Applications: Present and Future.', *Materials (Basel, Switzerland)*, 13(20).
- Ajmal, S. *et al.* (2023) 'A microwave-assisted decoration of carbon nanotubes with Fe₃O₄ nanoparticles for efficient electrocatalytic oxygen reduction reaction', *Journal of Alloys and Compounds*, 943.
- Alterary, S.S. and Alkhamees, A. (2021) 'Synthesis , surface modification , and characterization of Fe₃O₄ @SiO₂ coreshell nanostructure', *Green Processing and Synthesis*, 10, pp. 384–391.
- Ameta, R. and Ameta, S. (2016) *Photocatalysis: Principles and Applications*.
- Ampelli, C. *et al.* (2012) 'The use of a solar photoelectrochemical reactor for sustainable production of energy', *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 46(6), pp. 651–657.
- Anjum, S. *et al.* (2017) 'Effect of cobalt doping on crystallinity, stability, magnetic

- and optical properties of magnetic iron oxide nano-particles', *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 432, pp. 198–207.
- Ardayanian, M. and Sedigh, N. (2014) 'Heavy lithium-doped ZnO thin films prepared by spray pyrolysis method', *Bulletin of Materials Science*, 37, pp. 1309–1314.
- von der Assen, N. *et al.* (2016) 'Selecting CO₂ Sources for CO₂ Utilization by Environmental-Merit-Order Curves', *Environmental Science & Technology*, 50(3), pp. 1093–1101.
- Auvinen, J. and Wirtanen, L. (2008) 'The Influence of Photocatalytic Interior Paints on Indoor Air Quality', *Atmospheric Environment*, 42, pp. 4101–4112.
- Babudurai, M. *et al.* (2018) 'Photocatalytic degradation of Orange G using TiO₂/Fe₃O₄ nanocomposites', *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29.
- Banisharif, A. *et al.* (2013) 'TiO₂ /Fe₃O₄ Nanocomposite Photocatalysts for Enhanced Photo-Decolorization of Congo Red Dye', *International journal of nanoscience and nanotechnology*, 9, pp. 193–202.
- Barton Cole, E. *et al.* (2010) 'Using a One-Electron Shuttle for the Multielectron Reduction of CO₂ to Methanol: Kinetic, Mechanistic, and Structural Insights', *Journal of the American Chemical Society*, 132(33), pp. 11539–11551.
- Beyers, E., Cool, P. and Vansant, E.F. (2005) 'Anatase formation during the synthesis of mesoporous titania and its photocatalytic effect.', *The journal of physical chemistry. B*, 109(20), pp. 10081–10086.
- Bose, A. *et al.* (2015) 'Co-production of power and urea from coal with CO₂ capture: Performance assessment', *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17.
- Braun, J.H., Baidins, A. and Marganski, R.E. (1992) 'TiO₂ pigment technology: a review', *Progress in Organic Coatings*, 20(2), pp. 105–138.
- Brus, L.E. (1984) 'Electron–electron and electron-hole interactions in small semiconductor crystallites: The size dependence of the lowest excited electronic state', *The Journal of Chemical Physics*, 80(9), pp. 4403–4409.

- Calatayud, T. *et al.* (2015) *Controlling the morphology of TiO₂ nanocrystals with different capping agents*.
- Carp, O., Huisman, C.L. and Reller, A. (2004) 'Photoinduced reactivity of titanium dioxide', *Progress in Solid State Chemistry*, 32(1), pp. 33–177.
- Caruntu, D. *et al.* (2004) 'Synthesis of variable-sized nanocrystals of Fe₃O₄ with high surface reactivity', *Chemistry of Materials*, 16(25), pp. 5527–5534.
- Cazar, R.R. (2019) *Design and Application of Low Cost Photoreactors for Applications in Photocatalytic Reactor*. Universidad San Francisco De Quito USFQ.
- Cha, J.H. *et al.* (2020) 'Novel synthesis of core–shell structured Fe₃O₄@SiO₂ nanoparticles via sodium silicate', *Ceramics International*, 46(10, Part A), pp. 14384–14390
- Chan, S.H.S. *et al.* (2011) 'Recent developments of metal oxide semiconductors as photocatalysts in advanced oxidation processes (AOPs) for treatment of dye waste-water', *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 86(9), pp. 1130–1158.
- Chang, X., Wang, T. and Gong, J. (2016) 'CO₂ photo-reduction: insights into CO₂ activation and reaction on surfaces of photocatalysts', *Energy & Environmental Science*, 9(7), pp. 2177–2196.
- Chen, A. *et al.* (2021) 'Combined Approach of Compression Molding and Magnetic Attraction to Micropatterning of Magnetic Polydimethylsiloxane Composite Surfaces with Excellent Anti-Icing/Deicing Performance', *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(40), pp. 48153–48162.
- Chen, B.-R. *et al.* (2016) 'Production of renewable fuels by the photohydrogenation of CO₂: effect of the Cu species loaded onto TiO₂ photocatalysts', *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(6), pp. 4942–4951.
- Chen, D., Li, F. and Ray, A. (2000) 'Effect of mass transfer and catalyst layer thickness on photocatalytic reaction', *AIChE Journal*, 46, pp. 1034–1045.
- Chen, X. *et al.* (2012) 'Ultrathin, Single-Crystal WO₃ Nanosheets by Two-Dimensional Oriented Attachment toward Enhanced Photocatalytic

- Reduction of CO₂ into Hydrocarbon Fuels under Visible Light', *ACS Applied Materials & Interfaces*, 4(7), pp. 3372–3377.
- Chen, X. and Mao, S.S. (2007) 'Titanium Dioxide Nanomaterials: Synthesis, Properties, Modifications, and Applications', *Chemical Reviews*, 107(7), pp. 2891–2959.
- Cheng, H. *et al.* (2015) 'A unique Z-scheme 2D/2D nanosheet heterojunction design to harness charge transfer for photocatalysis', *Journal of Materials Chemistry A*, 3(20), pp. 11006–11013.
- Cheng, Y.-H. *et al.* (2015) 'Photo-enhanced hydrogenation of CO₂ to mimic photosynthesis by CO co-feed in a novel twin reactor', *Applied Energy*, 147, pp. 318–324.
- Cheng, Z. *et al.* (2016) 'Synthesis, characterization, and photocatalytic activity of porous La-N-co-doped TiO₂ nanotubes for gaseous chlorobenzene oxidation.', *Journal of environmental sciences (China)*, 46, pp. 203–213.
- Chin, S.S., Chiang, K. and Fane, A.G. (2006) 'The stability of polymeric membranes in a TiO₂ photocatalysis process', *Journal of Membrane Science*, 275(1), pp. 202–211.
- Choi, W., Termin, A. and Hoffmann, M.R. (1994) 'The Role of Metal Ion Dopants in Quantum-Sized TiO₂: Correlation between Photoreactivity and Charge Carrier Recombination Dynamics', *The Journal of Physical Chemistry*, 98(51), pp. 13669–13679.
- Choi, Y.-S. *et al.* (2010) 'Recent Advances in ZnO-Based Light-Emitting Diodes', *IEEE Transactions on Electron Devices*, 57(1), pp. 26–41.
- Corma, A. and Garcia, H. (2013) 'Photocatalytic reduction of CO₂ for fuel production: Possibilities and challenges', *Journal of Catalysis*, 308, pp. 168–175.
- Cornell, R. and Schwertmann, U. (2003) 'Introduction to the Iron Oxides', in *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*, pp. 1–7.
- Cuéllar-Franca, R.M. and Azapagic, A. (2015) 'Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life

- cycle environmental impacts', *Journal of CO2 Utilization*, 9, pp. 82–102.
- Ćurković, L. *et al.* (2014) 'Photocatalytic degradation of Lissamine Green B dye by using nanostructured sol–gel TiO₂ films', *Journal of Alloys and Compounds*, 604, pp. 309–316.
- Ćurković, L. *et al.* (2021) 'A Review of Microwave-Assisted Sintering Technique', *Transactions of FAMENA*, 45.
- Czyżewski, A. *et al.* (2013) 'On competitive uptake of SO₂ and CO₂ from air by porous carbon containing CaO and MgO', *Chemical Engineering Journal*, 226, pp. 348–356.
- Davies, P.R. (2017) *Photocatalytic Materials for the Destruction of Recalcitrant Organic Industrial Waste*.
- Dewi, R. *et al.* (2020) 'The effect of precipitation pH on structural properties of magnetite nanoparticles', *AIP Conference Proceedings*, 2256(1), p. 30014.
- Diego-lopez, A. *et al.* (2023) 'Synthesis and mechanistic insights of SiO₂ @ WO₃ @ Fe₃O₄ as a Novel Supported Photocatalyst for Wastewater Remediation under Visible Light', *Applied Materials Today*, 33(July), p. 101879.
- Dijkstra, M.F.J. *et al.* (2001) 'Comparison of the efficiency of immobilized and suspended systems in photocatalytic degradation', *Catalysis Today*, 66(2), pp. 487–494.
- Dilla, M., Schlögl, R. and Strunk, J. (2017) 'Photocatalytic CO₂ Reduction Under Continuous Flow High-Purity Conditions: Quantitative Evaluation of CH₄ Formation in the Steady-State', *ChemCatChem*, 9(4), pp. 696–704.
- Dimitrijevic, N.M. *et al.* (2012) 'Dynamics of Interfacial Charge Transfer to Formic Acid, Formaldehyde, and Methanol on the Surface of TiO₂ Nanoparticles and Its Role in Methane Production', *The Journal of Physical Chemistry C*, 116(1), pp. 878–885.
- Dincer, I. (2000) 'Renewable energy and sustainable development: a crucial review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(2), pp. 157–

- Długosz, O. *et al.* (2021) 'Synthesis of Fe₃O₄/ZnO nanoparticles and their application for the photodegradation of anionic and cationic dyes', *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(3), pp. 561–574.
- Doherty, M.D. *et al.* (2010) 'Review', *Coordination Chemistry Reviews*, 254(21–22), pp. 2472–2482.
- Dresselhaus, M. and Thomas, I. (2001) 'Alternative energy technologies', *Nature*, 414, pp. 332–337.
- Duan, X. and Evans, D.G. (2006) *Layered Double Hydroxides*. 1st edn. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Edebali, S., Oztekin, Y. and Arslan, G. (2018) 'Chapter 4 - Metallic Engineered Nanomaterial for Industrial Use', in Mustansar Hussain, C.B.T.-H. of N. for I.A. (ed.) *Micro and Nano Technologies*. Elsevier, pp. 67–73.
- El-Kharrag, R., Amin, A. and Greish, Y.E. (2012) 'Low temperature synthesis of monolithic mesoporous magnetite nanoparticles', *Ceramics International*, 38(1), pp. 627–634.
- Ellerbrock, R., Stein, M. and Schaller, J. (2022) 'Comparing amorphous silica, short-range-ordered silicates and silicic acid species by FTIR', *Scientific Reports*, 12(1), p. 11708.
- Etacheri, V. *et al.* (2011) 'Oxygen Rich Titania: A Dopant Free, High Temperature Stable, and Visible-Light Active Anatase Photocatalyst', *Advanced Functional Materials*, 21, pp. 3744–3752.
- Etacheri, V. *et al.* (2015) 'Visible-light activation of TiO₂ photocatalysts: Advances in theory and experiments', *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 25, pp. 1–29.
- Evgenidou, E., Fytianos, K. and Poullos, I. (2005) 'Semiconductor-sensitized photodegradation of dichlorvos in water using TiO₂ and ZnO as catalyst', *Applied Catalysis B: Environmental*, 59, pp. 81–89.
- Fan, W., Zhang, Q. and Wang, Y. (2013) 'Semiconductor-based nanocomposites for photocatalytic H₂ production and CO₂ conversion', *Physical chemistry chemical physics : PCCP*, 15.

- Feng, N. *et al.* (2021) 'Efficient and selective photocatalytic CH₄ conversion to CH₃OH with O₂ by controlling overoxidation on TiO₂', *Nature Communications*, 12(1), p. 4652.
- Fujishima, A. and Honda, K. (1972) 'Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode', *Nature*, 238(5358), pp. 37–38.
- Gamage McEvoy, J. and Zhang, Z. (2014) 'Antimicrobial and photocatalytic disinfection mechanisms in silver-modified photocatalysts under dark and light conditions', *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 19, pp. 62–75.
- Ganapathe, L.S. *et al.* (2022) 'Molarity Effects of Fe and NaOH on Synthesis and Characterisation of Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles for Potential Application in Magnetic Hyperthermia Therapy', *Magnetochemistry*.
- Gaya, U.I. and Abdullah, A.H. (2008) 'Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: A review of fundamentals, progress and problems', *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 9(1), pp. 1–12.
- Gegova - Dzhurkova, R. *et al.* (2013) 'Combustion gel method for synthesis of nanosized ZnO/TiO₂ powders', *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 48, pp. 147–153.
- Ghanbari, D. (2021) 'Green Synthesis of C @ Fe₃O₄ @ Ag Nanocomposites : Coating of Silver Nanoparticles on the Carbon Template / Magnetite as a Catalyst for Conversion of Toxic Carbon Monoxide to Carbon Dioxide', *Journal of Nanostructures*, 11(3), pp. 297–304.
- Ghosh, J.P., Achari, G. and Langford, C.H. (2016) 'Design and evaluation of a UV LED Photocatalytic Reactor Using Anodized TiO₂ Nanotubes.', *Water environment research: a research publication of the Water Environment Federation*, 88(8), pp. 785–791.
- Gogate, P.R. and Pandit, A.B. (2004) 'Sonochemical reactors: scale up aspects', *Ultrasonics Sonochemistry*, 11(3), pp. 105–117.
- Gole, J. *et al.* (2015) *Activity of Titania and Zeolite Samples Dosed with Triethylamine*.
- Gondal, M.A. *et al.* (2013). *Nanocomposite and Their Morphological and Optical*

- Properties', *IEEE Photonics Journal*, 5(3), p. 2201908.
- Goyal, S. *et al.* (2018) 'Photoreduction of Carbon Dioxide to Methanol over Copper Based Zeolitic Imidazolate Framework-8: A New Generation Photocatalyst', *Catalysts*.
- Gözüak, F. *et al.* (2009) 'Synthesis and characterization of $\text{Co}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ magnetic nanoparticles via a PEG-assisted route', *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321(14), pp. 2170–2177.
- Graf, R.F. (1999) 'V', in Graf, R.F.B.T.-M.D. of E. (Seventh E. (ed.). Boston: Newnes, pp. 822–840.
- Grätzel, M. (2001) 'Photoelectrochemical cells', *Nature*, 414(6861), pp. 338–344.
- Guan, G., Kida, T. and Yoshida, A. (2003) 'Reduction of carbon dioxide with water under concentrated sunlight using photocatalyst combined with Fe-based catalyst', *Applied Catalysis B: Environmental*, 41(4), pp. 387–396.
- Gunnewiek, R. *et al.* (2020) 'Microwave sintering of a nanostructured low-level additive ZnO-based varistor', *Ceramics International*, 46.
- Gupta, S.M. and Tripathi, M. (2011) 'A review of TiO_2 nanoparticles', *Chinese Science Bulletin*, 56(16), p. 1639.
- Gutierrez, F.V. *et al.* (2024) 'The effect of temperature on the synthesis of magnetite nanoparticles by the coprecipitation method', *Heliyon*, 10(4), p. e25781.
- Habisreutinger, S.N., Schmidt-Mende, L. and Stolarczyk, J.K. (2013) 'Photocatalytic Reduction of CO_2 on TiO_2 and Other Semiconductors', *Angewandte Chemie International Edition*, 52(29), pp. 7372–7408.
- Haghmohammadi, M. *et al.* (2023) 'Synthesis of activated carbon/magnetite nanocatalyst for sono-Fenton-like degradation process of 4-chlorophenol in an ultrasonic reactor and optimization using response surface method', *Journal of Water Process Engineering*, 55(June), p. 104216.
- Halmann, M. (1978) 'Photoelectrochemical reduction of aqueous carbon dioxide on p-type gallium phosphide in liquid junction solar cells', *Nature*, 275(5676), pp. 115–116.

- Hamisu, A., Gaya, U.I. and Abdullah, A.H. (2021) 'Bi-template assisted sol-gel synthesis of photocatalytically-active mesoporous anatase TiO₂ nanoparticles', *Applied Science and Engineering Progress*, 14(3), pp. 313–327.
- Handoko, A., Li, K. and Tang, J. (2013) 'Recent progress in artificial photosynthesis: CO₂ photoreduction to valuable chemicals in a heterogeneous system', *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2, pp. 200–206.
- Hariani, P.L. *et al.* (2023) 'Core-shell Fe₃O₄ / SiO₂ / TiO₂ Magnetic Modified Ag for the Photocatalytic Degradation of Congo Red Dye and Antibacterial Activity', *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 18(2), pp. 315–330.
- Harnsoongnoen, S. (2019) 'Microwave Sensors Based on Coplanar Waveguide Loaded with Split Ring Resonators : A Review', *Applied Science and Engineering Progress*, 12(4), pp. 224–234.
- He, H. *et al.* (2016) 'Synthesis and characterization of robust Ag₂S/Ag₂WO₄ composite microrods with enhanced photocatalytic performance', *Journal of Materials Research*. 2016/08/30, 31(17), pp. 2598–2607.
- He, Z. *et al.* (2014) 'Photocatalytic Reduction of CO₂ in Aqueous Solution on Surface-Fluorinated Anatase TiO₂ Nanosheets with Exposed {001} Facets', *Energy & Fuels*, 28(6), pp. 3982–3993.
- Hernandez, J.S.T. *et al.* (2022) 'Characterization of Fe(3)O(4) Nanoparticles for Applications in Catalytic Activity in the Adsorption/Degradation of Methylene Blue and Esterification.', *Molecules (Basel, Switzerland)*, 27(24).
- Hilgenfeldt, S., Grossmann, S. and Lohse, D. (1999) 'A simple explanation of light emission in sonoluminescence', *Nature*, 398, pp. 402–405.
- Holzwarth, U. and Gibson, N. (2011) 'The Scherrer equation versus the "Debye-Scherrer equation"', *Nature Nanotechnology*, 6(9), p. 534.
- Horikoshi, S. *et al.* (2022) 'Low-temperature microwave-driven thermochemical generation of hydrogen from steam reforming of alcohols over magnetite', *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(56), pp.

23520–23529.

- Hossain, M.R. *et al.* (2023) ‘Overcoming the shock of energy depletion for energy policy? Tracing the missing link between energy depletion, renewable energy development and decarbonization in the USA’, *Energy Policy*, 174, p. 113469.
- Huang, M. *et al.* (2008) ‘Photocatalytic discolorization of methyl orange solution by Pt modified TiO₂ loaded on natural zeolite’, *Dyes and Pigments*, 77(2), pp. 327–334.
- Hurum, D.C. *et al.* (2005) ‘Recombination Pathways in the Degussa P25 Formulation of TiO₂: Surface versus Lattice Mechanisms’, *The Journal of Physical Chemistry B*, 109(2), pp. 977–980.
- Ihara, T. *et al.* (2003) ‘Visible-light-active titanium oxide photocatalyst realized by an oxygen-deficient structure and by nitrogen doping’, *Applied Catalysis B: Environmental*, 42(4), pp. 403–409.
- Indiamart.com (no date) *Lelesil Innovative Systems*.
- Inoue, T. *et al.* (1979) ‘Photoelectrocatalytic reduction of carbon dioxide in aqueous suspensions of semiconductor powders’, *Nature*, 277(5698), pp. 637–638.
- Irie, H., Watanabe, Y. and Hashimoto, K. (2003) ‘Nitrogen-Concentration Dependence on Photocatalytic Activity of TiO₂-xN_x Powders’, *The Journal of Physical Chemistry B*, 107(23), pp. 5483–5486.
- Jagadish, C. and Pearson, S. (2006) *Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures*.
- Jain, R. (2023) ‘Effect of gadolinium doping on the Structural, magnetic, Electrical, Optical, and elastic properties of magnetite nanoparticles’, *Materials Science and Engineering: B*, 296, p. 116631.
- Jan, H. *et al.* (2006) ‘UV/VIS LIGHT-ENHANCED PHOTOCATALYSIS FOR WATER TREATMENT AND PROTECTION’, in, pp. 351–367.
- Janotti, A. and Van de Walle, C.G. (2009) ‘Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor’, *Reports on Progress in Physics*, 72(12), p. 126501.
- Jiang, D. *et al.* (2024) ‘Carbon-coated Fe₃O₄@cotton fiber biomass carbon for the oxygen reduction reaction in air cathode microbial fuel cells’, *Journal*

of Alloys and Compounds, 982, p. 173843.

- Johra, F.T. and Jung, W.-G. (2015) 'RGO-TiO₂-ZnO composites: Synthesis, characterization, and application to photocatalysis', *Applied Catalysis A: General*, 491, pp. 52–57.
- Jubu, P.R. *et al.* (2020) 'Tauc-plot scale and extrapolation effect on bandgap estimation from UV-vis-NIR data – A case study of β -Ga₂O₃', *Journal of Solid State Chemistry*, 290(July), p. 121576.
- Kabir, M. *et al.* (2023) 'Climate change due to increasing concentration of carbon dioxide and its impacts on environment in 21st century; a mini review', *Journal of King Saud University - Science*, 35(5), p. 102693.
- Kalan, R.E. *et al.* (2016) 'P25 titanium dioxide coated magnetic particles: Preparation, characterization and photocatalytic activity', *Applied Catalysis B: Environmental*, 187, pp. 249–258.
- Kamari, S. and Shahbazi, A. (2020) 'Biocompatible Fe₃O₄@SiO₂-NH₂ nanocomposite as a green nanofiller embedded in PES-nanofiltration membrane matrix for salts, heavy metal ion and dye removal: Long-term operation and reusability tests', *Chemosphere*, 243, p. 125282.
- Karimova, A. *et al.* (2024) 'Surface Modification Strategies for Chrysin-Loaded Iron Oxide Nanoparticles to Boost Their Anti-Tumor Efficacy in Human Colon Carcinoma Cells', *Journal of Functional Biomaterials*, 15.
- Katic, V. (2018) 'Assembly of Low-Cost Lab Made Photoreactor for Preparation of Nanomaterials', *Quim Nova*, 41.
- Kentish, S. and Ashokkumar, M. (2011) 'The Physical and Chemical Effects of Ultrasound BT - Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing', in Feng, H., Barbosa-Canovas, G., and Weiss, J. (eds). New York, NY: Springer New York, pp. 1–12.
- Khademalrasool, M. (2016) 'The improvement of photocatalytic processes : Design of photoreactor using high-power LEDs', *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, pp. 382–387.
- Khaki, M. *et al.* (2018) 'Enhanced UV-Visible photocatalytic activity of Cu-doped ZnO/TiO₂ nanoparticles', *Journal of Materials Science: Materials in*

Electronics, 29.

- Khalid, A. *et al.* (2022) 'Effect of Cu Doping on ZnO Nanoparticles as a Photocatalyst for the Removal of Organic Wastewater.', *Bioinorganic chemistry and applications*, 2022, p. 9459886.
- Khalid, N.R. *et al.* (2017) 'Highly visible light responsive metal loaded N/TiO₂ nanoparticles for photocatalytic conversion of CO₂ into methane', *Ceramics International*, 43(9), pp. 6771–6777.
- Khalil, M. *et al.* (2019) 'Photocatalytic conversion of CO₂ using earth-abundant catalysts: A review on mechanism and catalytic performance', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, p. 109246.
- Khan, A. and Tahir, M. (2018) 'Recent advancements in engineering approach towards design of photo-reactors for selective photocatalytic CO₂ reduction to renewable fuels', *Journal of CO₂ Utilization*, 29, pp. 205–239.
- Khan, S.U.M., Kainthla, R.C. and Bockris, J.O.M. (1987) 'The redox potential and the Fermi level in solution', *The Journal of Physical Chemistry*, 91(23), pp. 5974–5977.
- KILIC, A. *et al.* (2022) 'Preparation and spectral studies of boronate ester modified magnetite iron nanoparticles (Fe₃O₄@APTES-B) as a new type of biological agents', *Journal of Molecular Liquids*, 361, p. 119602.
- Kimberly, M., GK, S.P. and GA, O. (2004) 'Direct Methanol Fuel Cells', *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 10(7), pp. 1063–1080.
- Kočí, K. *et al.* (2009) 'Effect of TiO₂ particle size on the photocatalytic reduction of CO₂', *Applied Catalysis B: Environmental*, 89(3), pp. 494–502.
- Kočí, K. *et al.* (2010) 'Effect of silver doping on the TiO₂ for photocatalytic reduction of CO₂', *Applied Catalysis B: Environmental*, 96, pp. 239–244.
- Kočí, K. *et al.* (2011) 'Influence of reactor geometry on the yield of CO₂ photocatalytic reduction', *Catalysis Today*, 176(1), pp. 212–214.
- Kondratenko, E. V *et al.* (2013) 'Status and perspectives of CO₂ conversion into fuels and chemicals by catalytic, photocatalytic and electrocatalytic processes', *Energy & Environmental Science*, 6(11), pp. 3112–3135.

- Koseoglu, Y. *et al.* (2012) 'Low Temperature Hydrothermal Synthesis and Characterization of Mn Doped Cobalt Ferrite Nanoparticles', *Ceramics International*, 38, pp. 3625–3634.
- Kubiak, A. *et al.* (2020) 'Microwave-assisted synthesis of a TiO₂-CuO heterojunction with enhanced photocatalytic activity against tetracycline', *Applied Surface Science*, 520, p. 146344.
- Kumar, B. *et al.* (2013) 'Renewable and metal-free carbon nanofibre catalysts for carbon dioxide reduction', *Nature Communications*, 4(1), p. 2819.
- Kumaravel, V., Bartlett, J. and Pillai, S.C. (2020) 'Photoelectrochemical Conversion of Carbon Dioxide (CO₂) into Fuels and Value-Added Products', *ACS Energy Letters*, 5(2), pp. 486–519.
- Kustomo (2020) 'Uji karakterisasi dan mapping magnetit nanopartikel terlapis asam humat dengan Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX)', *Indonesian Journal of Chemical Science*, 9(3), pp. 149–153.
- Le, C. 'Chip' (2017) 'A General Small-Scale Reactor to Enable Standardization and Acceleration of Photocatalytic Reactions', *ACS central science* [Preprint].
- Lee, C.-W. *et al.* (2014) 'Photocatalytic conversion of CO₂ to hydrocarbons by light-harvesting complex assisted Rh-doped TiO₂ photocatalyst', *Journal of CO₂ Utilization*, 5, pp. 33–40.
- Leighton, T.G. (1995) 'Bubble population phenomena in acoustic cavitation', *Ultrasonics Sonochemistry*, 2(2), pp. S123–S136.
- Lenz, K., Zander, S. and Kuch, W. (2007) 'Magnetic Proximity Effects in Antiferromagnet/Ferromagnet Bilayers: The Impact on the Néel Temperature', *Physical Review Letters*, 98(23), p. 237201.
- Leo, F. *et al.* (2021) 'Capture of carbon dioxide and hydrogen by engineered *Escherichia coli*: hydrogen-dependent CO₂ reduction to formate', *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(14), pp. 5861–5872.
- Lewis, N.S. and Nocera, D.G. (2006) 'Powering the planet: chemical challenges in solar energy utilization.', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(43), pp. 15729–15735.

- Li, F. *et al.* (2016) 'Photocatalytic CO₂ conversion to methanol by Cu₂O/graphene/TNA heterostructure catalyst in a visible-light-driven dual-chamber reactor', *Nano Energy*, 27, pp. 320–329.
- Li, H. *et al.* (2015) 'Intercorrelated Superhybrid of AgBr Supported on Graphitic-C₃N₄-Decorated Nitrogen-Doped Graphene: High Engineering Photocatalytic Activities for Water Purification and CO₂ Reduction', *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 27.
- Li, H. *et al.* (2024) '- Fe₃O₄@SiO₂ study on adsorption of methyl orange on nanoparticles', *Scientific Reports*, pp. 1–16.
- Li, J. and Wu, N. (2015) 'Semiconductor-based photocatalysts and photoelectrochemical cells for solar fuel generation: a review', *Catalysis Science & Technology*, 5(3), pp. 1360–1384.
- Li, K. *et al.* (2014) 'A critical review of CO₂ photoconversion: Catalysts and reactors', *Catalysis Today*, 224, pp. 3–12.
- Li, K., Peng, B. and Peng, T. (2016) 'Recent Advances in Heterogeneous Photocatalytic CO₂ Conversion to Solar Fuels', *ACS Catalysis*, 6(11), pp. 7485–7527.
- Li, L. *et al.* (2012) 'Recent progress of one-dimensional ZnO nanostructured solar cells', *Nano Energy*, 1(1), pp. 91–106.
- Li, L., Zhao, N. and Sun, Y. (2013) 'A review of research progress on CO₂ capture, storage, and utilization in Chinese Academy of Sciences', *Fuel*, 108.
- Li, Q. *et al.* (2017) 'Correlation between particle size/domain structure and magnetic properties of highly crystalline Fe₃O₄ nanoparticles', *Scientific Reports*, 7(1), p. 9894.
- Li, X. *et al.* (2012) 'Adsorption of CO₂ on heterostructure CdS(Bi₂S₃)/TiO₂ nanotube photocatalysts and their photocatalytic activities in the reduction of CO₂ to methanol under visible light irradiation', *Chemical Engineering Journal*, 180, pp. 151–158.
- Li, X. *et al.* (2013) 'Green synthesis and photo-catalytic performances for ZnO-reduced graphene oxide nanocomposites', *Journal of Colloid and Interface Science*, 411, pp. 69–75.
- Li, X. *et al.* (2014) 'Design and fabrication of semiconductor photocatalyst for

- photocatalytic reduction of CO₂ to solar fuel', *Science China Materials*, 57(1), pp. 70–100.
- Li, X. *et al.* (2015) 'Engineering heterogeneous semiconductors for solar water splitting', *Journal of Materials Chemistry A*, 3(6), pp. 2485–2534.
- Li, X., Yu, J. and Jaroniec, M. (2016) 'Hierarchical photocatalysts', *Chemical Society Reviews*, 45(9), pp. 2603–2636.
- Lin, M. *et al.* (2023) 'Engineering interface structures for heterojunction photocatalysts', *Physical Chemistry Chemical Physics*, 25(6), pp. 4388–4407.
- Linsebigler, A.L., Lu, G. and Yates, J.T. (1995) 'Photocatalysis on TiO₂ Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results', *Chemical Reviews*, 95(3), pp. 735–758.
- Liu, H., Zhou, J. and Huang, H. (2015) 'Amine-functionalized TiO₂ nanoparticles for highly selective enrichment of phosphopeptides', *Talanta*, 143, pp. 431–437.
- Liu, J. *et al.* (2016) 'Photocatalytic Reduction of CO₂ Using TiO₂-Graphene Nanocomposites', *Journal of Nanomaterials*. Edited by G. Ayoko, 2016, p. 6012896.
- Liu, X. *et al.* (2015) 'Recyclable and visible light sensitive Ag–AgBr/TiO₂: Surface adsorption and photodegradation of MO', *Applied Surface Science*, 353, pp. 913–923.
- Liu, Y. *et al.* (2012) 'Surface instability of an encapsulated bubble induced by an ultrasonic pressure wave', *Journal of Fluid Mechanics*. 2011/12/06, 691, pp. 315–340.
- Ljubas, D. and Gabelica, I. (2021) 'Rapid Microwave-Assisted Synthesis of Fe₃O₄/SiO₂/TiO₂ Core-2-Layer-Shell Nanocomposite for Photocatalytic Degradation of Ciprofloxacin', *Catalysts* [Preprint].
- Low, J., Cheng, B. and Yu, J. (2016) 'Surface modification and enhanced photocatalytic CO₂ reduction performance of TiO₂: a review', *Applied Surface Science*, 392.
- Low, J., Cheng, B. and Yu, J. (2017) 'Surface modification and enhanced photocatalytic CO₂ reduction performance of TiO₂: a review', *Applied*

Surface Science, 392, pp. 658–686.

- Luo, C. *et al.* (2023) ‘Microwave-accelerated hydrolysis for hydrogen production over a cobalt-loaded multi-walled carbon nanotube-magnetite composite catalyst’, *Applied Energy*, 333, p. 120538.
- Luo, D. *et al.* (2009) ‘Characterization and DFT Research of Nd/TiO₂: Photocatalyst for Synthesis of Methanol from CO₂ and H₂O’, *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 223(12), pp. 1465–1476.
- Luo, N. *et al.* (2009) ‘Photo-catalytic conversion of oxygenated hydrocarbons to hydrogen over heteroatom-doped TiO₂ catalysts’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(1), pp. 125–129.
- M. Bouchy (2003) ‘Photocatalytic reactors’, *International Journal of photoenergy* [Preprint].
- Manikandan, A. *et al.* (2014) ‘Structural, optical and magnetic properties of Fe₃O₄ nanoparticles prepared by a facile microwave combustion method’, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(4), pp. 2077–2085.
- Mankidy, B.D., Joseph, B. and Gupta, V.K. (2013) ‘Photo-conversion of CO₂ using titanium dioxide: enhancements by plasmonic and co-catalytic nanoparticles’, *Nanotechnology*, 24(40), p. 405402.
- Marc Alvarado (2016) *Methanol*.
- Matthews, R.W. and McEvoy, S.R. (1992) ‘Photocatalytic degradation of phenol in the presence of near-UV illuminated titanium dioxide’, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 64(2), pp. 231–246.
- Mccluskey, M. and Jokela, S. (2009) ‘Defects in ZnO’, *Journal of Applied Physics*, 106, p. 71101.
- Memming, R. (2015) ‘Principles of Semiconductor Physics’, in, pp. 1–22.
- Mercer, B. (2001) ‘3 - Wire types and preparation’, in Mercer, B.B.T.-N.I.C.W.G. (Second E. (ed.). Oxford: Newnes, pp. 17–25.
- Mikrajuddin, A. *et al.* (2008) ‘Review: Sintesis Nanomaterial’, *Jurnal Nanosains & Nanoteknologi* [Preprint].
- Mino, L., Spoto, G. and Ferrari, A.M. (2014) ‘CO₂ Capture by TiO₂ Anatase Surfaces: A Combined DFT and FTIR Study’, *The Journal of Physical*

Chemistry C, 118(43), pp. 25016–25026.

- Mohapatra, J. *et al.* (2015) ‘Iron oxide nanorods as high-performance magnetic resonance imaging contrast agents’, *Nanoscale*, 7(February), pp. 9174–9184.
- Nam, S. and Tratnyek, P.G. (2000) ‘Reduction of azo dyes with zero-valent iron’, *Water Research*, 34(6), pp. 1837–1845.
- Naseri, M.G. *et al.* (2011) ‘Synthesis and characterization of zinc ferrite nanoparticles by a thermal treatment method’, *Solid State Communications*, 151(14), pp. 1031–1035.
- Natarajan, T., Bajaj, H. and Tayade, R. (2010) *Novel UV-LED Photocatalytic Reactor Setup for Degradation of Methylene Blue Dye Using Titanium Dioxide Nanotube*.
- Neppiras, E.A. (1980) ‘Acoustic cavitation’, *Physics Reports*, 61(3), pp. 159–251.
- Nie, J. *et al.* (2019) ‘Effect of TiO₂ doping on densification and mechanical properties of hydroxyapatite by microwave sintering’, *Ceramics International*, 45.
- Nikmah, A., Taufiq, A. and Hidayat, A. (2019) ‘Synthesis and Characterization of Fe₃O₄/SiO₂ nanocomposites’, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 276(1), p. 12046.
- Nkurikiyimfura, I. *et al.* (2020) ‘Temperature-dependent magnetic properties of magnetite nanoparticles synthesized via coprecipitation method’, *Journal of Alloys and Compounds*, 846.
- Nunes, L.J.R. (2023) ‘The Rising Threat of Atmospheric CO₂: A Review on the Causes, Impacts, and Mitigation Strategies’, *Environments*.
- Ohtani, B. (2014) ‘Revisiting the fundamental physical chemistry in heterogeneous photocatalysis: its thermodynamics and kinetics’, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16(5), pp. 1788–1797.
- Ola, O. *et al.* (2012) ‘Performance comparison of CO₂ conversion in slurry and monolith photoreactors using Pd and Rh-TiO₂ catalyst under ultraviolet irradiation’, *Applied Catalysis B: Environmental*, 126, pp. 172–179.
- Ola, O. and Maroto-Valer, M.M. (2015) ‘Review of material design and reactor engineering on TiO₂ photocatalysis for CO₂ reduction’, *Journal of*

Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 24, pp. 16–42.

- Ollis Al-Ekabi, H. (1993) ‘Photocatalytic purification and treatment of water and air: proceedings of the 1st international conference on TiO₂ photocatalytic purification and treatment of water and air, London, Ontario, Canada, 8-13 November, 1992’, in. Amsterdam: Elsevier.
- Ozer, M.S. and Eroglu, Z. (2023) ‘Black Phosphorus Quantum Dots/Carbon Nitride-Reduced Graphene Oxide Ternary Heterojunction as a Multifunctional Metal-Free Photocatalyst for Photooxidation Reactions’, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11.
- Pan, H. (2016) ‘Principles on design and fabrication of nanomaterials as photocatalysts for water-splitting’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57(C), pp. 584–601.
- Pankhurst, Q. *et al.* (2003) ‘TOPICAL REVIEW: Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine’, *Journal of Physics D-applied Physics - J PHYS-D-APPL PHYS*, 36.
- Pedefferri, P. (2018) ‘Pourbaix Diagrams BT - Corrosion Science and Engineering’, in Pedefferri, P. (ed.). Cham: Springer International Publishing, pp. 57–72.
- Peterson, A.A. and Nørskov, J.K. (2012) ‘Activity Descriptors for CO₂ Electroreduction to Methane on Transition-Metal Catalysts’, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 3(2), pp. 251–258.
- Pfennig, A. (1994) ‘189. Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 4th Ed., 9. J. J. Kroschwitz und M. Howe-Grant, John Wiley & Sons, New York 1994. 1112 S., zahlr. Abb. und Tab., geb., £ 185,00.’, *Chemie Ingenieur Technik*, 66(9), p. 1274.
- Photochemical Reactor* (no date).
- Polla, M.B. *et al.* (2023) ‘Low-temperature sol–gel synthesis of magnetite superparamagnetic nanoparticles: Influence of heat treatment and citrate–nitrate equivalence ratio’, *Ceramics International*, 49(5), pp. 7322–7332.
- Pourbaix, M.J.N. (1974) ‘Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous

Solutions', in.

PRADIPTA, A.R. (2019) *SINTESIS METANOL MELALUI REAKSI REDUKSI FOTOKATALITIK CO₂ TERKATALISIS NANOKOMPOSIT TiO₂ TERMODIFIKASI Fe₃O₄ DAN Fe₃O₄/SiO₂*. Universitas Gadjah Mada.

Prasetyowati, R. *et al.* (2021) 'Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel Magnetit (Fe₃O₄) Berbasis Pasir Besi Pantai Glagah Kulon Progo dengan Metode Kopersipitasi pada Berbagai Variasi Konsentrasi NH₄OH', *Jurnal Sains Dasar*, 10, pp. 57–61.

Qiao, X. *et al.* (2021) 'Preparation and properties of dodecylamine microemulsion for the flotation of quartz and magnetite', *Minerals Engineering*, 164(February). doi:10.1016/j.mineng.2021.106821.

Qin, G. *et al.* (2013) 'Photocatalytic reduction of carbon dioxide to formic acid, formaldehyde, and methanol using dye-sensitized TiO₂ film', *Applied Catalysis B: Environmental*, 129, pp. 599–605.

R., A. *et al.* (2001) 'Visible-Light Photocatalysis in Nitrogen-Doped Titanium Oxides', *Science*, 293(5528), pp. 269–271.

Rahmayanti, M. (2020) 'Synthesis of Magnetite Nanoparticles Using The Reverse Co-precipitation Method With NH₄OH as Precipitating Agent and Its Stability Test at Various pH', *Natural Science: Journal of Science and Technology*, 9, pp. 54–58.

Ramanda, Y. *et al.* (2017) 'Carboxymethyl Cellulose Photocracking by Magnetic Recoverable Photocatalyst to Produce Biofuel in Ambient Condition', *Chimica et Natura Acta*, 5, pp. 90–94.

Ramanda, Y., Nuryono, N. and Kunarti, E. (2019) 'Synthesis and Application of Fe₃O₄/SiO₂/TiO₂ Nanocomposite as Photocatalyst in CO₂ Indirect Reduction to Produce Methanol', *Indonesian Journal of Chemistry*, 19, pp. 827–834.

Renz, C. (2004) 'Lichtreaktionen der Oxyde des Titans, Cers und der Erdsäuren', *Helvetica Chimica Acta*, 4, pp. 961–968.

Rho, W.-Y. *et al.* (2015) 'Recent Progress in Dye-Sensitized Solar Cells for Improving Efficiency: TiO₂ Nanotube Arrays in Active Layer', *Journal*

of Nanomaterials. Edited by N.K. Allam, 2015, p. 247689.

- RICHARDSON, J.F. and COULSON, J.M. (1993) 'Preface', in SINNOTT, R.K.B.T.-C. and R.C.E. (Second E. (ed.) *Chemical Engineering Technical Series*. Amsterdam: Pergamon, p. viii.
- Robinson, A.J. (2004) 'Novel flat panel reactor for monitoring photodegradation', *Materials science and technology*, 20.
- Rupa, A., Duraiswami, D. and Sivakumar, T. (2009) 'Titania and Noble Metals Deposited Titania Catalysts in the Photodegradation of Tartazine', *Catalysis Letters*, 132, pp. 259–267. doi:10.1007/s10562-009-0108-7.
- Ruthiya, K.C. (2005) 'Mass Transfer and Hydrodynamics in Catalytic Slurry Reactors'.
- S., S.K. (1990) 'Sonochemistry', *Science*, 247(4949), pp. 1439–1445.
- Sadegh, F., Wongniramaikul, W. and Apiratikul, R. (2024) 'Environmental Technology & Innovation Magnetically recyclable Fe₃O₄ – CuS @ SiO₂ catalyst for synergistic adsorption and photodegradation of methyl orange in wastewater under visible light', *Environmental Technology & Innovation*, 33(January).
- Saito, M. *et al.* (1995) 'Development of Cu/ZnO-based high performance catalysts for methanol synthesis by CO₂ hydrogenation', *Energy Conversion and Management*, 36(6–9), pp. 577–580.
- Samsudin, E.M. *et al.* (2016) 'Synergetic effects in novel hydrogenated F-doped TiO₂ photocatalysts', *Applied Surface Science*, 370, pp. 380–393.
- San, N. *et al.* (2002) 'Photocatalytic degradation of 4-nitrophenol in aqueous TiO₂ suspensions: Theoretical prediction of the intermediates', *Journal of Photochemistry and Photobiology A Chemistry*, 146 (), pp. 189–197.
- Schneider, J. *et al.* (2014) 'Understanding TiO₂ Photocatalysis: Mechanisms and Materials', *Chemical Reviews*, 114(19), pp. 9919–9986.
- Sellaro, M. *et al.* (2016) 'CO₂ conversion in a photocatalytic continuous membrane reactor', *RSC Advances*, 6(71), pp. 67418–67427.
- Selvi, T. and Sivakumar, T. (2017) 'Photocatalytic Reduction of Carbon Dioxide by Using Bare and Copper Oxide Impregnated Nano Titania Catalysts', *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 17, pp. 313–322.

- Serpone, N. (1997) 'Relative photonic efficiencies and quantum yields in heterogeneous photocatalysis', *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 104(1), pp. 1–12.
- Servio, P. and Englezos, P. (2001) 'Effect of temperature and pressure on the solubility of carbon dioxide in water in the presence of gas hydrate', *Fluid Phase Equilibria*, 190(1), pp. 127–134.
- Shan, A.Y., Ghazi, T.I.M. and Rashid, S.A. (2010) 'Immobilisation of titanium dioxide onto supporting materials in heterogeneous photocatalysis: A review', *Applied Catalysis A: General*, 389(1), pp. 1–8.
- Sharma, A. and Lee, B.-K. (2017) 'Photocatalytic reduction of carbon dioxide to methanol using nickel-loaded TiO₂ supported on activated carbon fiber', *Catalysis Today*, 298, pp. 158–167.
- Sharma, S. *et al.* (2023) 'Chapter 8 - Microwave-assisted organic synthesis using nanoparticles', in Bhunia, S. *et al.* (eds) *Advances in Green and Sustainable Chemistry*. Elsevier, pp. 241–253.
- Shehzad, N. *et al.* (2018) 'A critical review on TiO₂ based photocatalytic CO₂ reduction system: Strategies to improve efficiency', *Journal of CO₂ Utilization*, 26, pp. 98–122.
- Silva, J.M.M. *et al.* (2023) 'Obtention of magnetite nanoparticles via the hydrothermal method and effect of synthesis parameters', *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 580(June).
- Simagina, V.I. *et al.* (2019) 'Study of Copper – Iron Mixed Oxide with Cubic Spinel Structure, Synthesized by the Combustion Method', 92(1), pp. 20–30.
- Slamet, S., Syakur, R. and Danumulyo, W. (2010) 'Photocatalytic Treatment of Heavy Metal Waste Cr(VI) with TiO₂ Photocatalyst', *Makara Journal of Technology; Vol 7, No 1 (2003)* [Preprint].
- Spence, J. (2012) *Renewable energy in the Australian red meat processing industry & the viability of paunch as a biofuel*.
- Srinivasan, S., Wade, J. and Stefanakos, E. (2006) 'Synthesis and Characterization of Photocatalytic TiO₂-ZnFe₂O₄ Nanoparticles', *Journal of Nanomaterials*, 2006, p. 15.
- Steffen, W. *et al.* (2015) 'Planetary boundaries: Guiding human development on a

- changing planet', *Science*, 347(6223), p. 1259855.
- Sun, J. *et al.* (2012) 'Bioinspired hollow semiconductor nanospheres as photosynthetic nanoparticles', *Nature Communications*, 3(1), p. 1139.
- Suslick, K.S., McNamara, W.B. and Didenko, Y. (1999) 'Hot Spot Conditions during Multi-Bubble Cavitation BT - Sonochemistry and Sonoluminescence', in Crum, L.A. *et al.* (eds). Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 191–204.
- Sutisna (2017) 'Prototype of a flat-panel photoreactor using TiO₂ nanoparticles coated on transparent granules for the degradation of Methylene Blue under solar illumination', *Sustainable Environment Research* [Preprint].
- Tahir, B. *et al.* (2019) 'Fabrication of SWCNTs Modified TiO₂ Nanocomposite towards Enhanced Photocatalytic Carbon Dioxide Reduction to Fuels under Visible Light', *Chemical Engineering Transactions*, 72, pp. 343-348 SE-Research Articles.
- Tahir, B., Tahir, M. and Amin, N.S. (2015a) 'Gold–indium modified TiO₂ nanocatalysts for photocatalytic CO₂ reduction with H₂ as reductant in a monolith photoreactor', *Applied Surface Science*, 338, pp. 1–14.
- Tahir, B., Tahir, M. and Amin, N.S. (2015b) 'Performance analysis of monolith photoreactor for CO₂ reduction with H₂', *Energy Conversion and Management*, 90, pp. 272–281.
- Tahir, M. and Amin, N.A.S. (2017) 'Photo-induced CO₂ reduction by hydrogen for selective CO evolution in a dynamic monolith photoreactor loaded with Ag-modified TiO₂ nanocatalyst', *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(23), pp. 15507–15522.
- Tahir, M. and Amin, N.S. (2013a) 'Advances in visible light responsive titanium oxide-based photocatalysts for CO₂ conversion to hydrocarbon fuels', *Energy Conversion and Management*, 76, pp. 194–214.
- Tahir, M. and Amin, N.S. (2013b) 'Photocatalytic CO₂ reduction with H₂O vapors using montmorillonite/TiO₂ supported microchannel monolith photoreactor', *Chemical Engineering Journal*, 230, pp. 314–327.
- Tan, S.S., Zou, L. and Hu, E. (2006) 'Photocatalytic reduction of carbon dioxide

into gaseous hydrocarbon using TiO₂ pellets', *Catalysis Today*, 115(1–4), pp. 269–273.

- Tanaka, A., Hashimoto, K. and Kominami, H. (2014) 'Visible-Light-Induced Hydrogen and Oxygen Formation over Pt/Au/WO₃ Photocatalyst Utilizing Two Types of Photoabsorption Due to Surface Plasmon Resonance and Band-Gap Excitation', *Journal of the American Chemical Society*, 136(2), pp. 586–589.
- Tanaka, K., Capule, M.F. V and Hisanaga, T. (1991) 'Effect of crystallinity of TiO₂ on its photocatalytic action', *Chemical Physics Letters*, 187(1), pp. 73–76.
- Tang, Z., Wang, Y. and Peng, Z. (2019) 'Mechanical performance and in-vitro biological behaviors of boronized Ti₆Al₄V/HA composites synthesized by microwave sintering', *Ceramics International*, 45.
- Tao, J. *et al.* (2016) 'Enhanced optical and photocatalytic properties of Ag quantum dots-sensitized nanostructured TiO₂/ZnO heterojunctions', *Journal of Alloys and Compounds*, 688, pp. 605–612.
- Thakkar, H. *et al.* (2020) 'Design, Assembly and Testing of HVAC Electrical Panel', *International Journal of Engineering Research and*, V9.
- Thangavel, S. *et al.* (2015) 'Graphdiyne–ZnO Nanohybrids as an Advanced Photocatalytic Material', *The Journal of Physical Chemistry C*, 119(38), pp. 22057–22065.
- Thompson, W., Sanchez Fernandez, E. and Maroto-Valer, M. (2020) 'Review and Analysis of CO₂ Photoreduction Kinetics', *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, XXXX.
- Tong, H. *et al.* (2011) 'Electronic coupling assembly of semiconductor nanocrystals: Self-narrowed band gap to promise solar energy utilization', *Energy Environ. Sci.*, 4, pp. 1684–1689.
- Trisnaliani, L., Bustan, M.D. and Haryati, S. (2024) 'Synthesis and Characterization of Nanoscale Fe₃O₄ by in situ Sonochemical Assisted Chemical Co-Precipitation', *Journal of Engineering Research*, 4(16).
- Truong, Q.D. *et al.* (2017) 'Controlling the shape of anatase nanocrystals for enhanced photocatalytic reduction of CO₂ to methanol', *New Journal*

of Chemistry, 41(13), pp. 5660–5668.

- Tsai, C.-W. *et al.* (2011) ‘Ni@NiO Core–Shell Structure-Modified Nitrogen-Doped InTaO₄ for Solar-Driven Highly Efficient CO₂ Reduction to Methanol’, *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(20), pp. 10180–10186.
- Tseng, I.-H., Chang, W.-C. and Wu, J.C.S. (2002) ‘Photoreduction of CO₂ using sol–gel derived titania and titania-supported copper catalysts’, *Applied Catalysis B: Environmental*, 37(1), pp. 37–48.
- Tu, W. *et al.* (2017) ‘Construction of unique two-dimensional MoS₂–TiO₂ hybrid nanojunctions: MoS₂ as a promising cost-effective cocatalyst toward improved photocatalytic reduction of CO₂ to methanol’, *Nanoscale*, 9(26), pp. 9065–9070.
- Tu, W., Zhou, Y. and Zou, Z. (2014) ‘Photocatalytic Conversion of CO₂ into Renewable Hydrocarbon Fuels: State-of-the-Art Accomplishment, Challenges, and Prospects’, *Advanced Materials*, 26(27), pp. 4607–4626.
- Uddin, M.T. *et al.* (2012) ‘Nanostructured SnO₂–ZnO Heterojunction Photocatalysts Showing Enhanced Photocatalytic Activity for the Degradation of Organic Dyes’, *Inorganic Chemistry*, 51(14), pp. 7764–7773.
- Volanti, D.P. *et al.* (2015) ‘Monitoring a CuO gas sensor at work: an advanced in situ X-ray absorption spectroscopy study’, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17(28), pp. 18761–18767.
- Volatier, M. *et al.* (2010) ‘Extremely high aspect ratio GaAs and GaAs/AlGaAs nanowaveguides fabricated using chlorine ICP etching with N₂-promoted passivation’, *Nanotechnology*, 21, p. 134014.
- Vyas, V., Lau, V. and Lotsch, B. (2016) ‘Soft Photocatalysis: Organic Polymers for Solar Fuel Production’, *Chemistry of Materials*, 28.
- Wang, C. *et al.* (2009) ‘Visible Light Photoreduction of CO₂ Using CdSe/Pt/TiO₂ Heterostructured Catalysts’, *Journal of Physical Chemistry Letters*, 1.
- Wang, L. *et al.* (2014) ‘Ultrasonic-assisted synthesis of amorphous Fe₃O₄ with a high specific surface area and improved capacitance for

- supercapacitor', *Powder Technology*, 256, pp. 499–505.
- Wang, Q. *et al.* (2012) 'Novel synthesis of ZnPc/TiO₂ composite particles and carbon dioxide photo-catalytic reduction efficiency study under simulated solar radiation conditions', *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 409, pp. 118–125.
- Wang, W.-Y. and Ku, Y. (2006) 'Photocatalytic degradation of Reactive Red 22 in aqueous solution by UV-LED radiation.', *Water research*, 40(12), pp. 2249–2258.
- Wang, X.-K. *et al.* (2012) 'Sonochemical synthesis and characterization of Cl-doped TiO₂ and its application in the photodegradation of phthalate ester under visible light irradiation', *Chemical Engineering Journal*, 189–190, pp. 288–294.
- Wang, Yuzheng *et al.* (2016) 'Doping TiO₂ with boron or/and cerium elements: Effects on photocatalytic antimicrobial activity', *Vacuum*, 131, pp. 58–64.
- Wang, Yangang *et al.* (2016) 'Facile One-Step Synthesis of Hybrid Graphitic Carbon Nitride and Carbon Composites as High-Performance Catalysts for CO₂ Photocatalytic Conversion', *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(27), pp. 17212–17219.
- Wang, Yuan *et al.* (2016) 'Functionalization of ZnO aggregate films via iodine-doping and TiO₂ decorating for enhanced visible-light-driven photocatalytic activity and stability', *RSC Advances*, 6(29), pp. 24430–24437.
- Wang, Y. *et al.* (2017) 'Photocatalytic reduction of CO₂ in isopropanol on Bi₂S₃ quantum dots/TiO₂ nanosheets with exposed {001} facets', *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 17, pp. 1863–1869.
- Wardhani, S., Mardiansyah, H.A. and Purwonugroho, D. (2023) 'Fe₃O₄-SiO₂-Alginate Photocatalyst for Textile Dyes Waste Degradation', *Science and Technology Indonesia*, 8(1), pp. 2–9.
- Wattanawikkam, C. and Pecharapa, W. (2015) 'Synthesis and Characterization of Zn-Doped TiO₂ Nanoparticles via Sonochemical Method', *Integrated Ferroelectrics*, 165, pp. 167–175.

- Wei, Y. *et al.* (2012) 'Synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles and their magnetic properties', *Procedia Engineering*, 27(December), pp. 632–637.
- Wen, Y. *et al.* (2015) 'Direct synthesis of dimethyl carbonate and propylene glycol using potassium bicarbonate as catalyst in supercritical CO₂', *Polish Journal of Chemical Technology*, 17.
- Wu, J. *et al.* (2017) 'CO(2) Reduction: From the Electrochemical to Photochemical Approach', *Advanced science (Weinheim, Baden-Wurttemberg, Germany)*, 4(11), p. 1700194.
- Wu, J. and Lin, H.-M. (2005) 'Photo reduction of CO₂ to methanol via TiO₂ photocatalyst', *Int. J. Photoenergy.*, 7.
- Xiaobo, C. *et al.* (2011) 'Increasing Solar Absorption for Photocatalysis with Black Hydrogenated Titanium Dioxide Nanocrystals', *Science*, 331(6018), pp. 746–750.
- Xiong, L.-B. *et al.* (2012). *Journal of Nanomaterials*.
- Xiong, Z. *et al.* (2017) 'Photocatalytic CO₂ reduction over V and W codoped TiO₂ catalyst in an internal-illuminated honeycomb photoreactor under simulated sunlight irradiation', *Applied Catalysis B: Environmental*, 219, pp. 412–424.
- Xu, Y. *et al.* (2013) 'The CNT modified white C₃N₄ composite photocatalyst with enhanced visible-light response photoactivity', *Dalton Transactions*, 42(21), pp. 7604–7613.
- Xue, C. *et al.* (2013) 'High photocatalytic activity of Fe₃O₄-SiO₂-TiO₂ functional particles with core-shell structure', *Journal of Nanomaterials*, 2013.
- Yahaya, A.H. Bin, Gondal, M.A. and Hameed, A. (2004) 'Selective laser enhanced photocatalytic conversion of CO₂ into methanol', *Chemical Physics Letters*, 400, pp. 206–212.
- Yao, H.-L. *et al.* (2019) 'Structure, mechanical and bioactive properties of nanostructured hydroxyapatite/titania composites prepared by microwave sintering', *Materials Chemistry and Physics*, 241, p. 122340.
- Yazdani, F. and Seddigh, M. (2016) 'Magnetite nanoparticles synthesized by co-precipitation method: The effects of various iron anions on

specifications', *Materials Chemistry and Physics*, 184.

- Yi, Y. *et al.* (2021) 'Selective Oxidation of CH₄ to CH₃OH through Plasma Catalysis: Insights from Catalyst Characterization and Chemical kinetics modelling', *Applied Catalysis B: Environmental*, 296, p. 120384.
- Yu, Z. *et al.* (2015) 'Photocatalytic Property of Nanostructured S Doped TiO₂ Films Prepared by the Micro Plasma Method', *Xiyou Jinshu Cailiao Yu Gongcheng/Rare Metal Materials and Engineering*, 44, pp. 1629–1632.
- Yuan, Y. *et al.* (2015) 'Nature of the band gap of halide perovskites ABX₃ (A = CH₃NH₃⁺, Cs; B = Sn, Pb; X = Cl, Br, I): First-principles calculations', *Chinese Physics B*, 24(11), p. 116302.
- Yusmaniar *et al.* (2021) 'Microwave absorbing characteristics of Fe₃O₄@SiO₂ core – shell polyaniline-based composites', *Materials Research Express*, 8(4), p. 46101.
- Zalani, N., Kaleji, B. and Mazinani, B. (2019) 'Synthesis and characterisation of the mesoporous ZnO-TiO₂ nanocomposite; Taguchi optimisation and photocatalytic methylene blue degradation under visible light', *Materials Technology*, 35, pp. 1–9.
- Zeinali Sehrig, F. *et al.* (2016) 'Magnetic nanoparticles as potential candidates for biomedical and biological applications', *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 44(3), pp. 918–927.
- Zha, R., Nadimicherla, R. and Guo, X. (2015) 'Ultraviolet photocatalytic degradation of methyl orange by nanostructured TiO₂/ZnO heterojunctions', *Journal of Materials Chemistry A*, 3(12), pp. 6565–6574.
- Zhang, B. *et al.* (2010) 'Investigation on the formation mechanism of p-type Li–N dual-doped ZnO', *Applied Physics Letters*, 97, p. 222101.
- Zhang, J., Cong, Y. and Anpo, M. (2010) 'Chemical Methods for the Preparation of Multifunctional Photocatalysts BT - Environmentally Benign Photocatalysts: Applications of Titanium Oxide-based Materials', in Anpo, M. and Kamat, P. V (eds). New York, NY: Springer New York, pp. 7–33.

- Zhang, K.-X. *et al.* (2018) 'Ultrafast nonlinear optical properties and carrier dynamics of silver nanoparticle-decorated ZnO nanowires', *RSC Advances*, 8, pp. 26133–26143.
- Zhang, Q. *et al.* (2014) 'Photocatalytic reduction of carbon dioxide to methanol and formic acid by graphene-TiO₂', *Journal of the Air & Waste Management Association*, 64(5), pp. 578–585.
- Zhang, Y.X. *et al.* (2011) 'Ultra high adsorption capacity of fried egg jellyfish-like γ -AlOOH(Boehmite)@SiO₂/Fe₃O₄ porous magnetic microspheres for aqueous Pb(II) removal', *Journal of Materials Chemistry*, 21(41), pp. 16550–16557.
- Zhao, Y. *et al.* (2017) 'Optical properties of Li, Na, and K doped ZnO investigated by first principles', in, pp. 1113–1117.
- Zheng, Y. *et al.* (2015) 'Graphitic Carbon Nitride Polymers toward Sustainable Photoredox Catalysis', *Angewandte Chemie International Edition*, 54(44), pp. 12868–12884.
- Zhu, S. *et al.* (2016) 'Ultrathin nanosheets of molecular sieve SAPO-5: A new photocatalyst for efficient photocatalytic reduction of CO₂ with H₂O to methane', *Applied Catalysis B: Environmental*, 187, pp. 11–18.

