

TESIS
DESULFURISASI MINYAK DIESEL DIBAWAH
IRADIASI *RED VISIBLE LIGHT* BERBANTUAN
KATALIS TIMAH PADA PROSES *LOOPING*
CONTINUE

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan
Gelar Magister Teknik (M.T.) Pada Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya



DINO DEWANTARA
03012682327005

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK KIMIA
JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2024

HALAMAN PENGESAHAN

DESULFURISASI MINYAK DIESEL DIBAWAH
IRADIASI *RED VISIBLE LIGHT* BERBANTUAN
KATALIS TIMAH PADA PROSES *LOOPING*
CONTINUE

TESIS

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan
Gelara Magister Teknik (M.T.) Pada Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya

Palembang, 1 Januari 2025

Menyetujui

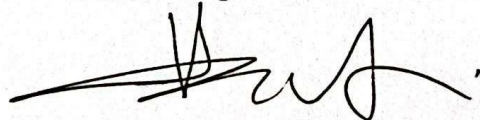
Pembimbing I



Prof. Dr. Ir. H. M. Djoni Bustan, M.Eng, IPU

NIP. 195603071981031010

Pembimbing II



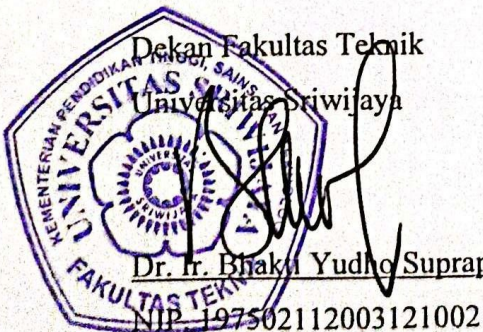
Prof. Dr. Ir. Hj. Sri Haryati, DEA, IPU

NIP. 195610241981032001

Mengetahui,

✓ Ketua Jurusan Teknik Kimia

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya



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

NIP. 197502112003121002



Dr. Tuti Indah Sari, S.T., M.T

NIP. 197502012000122001

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa Laporan Tesis ini dengan judul “Desulfurisasi Minyak Diesel Dibawah Iradiasi *Red Visible Light* Berbantuan Katalis Timah Pada Proses *Looping Continue*” telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Program Studi Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada 27 Desember 2024.

Palembang, 30 Desember 2024

Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah berupa Laporan Tesis

Ketua:

1. Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Said, M.Sc
NIP. 196108121987031003

()

Anggota:


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

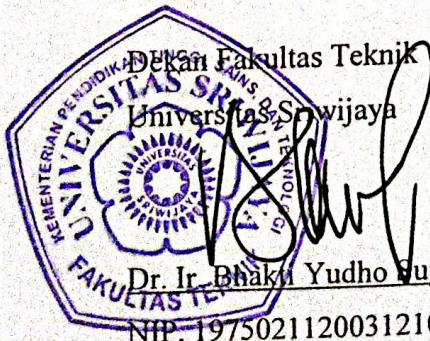
()

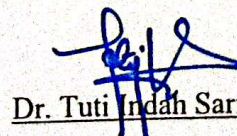
2. Dr. Selpiana, S.T., M.T
NIP. 197809192003122001

()

Mengetahui,

 Ketua Jurusan Teknik Kimia




Dr. Tuti Indah Sari, S.T., M.T
NIP. 197502012000122001

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Dino Dewantara

NIM : 03012682327005

Judul : Desulfurisasi Minyak Diesel Dibawah Iradiasi *Red Visible Light*
Berbantuan Katalis Timah Pada Proses *Looping Continue*

Menyatakan bahwa Laporan Tesis saya merupakan hasil karya sendiri didampingi tim pembimbing dan bukan hasil penjiplakan/plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam Laporan Tesis 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, 1 Januari 2025

Yang Membuat Pernyataan



Dino Dewantara

NIM. 03012682327005

RINGKASAN

DESULFURISASI MINYAK DIESEL DIBAWAH IRADIASI RED VISIBLE LIGHT BERBANTUAN KATALIS TIMAH PADA PROSES LOOPING CONTINUE

Karya tulis ilmiah berupa Tesis, 1 Januari 2025

Dino Dewantara, Dibimbing oleh Prof. Dr. Ir. H. M. Djoni Bustan, M.Eng., IPU dan Prof. Dr. Ir. Hj. Sri Haryati, DEA., IPU.

Diesel Oil Desulfurization Under Red Visible Light Irradiation Assisted by Tin Catalyst in Continuous Looping Process

xix + 225 Halaman, 7 Tabel, 74 Gambar

RINGKASAN

Proses desulfurisasi konvensional membutuhkan bahan dalam jumlah besar. Hal ini menghadirkan tantangan yang signifikan untuk dikendalikan, yang keduanya berkontribusi pada biaya produksi yang lebih tinggi untuk bahan bakar diesel bersulfur rendah. Pemanfaatan sinar tampak merah, bentuk energi yang bersih dan ramah lingkungan yang dapat digunakan dalam kondisi operasi rendah, merupakan pengganti yang memadai untuk proses desulfurisasi minyak diesel yang menjanjikan. Potensi katalis *metal* untuk meningkatkan sifat sinar tampak merah dalam proses desulfurisasi telah diteliti. Proses desulfurisasi sinar tampak merah menunjukkan bahwa minyak diesel dapat dikurangi kandungan sulfurnya dalam kondisi operasi lingkungan. Hasil terbaik dicapai pada tinggi katalis 6 cm dan waktu iradiasi 25 jam dengan kandungan sulfur paling rendah yakni 737 ppm dari 1300 ppm. *Metal* timah secara signifikan meningkatkan energi foton, frekuensi, panjang gelombang, dan energi kinetik minimum cahaya tampak merah.

Kata Kunci: proses desulfurisasi, sinar tampak merah, pengurangan sulfur, metal timah

Kepustakaan: 464 (1901-2024)

SUMMARY

DIESEL OIL DESULFURIZATION UNDER RED VISIBLE LIGHT IRRADIATION ASSISTED BY TIN CATALYST IN CONTINUOUS LOOPING PROCESS

Scientific paper in the form of Thesis, Januari 1st, 2025

Dino Dewantara, Supervised by Prof. Dr. Ir. H. M. Djoni Bustan, M.Eng., IPU and Prof. Dr. Ir. Hj. Sri Haryati, DEA., IPU.

Desulfurisasi Minyak Diesel Dibawah Iradiasi Red Visible Light Berbantuan Katalis Timah Pada Proses Looping Continue

xix + 225 Pages, 7 Tables, 74 Pictures

SUMMARY

Conventional desulfurization processes require large quantities of materials. This presents significant challenges to control, both of which contribute to higher production costs for low-sulfur diesel fuel. Utilization of red visible light, a clean and environmentally friendly form of energy that can be used under low operating conditions, is a promising adequate substitute for diesel oil desulfurization processes. The potential of metal catalysts to improve the properties of red visible light in the desulfurization process has been investigated. The red visible light desulfurization process shows that diesel oil can be reduced in sulfur content under ambient operating conditions. The best results were achieved at a catalyst height of 6 cm and an irradiation time of 25 h with the lowest sulfur content of 737 ppm from 1300 ppm. Tin metal significantly increased the photon energy, frequency, wavelength, and minimum kinetic energy of red visible light.

Keywords: desulfurization process, red visible light, sulfur reduction, tin metal

Citations: 464 (1901-2024)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa berkat Rahmat dan Hidayah-Nya sehingga tesis dengan judul “Desulfurisasi Minyak Diesel Dibawah Iradiasi *Red visible light* Berbantuan Katalis Timah Pada Proses *Looping Continue*” dapat terselesaikan dengan baik. Tesis ini terdiri dari 5 bab yang terdiri dari pendahuluan, tinjauan pustaka, metodologi penelitian, hasil dan pembahasan serta kesimpulan dan saran.

Tesis ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) pada Program Studi Teknik Kimia BKU Teknologi Petrokimia Program Pascasarjana Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya. Dengan harapan isi penelitian ini dapat bermanfaat secara nyata bagi kehidupan dan didukung dari ilmu – ilmu yang telah diterima selama menempuh studi.

Selama berproses keilmuan dan proses pelaksanaan penelitian, penulisan serta penyelesaian tesis, tidaklah tercapai dengan baik tanpa ada dukungan dari berbagai pihak. Dengan kerendahan hati, perkenankan penulis menghaturkan terimakasih yang tulus dan penghargaan yang tinggi kepada :

1. Dr. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
2. Dr. Tuti Indah Sari, S.T., M.T dan Dr. Fitri Hadiah, S.T., M.T. selaku Pimpinan Jurusan Teknik Kimia Universitas Sriwijaya. .
3. Dr. Selpiana, S.T., M.T. selaku ketua prodi Magister Teknik Kimia Universitas Sriwijaya, terimakasih atas arahan dan petunjuk selama proses masa studi saya di magister teknik kimia.
4. Orangtua yang selalu ada dan tiada henti memberikan do’a yang tulus, menyemangati serta memberikan dukungan penuh secara moral dan finansial.
5. Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Djoni Bustan, M.Eng, IPU selaku dosen pembimbing tesis utama, dan saya anggap orang tua kedua saya, seorang bapak yang selalu memberikan arahan dan bimbingan kepada saya dalam berproses keilmuan, proses pelaksanaan penelitian serta arahan proses kehidupan

sehingga saya bisa tetap berdiri tegak sampai di titik penyelesaian tesis ini dan saya mendapatkan makna filosofi ilmu dalam kehidupan sebagai bekal saya nantinya.

6. Prof. Dr. Ir. Hj. Sri Haryati, DEA, IPU selaku dosen pembimbing tesis pendamping dan saya anggap orang tua kedua saya yang selalu memberikan arahan dan bimbingan kepada saya dalam pelaksanaan penelitian serta proses keilmuan sehingga penulisan tesis dapat dibuat dengan baik.
7. Pak Ambo Intang dan Pak Ismail yang memberikan motivasi dan semangat dalam proses keilmuan dibawah atap bengkel teknik kimia Unsri, suasana kekerabatan dan kekeluargaan. Tetap semangat dan jaga silaturahmi.
8. Kekeluargaan rekan rekan dibawah atap bengkel teknik kimia Unsri, semangat, sukses untuk kita semua serta jaga silaturahmi
9. Teman-teman seperjuangan Magister Teknik Kimia 2023 serta semua pihak yang selalu memberikan dukungan dan semangat yang tidak dapat disebutkan satu persatu.
10. Takagi, Sagiri Izumi, Megumin, Kanna Kamui, Kanao Tsuyuri, K-ON, Monkey D. Luffy, Roronoa Zoro, Gintoki, Kobo Kanaeru, Brando Franco Windah serta yang lainnya yang telah memberikan semangat serta hiburan sehingga memudahkan penulisan tesis ini.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih memiliki kekurangan. Namun, diharapkan tesis ini dapat bermanfaat bagi kita semua dan dapat menjadi lebih baik lagi dengan adanya penelitian – penelitian lanjutan. Aamiin

Palembang, Desember 2024

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS.....	iv
RINGKASAN	vii
SUMMARY	viii
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR NOTASI.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Permasalahan.....	5
1.3. Tujuan.....	18
1.4. Keterbaruan (<i>Novelty</i>)	21
1.5. Ruang Lingkup	21
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	22
2.1. Sumber Daya Minyak dan Gas Global serta Emisi yang Ditimbulkan..	22
2.1.1. Kondisi terkini minyak dan gas bumi	22
2.1.2. Perbandingan sumber daya minyak dan gas	27
2.2. Emisi yang Ditimbulkan dalam Penggunaan Minyak dan Gas Bumi	30
2.2.1. Emisi Gas Rumah Kaca	30

2.2.2.	Emisi Karbon Global.....	34
2.2.3.	Emisi Sulfur Global	46
2.2.4.	Emisi dari Penggunaan Kendaraan	51
2.3.	Teknologi pengurangan polusi sulfur dioksida (SO ₂) secara <i>catalytic reduction</i>	60
2.3.1.	Katalis <i>Catalytic Reduction</i>	66
2.4.	Desulfurisasi Bahan Bakar Minyak.....	75
2.4.1.	Hidrodesulfurisasi	77
2.4.2.	Biodesulfurisasi.....	79
2.4.3.	Desulfurisasi Adsorptif	81
2.4.4.	Desulfurisasi Ekstraktif.....	85
2.4.5.	Desulfurisasi Oksidatif.....	91
2.4.6.	Desulfurisasi oksidatif fotokatalitik.....	92
2.5.	Senyawa Sulfur pada Bahan Bakar dan Dampaknya.....	124
2.6.	Sinar dan Gelombang	127
2.6.1.	Gelombang	128
2.6.2.	Sinar	129
2.7.	<i>Visible light</i> pada Reaksi Kimia.....	132
2.8.	<i>Red light</i> pada Reaksi Kimia	143
2.9.	Efek <i>Metal</i> pada Sinar	145
2.9.1.	Efek Indeks Bias <i>Metal</i>	147
2.9.2.	Efek Fotolistrik oleh Sinar pada Material <i>Metal</i>	148
BAB III KONSEP DESAIN PENELITIAN		152
3.1.	Langkah-Langkah Penelitian.....	152
3.2.	Analisa Penelitian.....	153

3.3.	Diagram Alir Penelitian.....	154
3.4.	Skema Proses Penelitian.....	155
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		156
4.1.	Desulfurisasi minyak diesel pada variasi waktu dan tinggi katalis pada daya sinar merah 20 W.....	156
4.2.	Desulfurisasi minyak diesel pada variasi waktu dan tinggi katalis pada daya sinar merah 50 W.....	158
4.3.	Efek <i>metal</i> timah dalam peningkatan energi foton sinar tampak merah 160	
4.4.	Efek <i>metal</i> timah terhadap frekuensi sinar tampak merah	162
4.5.	Efek <i>metal</i> timah terhadap panjang gelombang sinar tampak merah...	164
4.6.	Efek <i>metal</i> timah pada peningkatan energi kinetik maksimum sinar merah 165	
4.6.	Analisa karakterisasi minyak diesel hasil desulfurisasi.....	167
4.7.	Studi Teoritis Mekanisme Penguraian Senyawa Sulfur dari Minyak Diesel dengan DFT.....	169
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		176
5.1.	Kesimpulan.....	176
5.2.	Saran.....	176
DAFTAR PUSTAKA		177

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Total cadangan minyak terbukti di berbagai wilayah pada tahun berbeda (British Petroleum, 2021).....	23
Gambar 2. 2. Produksi minyak di berbagai daerah pada tahun yang berbeda (British Petroleum, 2021).....	23
Gambar 2. 3. Konsumsi minyak di berbagai daerah pada tahun yang berbeda (British Petroleum, 2021).....	24
Gambar 2. 4. Total cadangan gas terbukti di berbagai wilayah pada tahun berbeda (Wang dkk., 2023).....	25
Gambar 2. 5. Produksi gas dari berbagai daerah pada tahun yang berbeda (Wang dkk., 2023).....	25
Gambar 2. 6. Konsumsi gas di berbagai daerah pada tahun yang berbeda (British Petroleum, 2021).....	26
Gambar 2. 7. Rasio <i>reserves-to-production</i> (R/P) minyak dan gas di berbagai wilayah pada tahun 2020 (British Petroleum, 2021).....	28
Gambar 2. 8. Rasio produksi terhadap konsumsi (P/C) minyak dan gas di berbagai wilayah pada tahun 2020 (British Petroleum, 2021).....	29
Gambar 2. 9. Perubahan suhu rata-rata daratan dan lautan global (Climate Action Tracker, 2021).....	31
Gambar 2. 10. Emisi GRK global dari janji dan target (Climate Action Tracker, 2021).....	33
Gambar 2. 11. Konsumsi energi primer global berdasarkan sumbernya (British Petroleum, 2021).....	35
Gambar 2. 12. Pangsa konsumsi energi primer global berdasarkan sumber pada tahun 2020 (British Petroleum, 2021).....	36
Gambar 2. 13. Pangsa energi primer dari sumber rendah karbon (Wang dkk., 2023).....	37
Gambar 2. 14. Total emisi CO ₂ tahunan berdasarkan jenis bahan bakar (ICOS, 2021).....	38

Gambar 2. 15. Bagian tahunan emisi CO ₂ menurut wilayah dunia (ICOS, 2021).	40
Gambar 2. 16. Porsi emisi CO ₂ menurut kawasan dunia menurut jenis bahan bakar pada tahun 2020 (ICOS, 2021).....	41
Gambar 2. 17. Porsi emisi kumulatif global menurut negara dari waktu ke waktu (ICOS, 2021).....	42
Gambar 2. 18. Emisi CO ₂ dari enam penghasil emisi terbesar per kapita (ICOS, 2021).	43
Gambar 2. 19. Kontribusi negara-negara penghasil emisi karbon yang besar terhadap emisi CO ₂ global (Wang dkk., 2023).	44
Gambar 2. 20. Perubahan emisi CO ₂ berdasarkan jenis bahan bakar menurut wilayah dunia dari tahun 2000 hingga 2019 (British Petroleum, 2021).	45
Gambar 2. 21. Distribusi geografis dari (a) emisi SO ₂ tahunan dari semua sumber (tidak termasuk emisi penerbangan) dan (b) emisi per kapita pada tahun 2014. Diagram yang disematkan pada panel (a) menunjukkan profil sumber untuk 7 wilayah (Zhong dkk., 2020).....	48
Gambar 2. 22. Gambar. Emisi NO _x (biru) dan VOC (hijau) kendaraan jalan raya (LDV, HDV, kendaraan komersial, dan sepeda motor) untuk tahun 1990-2016 untuk Amerika Serikat (garis solid) dan Uni Eropa (garis putus-putus) (Winkler dkk., 2018).	53
Gambar 2. 23. Konsentrasi ozon rata-rata regional AS (a) dan Uni Eropa (b) (biru) dibandingkan dengan standar kualitas udara ambien (merah) (1 ppb O ₃ = 2 µg/m ³ O ₃) (Calvert dkk., 2015).....	57
Gambar 2. 24. Ukuran pasar FGD Tiongkok berdasarkan jenis produk (McAuliffe dan Marie, 2016).	62
Gambar 2. 25. Tinjauan umum tentang kandungan minyak bumi dan keberadaan senyawa yang mengandung sulfur (Haruna dkk., 2022).....	75
Gambar 2. 26. Mekanisme hidrodiesulfurisasi tiofena (Song, 2003).....	78
Gambar 2. 27. Mekanisme reaksi proses biodesulfurisasi (Booth dkk., 2001).....	81
Gambar 2. 28. Desulfurisasi adsorptif bensin menggunakan zeolit yang didoping dengan <i>metal</i> aktif (Gao dkk., 2013B).....	82

Gambar 2. 29. Jalur mekanisme DBT dengan proses desulfurisasi ekstraktif oleh Li dkk (Li dkk., 2018C).....	86
Gambar 2. 30. Senyawa <i>ionic liquids</i> yang sering digunakan diproses desulfurisasi (Paucar dkk., 2021)	87
Gambar 2. 31. Jalur reaksi desulfurisasi oksidatif (Houda dkk., 2018).....	92
Gambar 2. 32. Skema reaksi antara MCM-41 dan sumber titanium (Zarrabi dkk., 2015).	97
Gambar 2. 33. Fenomena sebelum dan sesudah penambahan bahan pendukung pada katalis PODS (Hitam dkk., 2019).	103
Gambar 2. 34. Gambaran skematik mekanisme oksidasi fotokatalitik tiofena pada RuO ₂ / SO ₄ ²⁻ - TiO ₂ fotokatalis (Lin dkk., 2016).	105
Gambar 2. 35. Mekanisme pembentukan CeO ₂ /ATP/g-C ₃ N ₄ nanokomposit (Li dkk., 2017D).	109
Gambar 2. 36. Mekanisme pembentukan heterostruktur CQDs/ATP (Ma dkk., 2018).	111
Gambar 2. 37. Penghilangan sulfur dari sistem desulfurisasi fotokimia yang berbeda dalam minyak model (Zhu dkk., 2015A).....	116
Gambar 2. 38. Mekanisme fotogenerasi umum pasangan <i>electron-hole</i> (Zhao dkk., 2013).	118
Gambar 2. 39. Spektrum ESR <i>spin trapping</i> DMPO untuk DMPO-O ₂ – (a), DMPO-OH (b) dan TEMPO-h ⁺ (c) dari TiO ₂ /PG dan Ag-TiO ₂ /PG dengan penyinaran sinar gelap dan sinar tampak (Chen dkk., 2018).....	119
Gambar 2. 40. Mekanisme desulfurisasi fotokatalitik dari BiP _{1-x} V _x O ₄ /ATP (Liu dkk., 2019).	121
Gambar 2. 41. Senyawa sulfur asam dan non-asam (Hill dan Dougan, 1967)	125
Gambar 2. 42. Jenis-jenis sinar berdasarkan panjang gelombang (Fan dkk., 2022)	132
Gambar 2. 43. Mekanisme pembentukan furan dari tiofena oksida dengan bantuan visible light (Heying dkk., 2008)	133
Gambar 2. 44. Panjang ikatan senyawa tiofena oksida, oxathin, (Z)-4-sulfanylidenebut-2-enal dan episulfide (Heying dkk., 2008).....	134

Gambar 2. 45. Rutenium dan iridium kompleks berbasis bipridril (Ahmad dkk., 2023)	134
Gambar 2. 46. Ru(bpy) ₃ ²⁺ menunjukkan daya serapan tinggi <i>visible light</i> pada 452 nm (Campagna dkk., 2007).....	135
Gambar 2. 47. Tiga metode transformasi Ru(bpy) ₃ Cl ₂ dengan iradiasi <i>visible light</i> (Xuan dkk., 2013)	137
Gambar 2. 48. Reaksi Heck yang dikatalisis <i>metal</i> paladium yang diinduksi <i>visible light</i> menggunakan vinil bromida internal dengan stirena (Li dkk., 2021).....	137
Gambar 2. 49. Reaksi karboiodinasi yang dikatalisis oleh Pd (Marchese dkk., 2022)	138
Gambar 2. 50. Sinar biru menginduksi arilasi Heck dari <i>allenes</i> (Fredricks dkk., 2010)	139
Gambar 2. 51. Reaksi antara senyawa α-klorokarbonil dengan asam arilboronat (Oku dkk., 2022)	140
Gambar 2. 52. Mekanisme proses desulfurisasi dengan sinar UV Laser ArF dan bantuan oksigen (Gondal dkk., 2013)	141
Gambar 2. 53. Jalur reaksi yang diusulkan dan profil energi: Nilai energi dalam kurung nilai energi relatif terhadap [DBT + 3O ₂] (berwarna hitam), [DBT-O ₂ (π-kompleks)] (berwarna biru) (Shinozaki dkk., 2022).....	142
Gambar 2. 54. Mekanisme reaksi yang diusulkan untuk pembentukan produk sampingan dan rute reaksi alternatif untuk DBTO (Shinozaki dkk., 2022).....	142
Gambar 2. 55. Peristiwa fotoelektron akibat tumbukkan foton dari sinar dengan elektron pada pelat <i>metal</i> (Qian, 2023)	151
Gambar 2. 56. Pergerakan foton sinar dan elektron saat terjadi tumbukkan (Qian, 2023)	151
Gambar 3. 1. Diagram Alir Penelitian	154
Gambar 3. 2. Skema Peralatan Penelitian	155
Gambar 4. 1. Hasil desulfurisasi minyak diesel dengan variasi waktu dan tinggi katalis pada daya sinar merah 20 W.....	156
Gambar 4. 2. Grafik penurunan sulfur pada desulfurisasi daya sinar tampak merah 20 W	157

Gambar 4. 3. Hasil desulfurisasi minyak diesel dengan variasi waktu dan tinggi katalis pada daya sinar merah 50 W.....	158
Gambar 4. 4. Grafik penurunan sulfur pada desulfurisasi daya sinar tampak merah 50 W	159
Gambar 4. 5. Mekanime fotoelektrik dalam pelepasan elektron akibat perambatan sinar tampak merah	160
Gambar 4. 6. Perubahan energi foton sinar tampak merah pada variasi tinggi katalis	162
Gambar 4. 7. Perubahan frekuensi sinar tampak merah pada variasi tinggi katalis	163
Gambar 4. 8. Perubahan panjang gelombang sinar tampak merah pada variasi tinggi katalis	165
Gambar 4. 9. Perubahan energi kinetik maksimum sinar tampak merah pada variasi tinggi katalis.....	166
Gambar 4. 10. Karakterisasi FTIR pada minyak diesel sebelum dan sesudah iradiasi sinar tampak merah	168
Gambar 4. 11. Profil HOMO dan LUMO pada C9-DBT	170
Gambar 4. 12. Profil HOMO dan LUMO pada Benzena – DBT.....	171
Gambar 4. 13. Profil energi desulfurisasi DBT dari ikatan hidrokarbon - DBT	172
Gambar 4. 14. Pembentukan DBT menjadi DBTO ₂	173
Gambar 4. 15. Jalur reaksi dari DBTO ₂ (σ -kompleks) menjadi DBFES dan Sn beserta profil energi: Nilai energi yang disintesis dari DBTO ₂ (σ 566572-kompleks) (Hijau) dan DBTO (Orange).....	174
Gambar 4. 16. Profil energi reaksi pembentukan DBF dan alotrop sulfur dari DBFES	175

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1. Sejarah Penelitian Desulfurisasi.....	11
Tabel 2. 1. Perbandingan standar emisi kendaraan AS dan UE dengan emisi dari kendaraan ICE bensin dan BEV yang dipilih, serta keausan rem non-knalpot dan keausan ban (Winkler dkk., 2018).	55
Tabel 2. 2. Ringkasan hasil untuk penggunaan bahan pendukung dalam PODS.	101
Tabel 2. 3. Ringkasan hasil untuk doping <i>metal</i> dalam PODS.	106
Tabel 2. 4. Ringkasan hasil untuk penggabungan dua semikonduktor dalam PODS.	112
Tabel 2. 5. Kekurangan dan Kelebihan Metode Desulfurisasi.....	122
Tabel 4. 1. Energi orbital molekul dari HOMO dan LUMO pada ikatan hidrokarbon dengan DBT	171

DAFTAR NOTASI

λ	: Panjang gelombang (nm)
E_{kmax}	: Energi kinetik maksimum sinar (kJ mol^{-1})
E_o	: Energi ambang batas <i>metal</i> (kJ mol^{-1})
E_p	: Energi Foton (J s^{-1})
f	: Frekuensi sinar (Hz)
h	: Konstanta plack (J s^{-1})
BT	: <i>Benzotiofena</i>
CNM	: <i>Carbon nanomaterial</i>
DBT	: <i>Dibenzotiofena</i>
DES	: <i>Deep Eutectic Solvents</i>
DFT	: <i>Density Functionality Theory</i>
DMBT	: <i>Dimetilbezotiofena</i>
DRS	: <i>Difuse Reflectansion Spectroscopy</i>
ECODS	: <i>Extraction and Catalytic Oxidative Desulfurization System</i>
EDS	: <i>Extractive Desulfurization Sulfur</i>
FTIR	: <i>Fourier Transform Infrared</i>
FGD	: <i>Flue Gas Desulfurization</i>
GRK	: Gas Rumah Kaca
HDS	: <i>Hydrodesulfurization Sulfur</i>
HOMO	: <i>Highest Oncupied Molecular Orbital</i>
IL	: <i>Ionic Liquid</i>
LED	: <i>Light Emitting diode</i>
LUMO	: <i>Lowest Unocupied Molecular Orbital</i>
MMT	: <i>Montmorollonit</i>
MO	: <i>Molecular Orbital</i>
NOR	: <i>Net Oxidation Reaction</i>
ODS	: <i>Oxidative Desulfurization Sulfur</i>
P/C	: <i>Production-to-consumption</i>

PM	: <i>Particulate Matter</i>
PODS	: <i>Photocatalytic Oxidative Desulfurization</i>
PPM	: <i>Part per million</i>
QUI	: <i>Quinoline</i>
SPR	: <i>Surface Plasmon Resonance</i>
TBA	: <i>Tert-butyl alcohol</i>
TEOA	: <i>Triethanolamine</i>
UV	: <i>Ultraviolet</i>
VASP	: <i>Vienna Ab initio Simulation Package</i>
XPS	: <i>X-ray Photoelectron Spectroscopy</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Polusi Indonesia sudah menjadi makanan sehari-hari bagi kehidupan masyarakatnya. Tingkat pertumbuhan penduduk Indonesia yang tiap tahunnya meningkat, tidak diiringi dengan penanganan polutan dari aktivitas masyarakat itu sendiri. Berbagai sumber polutan, saat ini belum menjadi prioritas utama pemerintah untuk menanganinya. Aktivitas masyarakat seperti kendaraan transportasi, pembakaran hutan untuk pembukaan lahan serta proses industri inilah menjadi sumber polutan besar bagi masyarakat. Hal ini tentu akan memberikan efek negatif jika dibiarkan terlalu lama tanpa penanganan yang berarti. Menurut *Air Quality Life Index* (AQLI), penduduk Indonesia rata-rata kehilangan usia harapan hidupnya mencapai 2,5 tahun karena polusi udara (Lee dan Greenstone, 2021).

Polusi udara diberbagai daerah di Indonesia sudah sangat tinggi karena berada dibawah aman batas standar WHO yang berada pada standar *Particulate Matter* (PM) 2,5. Lebih dari 93% penduduk Indonesia hidup dan tinggal dibawah standar WHO tersebut. Daerah Jawa yang memiliki penduduk terbanyak memilih tingkat polusi udara yang sangat tinggi diikuti Sumatera dan Kalimantan (Lee dan Greenstone, 2021).

Polutan tersebut kebanyakan berasal dari penggunaan bahan bakar fosil seperti minyak bumi. Bahan bakar fosil masih menjadi sumber daya alam utama yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi masyarakat saat ini yang sangat besar. Perkiraan juga menunjukkan bahwa konsumsi energi akan terus meningkat hingga tahun 2040, terutama karena pertumbuhan populasi global yang diestimasi mencapai 1,7 miliar (Holechek dkk., 2022). Meskipun energi terbarukan diharapkan dapat memberikan kontribusi lebih besar pada tahun 2040, perkiraannya masih sekitar 20% dari total kebutuhan energi. Dengan skenario ini, bahan bakar fosil diperkirakan akan tetap menjadi pilihan utama untuk memenuhi kebutuhan energi global di masa mendatang. Namun, penggunaan bahan bakar fosil berpotensi merusak kesehatan planet dan manusia melalui polusi udara dan emisi gas beracun

yang besar. Minyak mentah dan bahan bakar berat yang diekstraksi dari sumber-sumber tidak konvensional sering kali mengandung senyawa sulfur dan nitrogen yang berpotensi merugikan (Shindell dan Smith, 2019).

Sulfur dan turunannya termasuk dalam tiga zat teratas yang umum dalam industri minyak mentah dan minyak bumi dengan kisaran antara 0,03% hingga 7,89% (b/b) (Javadli dan de Klerk, 2012). Polutan tersebut harus dikurangi secara bertahap seperti salah satunya adalah pengurangan polutan sulfur pada kendaraan transportasi. Polutan dari kendaraan transportasi ada banyak jenis polutan seperti gas CO, CO₂, dan SO_x. Selama pembakaran mesin, prosesnya akan mengeluarkan gas yang merupakan sumber utama pencemaran lingkungan (Ahmadian dan Anbia, 2021). Selain kerusakan sulfur dioksida yang dibawa ke *catalytic converter* pada kendaraan, kontaminasi ekologis parah yang berdampak pada kesehatan manusia dan hewan terjadi ketika minyak yang mengandung sulfur dibakar secara langsung, karena sejumlah besar sulfur dioksida dilepaskan ke lingkungan (Chen dkk., 2021). Permasalahan pencemaran lingkungan menjadi semakin parah akibat pesatnya urbanisasi, dan industrialisasi, serta berdampak negatif terhadap ekosistem (Koul dkk., 2022). Produksi gas beracun, seperti Sox menjadi ancaman yang serius terhadap kesejahteraan dan kesehatan manusia. Sulfur dioksida (SO₂) berkontribusi terhadap pembentukan kabut asap mengandung sulfur yang berasal dari peningkatan kadar sulfur oksida (SO_x) yang ada di atmosfer dan diperburuk oleh kelembapan dan partikulat (PM) yang tinggi. Selain itu, gas tersebut dapat menyebabkan hujan asam yang dapat berkontribusi terhadap terjadinya kabut fotokimia (Hanif dkk., 2020). Sulfur dalam berbagai bentuk oksida di atmosfer menghasilkan hujan asam ketika bereaksi dengan uap air. Hujan asam dapat merusak flora dan fauna di ekosistem, bahkan dapat menyebabkan korosi lebih cepat pada bangunan dan struktur *metal*, serta dapat menyebabkan kebangkrutan di bidang pertanian karena berkurangnya efisiensi proses fotosintesis (Kalita dkk., 2022). Emisi gas buang juga mempunyai konsekuensi yang tidak diinginkan yaitu mengeluarkan bau yang tidak sedap, yang dapat menyebabkan sakit kepala dan iritasi mata (Saleh, 2016). Paparan SO_x konsentrasi tinggi dalam jangka panjang menyebabkan masalah pernapasan yang berhubungan dengan paru-paru dan pada

akhirnya dapat menyebabkan kematian. Konverter katalitik pada mesin otomotif yang digunakan untuk mengurangi CO_x dan NO_x menjadi terkontaminasi, dan hal ini dapat menyebabkan masalah korosi pada peralatan pemompaan, pipa, dan kilang (Muzic dkk., 2008).

Senyawa sulfur yang memberikan dampak buruk bagi lingkungan maka sebagian besar negara menetapkan peraturan ketat mengenai jumlah sulfur yang dibutuhkan dalam bahan bakar untuk mencapai lingkungan yang berkelanjutan. Uni Eropa dan negara maju lainnya seperti Jepang dan Amerika menetapkan batas tertinggi kandungan sulfur yang diperbolehkan untuk bensin sebesar 10 ppm dan diesel sebesar 15 ppm (de Lima dkk., 2018).

Di Indonesia untuk kandungan bahan bakar khususnya diesel berdasarkan Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Tahun 2016 dengan Nomor 28.K/10/DJM.T/2016 untuk minyak diesel tipe 48 (Pertamina Dex dalam produk Pertamina) kandungan diesel maksimalnya pada tahun 2016 berada di 3000 ppm, 2021 berada pada 500 ppm dan target pada 2025 berada di 50 ppm (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2016). Minyak diesel tipe 51 sejak 2006 diatur maksimal 500 ppm dan hingga sekarang belum ada pembaruan peraturan dengan Nomor SK 3675/2006 (Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2006). Kandungan tersebut baru memenuhi standar dunia di Euro 4 yakni maksimal 50 ppm, dimana hal ini masih jauh dengan standar terbaru yakni sejak 2009 sudah menerapkan standar Euro 5 yakni maksimal 10 ppm (Directorate General for Environment, 2009).

Mengingat banyaknya dampak buruk dari penggunaan bahan bakar, kebutuhannya setiap tahunnya selalu meningkat dan saat ini masih menjadi kebutuhan teratas dalam dunia transportasi. Secara global, konsumsi bahan bakar cair berdasarkan perkiraan Administrasi Informasi Energi AS mengalami peningkatan dari rata-rata 99,4 juta barel per hari (b/d) pada tahun 2022 menjadi 100,9 juta b/d pada tahun 2023, yang berarti mengalami peningkatan 0,4 juta b/d lebih tinggi (Mamuad dan Choi, 2023). Sekitar sepertiga dari permintaan minyak bumi di seluruh dunia berasal dari sektor transportasi, sebagian besar disebabkan

oleh ketergantungan pada kendaraan bermotor yang membutuhkan bahan bakar dari minyak bumi. Organisasi negara-negara pengeksport minyak bumi, atau OPEC, memperkirakan permintaan akan mencapai 109 juta barel minyak secara global per hari pada tahun 2045. Bahan bakar untuk transportasi seperti bensin dan diesel diperkirakan akan terus menjadi produk yang paling banyak diminati. Kebutuhan minyak diesel dan gas diperkirakan mencapai 30 juta barel per hari pada tahun 2045, lebih tinggi dari 26,4 juta barel pada tahun 2019 (Sönnichsen, 2023).

Proses desulfurisasi menjadi tantangan tersendiri sebagai bagian dari upaya mengurangi kandungan sulfur di industri petrokimia khususnya dari produk bahan bakar cair seperti diesel. Senyawa-senyawa yang terkandung pada minyak bumi sebagai produk dari petrokimia seperti tiol, tiofena, benzotiofena (BT), dibenzotiofena (DBT), dan 4,6-dimetilbenzotiofena (4,6-DMBT) adalah contoh dari senyawa yang memiliki kandungan sulfur atau sulfur yang terdapat pada bahan bakar cair (1-4). Oleh karena itu, kebutuhan untuk mengembangkan teknologi desulfurisasi yang efisien yang akan menghilangkan senyawa sulfur dari bahan bakar berdasarkan peraturan lingkungan hidup yang ketat saat ini sangatlah diperlukan. Teknologi seperti *Hydrodesulfurization Sulfur* (HDS), *biodesulfurisasi*, *Extractive Desulfurization Sulfur* (EDS), *Adsorptive Desulfurization Sulfur* (ADS), dan *Oxidative Desulfurization Sulfur* (ODS) telah banyak diaplikasikan untuk desulfurisasi bahan bakar minyak (Hossain dkk., 2019; Li dkk., 2018B; Nath Prajapati dan Verma, 2018; Shafiq dkk., 2021).

Teknologi HDS melalui hidrogenasi katalitik pada suhu tinggi (350-450°C) dan tekanan tinggi (30-60 atm). Proses ini memiliki kelebihan yakni efisiensi tinggi dalam menghilangkan sulfida, disulfida maupun merkaptan dengan mengubahnya menjadi hidrogen sulfida. Kerugian utama HDS adalah konsumsi energi yang tinggi karena kondisi reaksi yang tinggi dan tingginya konsumsi hidrogen yang mahal. Selain itu, katalis HDS (Co atau Ni yang dipromosikan oleh Mo atau W sulfida dan didukung menjadi $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) tidak efisien dalam mengubah molekul besar yang mengandung sulfur (misalnya DBT dan DMBT) (Gao dkk., 2013A).

Proses ADS melibatkan penghilangan sulfur melalui proses adsorpsi fisikokimia yang berlangsung pada suhu dan tekanan rendah dan tidak memerlukan

hidrogen. Berbagai macam adsorben seperti oksida *metal*, zeolit, dan *metal-organik* modernite (MOFs) telah digunakan untuk proses ADS (Lee dan Valla, 2019; Saha dkk., 2021). ADS memungkinkan diperolehnya efisiensi desulfurisasi yang sangat tinggi (<10 ppm S), namun regenerasi adsorben terbatas (Kulkarni dan Afonso, 2010; Zhou dkk., 2021). Proses EDS juga sudah sering digunakan didalam kondisi reaksi ringan dengan adanya berbagai ekstraktan, termasuk asetonitril, metanol, N,N-dimetilformamida, dimetilsulfoksida, dan pirolidon (Majid dkk., 2020). Penggunaan pelarut ini memunculkan masalah baru terkait lingkungan dan keselamatan seperti emisi air limbah dan bahaya kebakaran. Masalah lingkungan dapat diselesaikan dengan menggunakan cairan ionik sebagai ekstraktan dalam EDS (Ibrahim dkk., 2017). Namun penerapannya dalam proses skala besar dibatasi oleh biaya tinggi. Proses biodesulfurisasi melibatkan proses yang sederhana, konsumsi energi dan biaya pengoperasian yang rendah, serta kondisi reaksi yang ringan (Ye dkk., 2018B). Keterbatasan utama dari pendekatan ini adalah banyaknya karbon yang termineralisasi, sehingga mengurangi nilai bahan bakar (Hitam dkk., 2019). Oleh karena itu, proses desulfurisasi perlu pembaruan proses dari proses konvensional agar bisa diindustrialisasikan dengan proses yang rendah biaya tetapi tetap efisien dan efektif serta kondisi operasi yang ringan.

1.2. Permasalahan

Proses desulfurisasi telah banyak dilakukan dengan berbagai bahan dan metode dalam rangka mengurangi kandungan sulfur yang berbahaya bagi kesehatan dan lingkungan. Beberapa penelitian tersebut memiliki kelemahan dan kelebihan tersendiri dalam prosesnya. Berikut beberapa penelitian terdahulu mengenai proses desulfurisasi khususnya pada minyak diesel (diesel).

Jiang dkk. melakukan desulfurisasi oksidatif pada minyak diesel dengan memanfaatkan efek sinergis dari *Deep Eutectic Solvents* (DES). Penelitian ini menggunakan pelarut asam ganda yakni amonium kuarterner tersulfonasi dan asam oksalat dengan fungsi sebagai ekstraktan sekaligus katalis. Sampel minyak yang digunakan adalah bahan bakar model dengan tambahan senyawa sulfur DBT, 4 - MDBT dan 4,6-DMBT yang dilarutkan dalam n-dodekana dengan kandungan

sulfur 200 mg/kg. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *Extraction and Catalytic Oxidative Desulfurization System* (ECODS) dimana prosesnya dilakukan ekstraksi senyawa sulfur dari minyak model pada pelarut EDS kemudian dilakukan proses oksidasi membentuk senyawa sulfon. Hasil penelitian menunjukkan proses penghilangan dengan cara ODS tertinggi mencapai 97,7% namun proses ekstraksinya hanya 4,8% (Jiang dkk., 2020).

Gao dkk. melakukan desulfurisasi oksidatif dengan bantuan katalis Molibdenum dengan paduan UiO-66. Minyak sampel yang digunakan adalah DBT yang dilarutkan dalam n-nonana dengan kandungan sulfur 1000 g/g. 30% H₂O₂ dengan suhu reaksi 40-80°C. Hasil penelitian dengan proses reaksi pada suhu 60°C selama 120 menit menunjukkan kombinasi Mo – UiO-66 menghasilkan konversi DBT mencapai 98,79% dibandingkan UiO-66 tunggal yang hanya mendapatkan konversi sebesar 70,39% (Gao dkk., 2024).

Biodesulfurisasi DBT dilakukan oleh Hasanbeik dkk. dengan mikroorganisme *Rhodococcus erythropolis* IGTS8 dengan struktur nano. Hasil menunjukkan aktivitas biodesulfurisasi dengan adanya struktur nano pada mikroorganisme meningkat 52%. Selain itu, dengan adanya struktur nano faktor efektifnya terdiri dari konsentrasi struktur nano, konsentrasi sulfur dan konsentrasi sel. Sedangkan tidak adanya struktur nano, faktor efektifnya hanya konsentrasi sulfur (Hasanbeik dkk., 2022).

Prasoulas dkk. melakukan biodesulfurisasi dengan mikroorganisme yang sama yakni mikroorganisme *Rhodococcus erythropolis* IGTS8 yang diaplikasikan pada reaktor *bubble column*. Penelitian menunjukkan sebanyak 87% DBT dapat dihilangkan oleh sel pada usia 36 jam, hasil ini memberikan indeks kemampuan desulfurisasi DBT 29,5% g/L. h, laju penyisihan DBT spesifik 11 mmol/kg DCW/jam (Prasoulas dkk., 2021).

Desulfurisasi dengan metode adsorpsi dilakukan oleh Mujahid dkk. dengan menggunakan adsorben gabungan dari polimer poli(metil metakrilat) dengan nikel sulfida. Sampel minyak yang digunakan adalah larutan standar 1 ppmw DBT yang dilarutkan dalam n-heksana. Hasil menunjukkan efisien penghilangan kandungan

sulfurnya mencapai 97% untuk membran hibrid dibandingkan dengan polimer PMMA tunggal baik dicetak dengan molekular maupun tidak (Mujahid dkk., 2020).

Ahmad dkk. menggunakan metode desulfurisasi yang sama dengan menggunakan tanah liat *montmorillonit* (MMT) yang dipadukan dengan *metal Zn*. Penelitiannya dilakukan pada operasi *batch* selama 1 jam dibawah suhu kamar. Sampel minyak diesel dan minyak tanah dengan masing-masing kandungan dieselnnya 1,041% dan 0,0542% didapat dari Kilang Minyak Attock, Pakistan. Hasil penelitian menunjukkan desulfurisasi pada minyak diesel mencapai 77% dan minyak tanah 76% dengan rasio minyak 20:1,5. Hasil terbaik dengan kondisi optimal dapat mengadorpsi sebanyak 81% DBT dari minyak model yang mengandung 1000 ppm DBT yang dilarutkan dalam sikloheksana (Ahmad dkk., 2017).

Al-Hammadi dkk. melakukan hidrodesulfurisasi dengan bantuan katalis nanofiber alumina-karbon sebagai pendukung katalis dari MoCo. Sampel bahan bakar yang digunakan adalah bahan bakar model yang mengandung DBT pada konsentrasi awal 500 ppm dalam stikerin. Suhu reaksi yang digunakan pada 300°C selama 6 jam dengan reaktor batch. Hasil konversi yang didapatkan mencapai 99% serta kandungan sulfur dapat diturunkan hingga 7 ppm (AL-Hammadi dkk., 2018).

Hu dkk. melakukan pengurangan sulfur dengan metode hidrodesulfurisasi dengan bantuan katalis alumina mesopori didukung katalis NiMo. Sampel minyak yang digunakan adalah DBT yang dilarutkan dalam sikloheksana dengan kandungan 500 ppm. Hasil penelitian menunjukkan katalis kombinasi NiMoE(1,0)/OMA dengan penambahan EDTA menghasilkan konversi DBT tertinggi sebanyak 97,7% dibandingkan katalis yang tidak dimodifikasi EDTA yang hanya mendapatkan konversi sekitar 87% (Hu dkk., 2022).

He dkk. melakukan ekstraktif desulfurisasi berbasis cairan ionik berbasis boron nitrida mikropori sebagai m-BN-PIL sebagai ekstraktan. Hasil penelitian menunjukkan kinerja desulfurisasi 59,2% DBT dan 61,8% 4-MDBT. Efisien ekstraksi DBT dari minyak mencapai 98,2% ketika digunakan suhu 60°C (He dkk., 2023).

Khan dan Srivastava melakukan desulfurisasi ekstraktif dengan pelarut eutektik dalam berbasis etilen glikol dan gliserol. Bahan bakar model menggunakan sulfur tetap 500 mg/L dengan mencampurkan DBT murni dengan iso-oktana. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi ekstraksi yang dicapai sekitar 81% yang merupakan hasil tertinggi. Analisa TGA menunjukkan penurunan berat tertinggi 70% pada kisaran suhu 210-450°C (Khan dan Srivastava, 2022).

Selain menggunakan bantuan katalis dan pelarut, proses desulfurisasi sudah mulai menggunakan bantuan sinar. Pada proses desulfurisasi saat ini yang menggunakan sinar adalah dalam bentuk foto-katalis. Beberapa penelitian yang menggunakan proses desulfurisasi dengan bantuan foto-katalis seperti yang dilakukan oleh Chang dkk. dengan penelitian proses desulfurisasi fotokatalitik oksidasi. Penelitian menggunakan katalis komposit AgCl/PbMoO₄ yang diaktivasi oleh sinar dari merkuri. Bahan bakar yang digunakan adalah minyak model dari campuran DBT yang dilarutkan dalam 100 mL larutan n-oktana dengan kandungan sulfur 200 mg/L. Analisa spektroskopi reflektansi difus UV-Vis menunjukkan penyerapan sinar yang kuat dipanjang gelombang pada foto katalis PbMoO₄ berada di 250 nm sedangkan fotokatalis komposit AgCl/PbMoO₄ berada di 380 nm. Hasil desulfurisasi menunjukkan pada katalis komposit dengan jumlah katalis 1,5 g/L mendapatkan hasil mencapai 97%. Sinar merkuri dipilih dibanding xenon karena tingkat penyerapan PbMoO₄ yang kuat pada panjang gelombang 200-400 nm dengan tingkat penyisihan 94% (Chang dkk., 2020).

Penelitian lainnya dilakukan oleh Beshtar dkk. dengan proses desulfurisasi oksidatif katalitik dengan nanokatalis besi-molibdenum dibawah *visible light*. Bahan bakar model yang digunakan adalah DBT 500 ppm yang dilarutkan dalam 30 ml n-oktana. Sumber sinar yang digunakan adalah sinar xenon 300 W. Hasil penelitian menunjukkan proses desulfurisasi dalam keadaan stabil yakni pada suhu 50°C dengan dosis fotokatalis 2 g/L, tingkat konversi DBT dapat dicapai hingga 100%. Studi kinetika menunjukkan dengan model kinetika orde pertama, energi aktivasi didapatkan sebesar 39,44 kJ/mol (Beshtar dkk., 2024).

Chitgar dkk. melakukan desulfurisasi oksidatif fotokatalitik dengan katalis BiOI/B₄C dengan adanya iridiasi udara dan *visible light*. Bahan bakar yang

digunakan adalah bahan bakar model yang mengandung DBT dilarutkan dalam n-oktana. Sumber sinar menggunakan sinar Osram 400 W (Vialox-NAV/T400) disinari kedalam larutan bahan bakar model. Udara digunakan sebagai oksidan pada reaksi oksidatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa katalis komposit optimal mencapai kinerja desulfurisasi DBT tertinggi dengan nilai 95,1% selama 30 menit pada bahan bakar model dengan konsentrasi 500 ppm sulfur (Chitgar dkk., 2024).

Shinozaki dkk. melakukan penelitian mengenai dekomposisi turunan BT dan DBT yang diinduksi dengan sinar ultraviolet untuk menghilangkan sulfur tanpa bahan tambahan dan katalis. DBT dipilih karena merupakan turunan minyak bumi yang sulit terurai dengan kondisi operasi tinggi pada suhu 270-372°C dan tekanan 50-102 atm H₂. Penelitian ini menggunakan sinar UV dengan panjang gelombang 254 nm pada sinar 8 W pada suhu 25°C selama 24 jam. Pengurangan sulfur dari BT dan DBT ditandai dengan terbentuknya alotrop sulfur (S_n Sebagai bahan bakar model digunakan berbagai turunan BT dan BT yakni BT, 2-MBT, DBT, 4-MDBT dan 4,6-DMBT yang dilarutkan dalam sikloheksana secara terpisah.). Hasil penelitian menunjukkan DBT dapat terdekomposisi dengan menghasilkan endapan sulfur. Sulfur yang dihasilkan berbentuk alotrop sulfur (S_n) pada m/z =128 (S₄⁺), 160 (S₅⁺), 192 (S₆⁺), 224 (S₇⁺), dan 256 (S₈⁺) pada analisa kromatogram HPLC. Hasil spektrum serapan UV dari BT dan DBT dalam sikloheksana menunjukkan serapan yang kuat pada wilayah UV 230-270 nm. Dekomposisi BT mencapai 100% selama 6 jam sedangkan DBT dicapai 100% selama 16 jam. Endapan sulfur yang dihasilkan untuk BT dan DBT mencapai 88% pada berat 46 µg (Shinozaki dkk., 2022). Penelitian-penelitian diatas dirangkum pada Tabel 2.1.

Dari penjabaran diatas maka pada penelitian ini dapat dirumuskan berbagai permasalahan yang ada dalam penelitian proses desulfurisasi, seperti sebagai berikut:

- 1) Proses desulfurisasi konvensional menggunakan proses yang mahal karena membutuhkan katalis, pelarut dan bahan *additive*.
- 2) Proses desulfurisasi konvensional berlangsung dengan kondisi operasi yang tinggi

- 3) Penelitian proses desulfurisasi masih menggunakan minyak model dan belum aplikatif ke minyak diesel dari industri

Tabel 1. 1. Penelitian desulfurisasi konvensional

Ref	Tahun	Metode	Bahan dan Kondisi Operasi	Hasil Penelitian
(Jiang dkk., 2020)	2020	Desulfurisasi Ekstraksi-Oksidatif	Bahan bakar model yakni DBT dilarutkan dalam n-dodekana; Katalis sekaligus DES <i>solvent</i> [PSTEtA]Cl/OA; Oksidan H ₂ O ₂ ; Waktu reaksi 40 menit	Kelebihan : Hasil desulfurisasi mencapai 97,7% dengan efisiensi ekstraksi 4,8% pada suhu 50°C Kekurangan : Diperlukan persiapan katalis dan penggunaan oksidan yang korosif
(Gao dkk., 2024)	2024	Desulfurisasi Oksidatif	Bahan bakar adalah DBT yang dilarutkan dalam n-nonana; Katalis UiO-MoO(O ₂) ₂ ; Oksidan H ₂ O ₂ ; Suhu reaksi 60°C, Waktu reaksi 120 menit	Kelebihan: Konversi DBT pada katalis UiO-66-MoO(O ₂) ₂ sebesar 90,53% dan variasi katalis UiO-66-NO ₂ -MoO(O ₂) ₂ sebesar 98,79% Kekurangan : Proses memerlukan <i>double preparation catalyst</i> dan penggunaan pelarut yang korosif serta waktu reaksi yang lama
(Hasanbeik dkk., 2022)	2022	Biodesulfurisasi	Media sulfur adalah <i>Basal Salt Medium</i> (BSM) dicampurkan dengan DBT; Mikroorganisme <i>Rhodococcus</i> sp. Strain IGST8; Waktu perlakuan 248 jam	Kelebihan : Peningkatan efisiensi biodesulfurisasi sebesar 52%

Ref	Tahun	Metode	Bahan dan Kondisi Operasi	Hasil Penelitian
				Kekurangan : waktu reaksi yang lama hingga 10 hari lebih dan dibutuhkan penjagaan proses yang teratur
(Prasoulas dkk., 2021)	2021	Biodesulfurisasi	Bahan bakar model adalah berbagai senyawa sulfur termasuk DBT yang dilarutkan dalam n-dodekana; Mikroorganisme <i>Rhodococcus</i> sp. Strain IGST8; Waktu perlakuan 25-54 jam	Kelebihan: DBT dapat dihilangkan sebanyak 87% pada mikroorganisme yang berusia 36 jam dengan indeks kemampuan desulfurisasi (D_{DBT}) 29,5% g/L. h Kekurangan : Proses bisa berlangsung hingga 1-2 hari, biaya penerapannya tinggi karena dibutuhkan persiapan mikroorganisme
(Mujahid dkk., 2020)	2020	Desulfurisasi Adsorptif	Bahan bakar model adalah 1 ppmw DBTh dalam n-heksana; Membran yang digunakan adalah PMMA dan NiS dan kombinasi keduanya	Kelebihan: Penghilangan sulfur tertinggi dicapai 84,6% pada variasi membran MIP-64 dengan menyerap 186 $\mu\text{g/g}$ DBTh Kekurangan : Prosesnya tidak efektif untuk penggunaan bahan bakar industri bukan minyak model serta tidak dapat diregenerasi

Ref	Tahun	Metode	Bahan dan Kondisi Operasi	Hasil Penelitian
(Ahmad dkk., 2017)	2017	Desulfurisasi Adsorptif	Bahan bakar yang digunakan adalah minyak tanah dan diesel dari Kilang Minyak Attock, Pakistan; Adsorben tanah liat montmorillonit/bentonit dan arang dicampur paduan <i>metal</i> ; Waktu perlakuan 1-6 jam, Suhu 25-100°C; Konsentrasi adsorben 0,5-1,5 gram.	<p>Kelebihan :Desulfurisasi pada minyak tanah tertinggi dengan variasi Zn-MMT 60% diikuti Mn-MMT 45,33%, Co-MMT 40% dan Ni-MMT 41%. Sedangkan untuk MMT dan arang tunggal mendapatkan hasil 16% dan 21,98%.</p> <p>Desulfurisasi minyak diesel menunjukkan montmorillonit (MMT) dengan efisiensi sebesar 43,96% sedangkan arang 27,80%. Hasil desulfurisasi DBT dengan MMT dipadukan dengan <i>metal</i> mendapatkan hasil untuk Zn-MMT 62,48%, Pb-MMT 55,7% dan Ni-MMT 55,9%.</p> <p>Kekurangan : Hasil tertinggi tersebut dicapai pada suhu kamar 25°C dan terendah pada suhu 100°C dengan waktu reaksi 6 jam untuk hasil tertinggi.</p>

Ref	Tahun	Metode	Bahan dan Kondisi Operasi	Hasil Penelitian
(AL-Hammadi dkk., 2018)	2018	Hidrodessulfurisasi	Bahan bakar model adalah DBT yang dilarutkan dalam stikerin dengan konsentrasi 500 ppm sulfur; Katalis AlMoCo dan AlCNFMoCo; Suhu 300°C; Tekanan parsial hidrogen 55 bar; Waktu reaksi 6 jam	Kelebihan : Konversi DBT dengan katalis AlCNFMoCo mencapai 99% pada reaktor <i>batch</i> , mengurangi sulfur hingga menjadi 7 ppm. Kekurangan : Kondisi operasi yang tinggi seperti suhu dan tekanan serta waktu reaksi yang lama dan penggunaan katalis dengan komponen yang banyak
(Hu dkk., 2022)	2022	Hidrodessulfurisasi	Bahan bakar model menggunakan DBT yang dilarutkan dalam sikloheksana; Suhu 340°C; Tekanan hidrogen 4 MPa; Rasio volume H ₂ /Minyak : 200; Katalis variasi NiMoE/OMA modifikasi EDTA	Kelebihan : Konversi DBT dengan katalis NiMoE(1,0)/OMA modifikasi EDTA mencapai 97,7% Kekurangan : Biaya operasionalnya yang tinggi karena penggunaan bahan yang banyak serta kondisi operasi yang tinggi
(He dkk., 2023)	2023	Desulfurisasi Ekstraktif	Pelarut DES m-BN-PIL dan [BPy][FeCl ₄]; Suhu 40°C; Rasio [BPy][FeCl ₄] terhadap bahan bakar model = 1:5	Kelebihan : Efisiensi 20% m-BN-PIL pada [BPy][FeCl ₄] untuk DBT mencapai 98,2%.

Ref	Tahun	Metode	Bahan dan Kondisi Operasi	Hasil Penelitian
				Kekurangan : Tingginya biaya pelarut karena penggunaan <i>double</i> pelarut serta dapat menimbulkan polutan dari pelarut tersebut
(Khan dan Srivastava, 2022)	2022	Desulfurisasi Ekstraktif	Bahan bakar model adalah DBT murni dilarutkan iso-oktana dengan konsentrasi awal sulfur 500 mg/L; Pelarut DES campuran (TPAB:2EG, TPAB; EG, TPAB:2G); Suhu 25°C, Waktu 30 menit, Kecepatan pengadukan 400 RPM	Kelebihan : Efisiensi ekstraksi maksimum sebesar 81%, 77%, dan 72% diperoleh masing-masing dengan TBAB:2EG, TPAB:3EG, dan TPAB:2G. Analisis TGA menunjukkan penurunan berat yang besar sebesar 61%, 56%, 70% untuk TBAB:2EG, TPAB:3EG, TPAB:2G, masing-masing, pada kisaran suhu 210°C-450°C. Kekurangan : Ketahanan termalnya rendah dan dibutuhkan proses preparasi pelarut
(Chang dkk., 2020)	2020	Fotokatalitik Oksidasi Desulfurisasi	Bahan bakar model adalah DBT yang dilarutkan dalam n-oktana; Katalis AgCl/PbMoO ₄ ; Oksidan H ₂ O ₂ ; Percobaan dengan radiasi Cu K α	Kelebihan: Hasilnya menunjukkan bahwa pembebanan AgCl menyebabkan pergeseran merah pada tepi serapan PbMoO ₄ , yang meningkatkan aktivitas fotokatalitik material. Pada saat loading AgCl 25,0%, jumlah katalis

Ref	Tahun	Metode	Bahan dan Kondisi Operasi	Hasil Penelitian
				1,5 g/L, dan waktu penyinaran <i>visible light</i> 2,0 jam, laju desulfurisasi DBT tertinggi mencapai 97,0%. Kekurangan : Dibutuhkan banyak bahan dan proses preparasi katalis serta penggunaan oksidan
(Beshtar dkk., 2024)	2024	Fotokatalitik Oksidasi Desulfurisasi	Bahan bakar model adalah DBT yang dilarutkan n-oktana dengan kandungan 250 ppm; Katalis Fe_yMo_x/CeO_2 ; Suhu 50°C, Dosis fotokatalis 2g/L; Waktu 120 menit, Sinar Xenon 300 W	Kelebihan: Konversi DBT dapat tercapai 100% yang dideteksi dengan panjang gelombang 325 nm dengan analisa spektrum UV-vis Kekurangan : Waktu reaksinya yang lama dan dibutuhkan proses preprasi katalis
(Chitgar dkk., 2024)	2024	Fotokatalitik Oksidasi Desulfurisasi	Bahan bakar model menggunakan DBT yang dilarutkan dalam n-oktana; Katalis BiOI/B ₄ C; Sumber sinar Osram 400 W; Waktu reaksi 30 menit.	Kelebihan: Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposit optimal mencapai kinerja degradasi dibenzothiophene tertinggi dengan nilai 95,1% dalam waktu 30 menit.

Ref	Tahun	Metode	Bahan dan Kondisi Operasi	Hasil Penelitian
				Kekurangan : Kesulitan dalam proses preparasi katalis, multi langkah dan adanya penambahan oksidan yang korosif
(Shinozaki dkk., 2022)	2022	Desulfurisasi dengan UV	Bahan bakar model menggunakan senyawa sulfur yang dilarutkan dalam sikloheksana; Sumber sinar UV panjang gelombang 254 8 W; Suhu 25°C	Kelebihan : BT dan DBT terurai sempurna masing-masing dalam waktu sekitar 8 jam dan 16 jam. Kekurangan: Hasil endapan menggunakan analisa XRF menunjukkan BT dan DBT menghasilkan endapan sulfur dalam bentuk alotrop (Sn) sebanyak 88% dengan berat 46 µg. Kekurangan : Penggunaan jenis sinar yang berbahaya bagi mata manusia dan perlu kehati-hatian dalam prosesnya serta prosesnya belum menggunakan minyak bahan bakar asli dari industri

1.3. Tujuan

Energi sinar bebas polusi, murah, ramah lingkungan, dan tidak ada habisnya dengan potensi penerapan industri. Oleh karena itu, pemanfaatan sinar secara efisien dan efektif telah menjadi salah satu topik penelitian paling aktif. Faktanya, hubungan antara penggunaan sinar dan kelestarian lingkungan telah dilaporkan sejak awal abad ke-20, ketika ahli foto-kimia organik terkenal asal Italia, Ciamician, menunjukkan bahwa masa depan sintesis kimia industri adalah masa depan yang rendah pemeliharaan, ramah lingkungan dan hemat energi (Lewis, 2007; Morton, 2006; Nocera, 2006).

Reaksi fotokimia berenergi rendah akan menggantikan proses sintesis energi tinggi tradisional yang ramah lingkungan. Pada awal abad ke-20, ahli fotokimia menemukan bahwa sumber sinar dapat terlibat dalam reaksi kimia organik sebagai sumber energi bersih yang tidak ada habisnya. Reaksi fotokimia organik klasik biasanya menggunakan sinar ultraviolet berenergi tinggi untuk memulai reaksi. Namun kandungan sinar ultraviolet pada sinar matahari tergolong rendah. Selain itu, generator UV umumnya menggunakan sinar xenon bertekanan tinggi atau sinar merkuri yang harganya relatif mahal. Peningkatan skala reaksi sulit dilakukan karena keterbatasan sumber sinar yang membatasi penerapan sintesis organik fotokatalitik dalam industri. Oleh karena itu, untuk penggunaan penuh *visible light* dari sinar matahari (sekitar 46%), reaksi fotokimia organik yang dikatalisis oleh *visible light* yang efisien, banyak digunakan dalam sintesis industri, telah dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir (Lewis, 2007).

Proses desulfurisasi telah banyak diaplikasikan pada *visible light*, sebagaimana dibuktikan oleh penelitian Ding dkk., yang mempelajari efek iradiasi sinar tampak pada desulfurisasi oksidatif. Tiga jenis batubara (SM, YYH, dan GZ) dan empat senyawa model sulfur dipilih sebagai subjek penelitian. Dampak dari berbagai waktu penyinaran (30, 60, 90, dan 120 menit) dan daya sumber sinar (150, 220, dan 300 watt) terhadap desulfurisasi batubara diperiksa. Temuan menunjukkan bahwa dalam batubara: Laju desulfurisasi SM, YYH, dan GZ dapat mencapai maksimum 27,97%, 56,28%, dan 66,22%, masing-masing, ketika H₂O₂ digunakan

dalam rasio 1: 5 (g: mL), dengan daya sumber sinar 220 W dan waktu penyinaran 60 menit (Ding dkk., 2023).

Visible light juga telah banyak diterapkan direaksi kopling yang dikatalisis *metal* seperti paladium (Dong dkk., 2023). Penelitian Yu dkk mengungkapkan reaksi Heck yang dikatalisis paladium yang diinduksi *visible light* antara vinil bromida internal yang difungsikan S,S dan stirena (LiY dkk., 2021). Dalam reaksi ini, berbagai produk dengan hasil sedang hingga sangat baik diisolasi dalam kondisi ringan. Produk diena yang dihasilkan selanjutnya dapat dikonversi menjadi turunan furan tersubstitusi trisubstitusi yang sangat fungsional.

Salah satu sinar dari jenis *visible light* yang menarik perhatian adalah *red light* yang sudah digunakan diberbagai proses yang memberikan efek berarti. Pada proses fotopolimerisasi, *visible light* seperti *orange light* dan *red light* memberikan peningkatan penetrasi ikatan serta efisiensi inisiasi yang tinggi dan memberikan biaya proses yang rendah (Koay dkk., 2024). *Visible light* menyebabkan reaksi kimia yang berlangsung dalam kondisi ringan dibandingkan sinar UV (Koo dkk., 2021). *Red light* pada fotokatalis mampu mencegah terjadinya produk samping yang tidak diinginkan (Gisbertz dkk., 2020; Ravetz dkk., 2019; Sellet dkk., 2021).

Red light mulai mendapat perhatian dari ahli kimia organik sebagai sumber energi untuk reaksi organik karena keamanannya. Selain pengambilan oksigen singlet yang banyak digunakan (Ghogare dan Greer, 2016; Pibiri dkk., 2018), transformasi organik yang dimediasi *red light* yang melibatkan mekanisme fotoredoks atau transfer muatan intramolekul sudah mulai diteliti (Buksh dkk., 2022; Rybicka-Jasińska dkk., 2022; Zeng dkk., 2023). Ogura dkk. melakukan penelitian tentang reaksi Barton – McCombie yang dimediasi sinar merah (Ogura dkk., 2020). Hasil penelitian menunjukkan dengan adanya klorofil a sebagai katalis dan *tris(trimetilsilil)silana* atau ester Hantzsch sebagai sumber hidrogen, gugus metil *xantat* dihilangkan dengan iradiasi sinar merah. Mekanisme reaksinya mungkin melalui pembentukan kompleks antara substrat dan fotokatalis, diikuti dengan transfer muatan (Seal dkk., 2019). Kondisi operasi yang digunakan dianggap lebih aman dan lebih ringan dibandingkan kondisi operasional konvensional.

Yamamoto dkk. melakukan penelitian terbarunya mengenai reaksi dekarboksilasi Barton yang dibantu oleh *red light*. Penelitiannya menjelaskan dekarboksilasi Barton yang dimediasi sinar merah menggunakan *red-light emitting diodes* (LED) 4W yang tersedia sebagai sumber energi dan seng tetrafenilporfirin sebagai katalis, serta menghindari reagen yang mudah meledak atau berbahaya atau pemanasan eksternal. Studi mekanistik menunjukkan bahwa reaksi mungkin berlangsung melalui transfer energi Dexter antara katalis aktif dan ester Barton. Selain itu, reaksi selektif panjang gelombang satu pot dalam rentang *visible light* dikembangkan dalam kombinasi dengan reaksi fotoredoks yang dimediasi sinar biru, yang menunjukkan kompatibilitas dua transformasi fotokimia berdasarkan perbedaan mekanistik. Proses satu pot ini memperluas batas reaksi dekarboksilatif Giese melampaui pencocokan polaritas (Yamamoto dkk., 2023).

Sebagaimana dibuktikan oleh uraian tersebut di atas, *visible red light* dapat digunakan dalam reaksi kimia dengan kondisi operasi minimal, dan menghasilkan hasil yang memuaskan. Selain itu, sinar merah telah digunakan dalam berbagai proses berbasis hidrokarbon, termasuk polimerisasi, dekarboksilasi, dan reaksi lainnya. Selain sinar merah, penelitian ini juga akan mengkaji penggunaan *metal* sebagai *support* pada energi sinar yang digunakan. Penggunaan akan memungkinkan terjadinya efek fotolistrik yang akan memberikan fenomena tumbukan foton pada permukaan suatu zat (*metal* padat) untuk merangsang elektron dimana akan membantu sinar untuk mengekstansi larutan sulfur yang ada pada minyak diesel (Qian, 2023). Penjabaran – penjabaran yang telah diutarakan diatas dapat disusun menjadi tujuan penelitian ini dengan dirumuskan sebagai berikut:

- 1) Merekayasa proses desulfurisasi minyak diesel yang lebih sederhana daripada proses desulfurisasi konvensional
- 2) Mengkaji proses desulfurisasi minyak diesel dengan menggunakan *visible red light* agar dapat berlangsung pada proses dengan kondisi operasi yang rendah dalam menurunkan kandungan sulfur.
- 3) Mengidentifikasi pengaruh *metal* terhadap penurunan sulfur pada proses desulfurisasi dengan *visible red light*.

1.4. Keterbaruan (*Novelty*)

Penelitian ini memiliki beberapa keterbaruan antara lain:

- 1). Penggunaan sinar merah dalam proses desulfurisasi minyak diesel merupakan pendekatan baru yang belum pernah diteliti secara ilmiah, bahkan dalam konteks pengurangan sulfur secara keseluruhan pada beragam jenis sampel.
- 2). Potensi *metal* sebagai pendukung sinar merah dalam proses reaksi yang memanfaatkan sinar langsung, termasuk desulfurisasi dan reaksi kimia lainnya, masih belum diteliti.

1.5. Ruang Lingkup

Agar penelitian tetap terfokus dengan tujuan penelitian, maka perlu ditetapkan ruang lingkup penelitian antara lain:

- 1). Bahan baku minyak diesel berasal dari PT Kilang Pertamina Internasional, RU III Plaju, Indonesia
- 2). Sinar merah berasal dari Dongguan Houke Electronic Co., Ltd
- 3). Variabel tetap penelitian ini adalah laju alir dan volume reaktor
- 4). Variabel bebas penelitian ini adalah daya sinar, waktu iradiasi dan tinggi katalis
- 5). Variabel terikat penelitian ini adalah hasil desulfurisasi dan hasil analisa FTIR

DAFTAR PUSTAKA

- Aazam, E.S. 2014. Visible light photocatalytic degradation of thiophene using Ag–TiO₂/multi-walled carbon nanotubes nanocomposite. *Ceramics International*. 40:5: 6705–6711.
- Abdelaal, M.Y., dan Mohamed, R.M. 2014. Environmental remediation from thiophene solution by photocatalytic oxidation using a Pd/ZrO₂–chitosan nanocomposite. *Ceramics International*. 40:6: 7693–7699.
- Abraham, M. 1909. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*. 28:1: 1–28.
- Aghbolagh, Z.S., Khorrami, M.R.K., dan Rahmatyan, M.S. 2022. Sum of ranking differences in studies on high performance of catalytic oxidative denitrogenation and desulfurization of model fuel using efficient organic–inorganic hybrid nanocatalyst. *Journal of the Iranian Chemical Society*. 19:1: 219–230.
- Ahmad, M.S., Lin, P.-H., Zhang, Q., Zeng, B., Wang, Q., dan Meguellati, K. 2023. Visible Light Induced C-H/N-H and C-X Bonds Reactions. *Reactions*. 4:1: 189–230.
- Ahmad, W., Ahmad, I., Ishaq, M., dan Ihsan, K. 2017. Adsorptive desulfurization of kerosene and diesel oil by Zn impregnated montmorillonite clay. *Arabian Journal of Chemistry*. 10: S3263–S3269.
- Ahmadian, M., dan Anbia, M. 2021. Oxidative Desulfurization of Liquid Fuels Using Polyoxometalate-Based Catalysts: A Review. *Energy & Fuels*. 35:13: 10347–10373.
- Ahmed, I., dan Jhung, S.H. 2016. Adsorptive desulfurization and denitrogenation using metal-organic frameworks. *Journal of Hazardous Materials*. 301: 259–276.
- AL-Hammadi, S.A., Al-Amer, A.M., dan Saleh, T.A. 2018. Alumina-carbon nanofiber composite as a support for MoCo catalysts in hydrodesulfurization reactions. *Chemical Engineering Journal*. 345: 242–251.

- Ali, M., Kimura, T., Suzuki, Y., Al-Saleh, M., Hamid, H., dan Inui, T. 2002. Hydrogen spillover phenomenon in noble metal modified clay-based hydrocracking catalysts. *Applied Catalysis A: General*. 227:1–2: 63–72.
- Alli, R.D., dan Kroon, M.C. 2018. Extraction of benzothiazole and thiophene from their mixtures with n-heptane using tetrahexylammonium bromide-based deep eutectic solvents as extractive denitrogenation and desulfurization agents. *Fluid Phase Equilibria*. 477: 1–11.
- AlQahtani, M.S., Knecht, S.D., Wang, X., Bilén, S.G., dan Song, C. 2020A. One-Step Low-Temperature Reduction of Sulfur Dioxide to Elemental Sulfur by Plasma-Enhanced Catalysis. *ACS Catalysis*. 10:9: 5272–5277.
- AlQahtani, M.S., Wang, X., Gray, J.L., Knecht, S.D., Bilén, S.G., dan Song, C. 2020B. Plasma-assisted catalytic reduction of SO₂ to elemental sulfur: Influence of nonthermal plasma and temperature on iron sulfide catalyst. *Journal of Catalysis*. 391:NA: 260–272.
- AlQahtani, M.S., Wang, X., Knecht, S.D., Bilén, S.G., dan Song, C. 2021. Plasma-enhanced catalytic reduction of SO₂: Decoupling plasma-induced surface reaction from plasma-phase reaction. *Applied Catalysis B: Environmental*. 286:NA: 119852.
- Alsaggaf, W.T., dan El-Hout, S.I. 2023. Promoted visible-light-driven oxidative desulfurization of thiophene over mesoporous PdO-incorporated BaSnO₃ nanocomposites. *Journal of Molecular Liquids*. 383: 122102.
- Amato, F., Cassee, F.R., Denier van der Gon, H.A.C., Gehrig, R., Gustafsson, M., Hafner, W., Harrison, R.M., Jozwicka, M., Kelly, F.J., Moreno, T., Prevot, A.S.H., Schaap, M., Sunyer, J., dan Querol, X. 2014. Urban air quality: The challenge of traffic non-exhaust emissions. *Journal of Hazardous Materials*. 275: 31–36.
- An, S. 2017. The Reaction Mechanisms of H₂S Decomposition into Hydrogen and Sulfur: Application of Classical and Biological Thermodynamics. *Journal of Thermodynamics & Catalysis*. 08:02.
- Andreasen, A., dan Mayer, S. 2007. Use of Seawater Scrubbing for SO₂ Removal from Marine Engine Exhaust Gas. *Energy & Fuels*. 21:6: 3274–3279.

- Andrews, S.S. 2023. *Light and Waves*, Light and Waves. Springer International Publishing: Cham.
- Ania, C.O., dan Bandosz, T.J. 2005. Importance of Structural and Chemical Heterogeneity of Activated Carbon Surfaces for Adsorption of Dibenzothiophene. *Langmuir*. 21:17: 7752–7759.
- Anku, W.W., Oppong, S.O.-B., Shukla, S.K., Agorku, E.S., dan Govender, P.P. 2016. Palladium-doped–ZrO₂–multiwalled carbon nanotubes nanocomposite: an advanced photocatalyst for water treatment. *Applied Physics A*. 122:6: 579.
- Aquilas, N.A., dan Atemnkeng, J.T. 2022. Climate-related development finance and renewable energy consumption in greenhouse gas emissions reduction in the Congo basin. *Energy Strategy Reviews*. 44: 100971.
- Arbab, A.I. 2016. Propagation of photons in a medium and refractive index. *Optik*. 127:22: 10758–10765.
- Arcibar-Orozco, J.A., dan Rangel-Mendez, J.R. 2013. Model diesel denitrogenation by modified activated carbon with iron nanoparticles: Sulfur compounds effect. *Chemical Engineering Journal*. 230: 439–446.
- Arellano, U., Wang, J.A., Timko, M.T., Chen, L.F., Paredes Carrera, S.P., Asomoza, M., González Vargas, O.A., dan Llanos, M.E. 2014. Oxidative removal of dibenzothiophene in a biphasic system using sol–gel FeTiO₂ catalysts and H₂O₂ promoted with acetic acid. *Fuel*. 126: 16–25.
- Arif, M., Min, Z., Yuting, L., Yin, H., dan Liu, X. 2019. A Bi₂WO₆-based hybrid heterostructures photocatalyst with enhanced photodecomposition and photocatalytic hydrogen evolution through Z-scheme process. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 69:NA: 345–357.
- Ashok, B., Kumar, A.N., Jacob, A., dan Vignesh, R. 2022. Emission formation in IC engines., in: NO_x Emission Control Technologies in Stationary and Automotive Internal Combustion Engines. Elsevier, hal. 1–38.
- Asimov, A. 1964. *Asimov's Biographical Encyclopedia of Science and Technology*. Doubleday: New York.
- Aspect, A. 2017. From Huygens' waves to Einstein's photons: Weird light. *Comptes Rendus. Physique*. 18:9–10: 498–503.

- Atanasova, P., Halachev, T., Uchytel, J., dan Kraus, M. 1988. Effect of phosphorus on the surface concentration of molybdenum and nickel in the oxide form of nickel—molybdenum/alumina catalysts and on their hydrodesulphurization activity. *Applied Catalysis*. 38:2: 235–240.
- Aziz, F.F.A., Jalil, A.A., Triwahyono, S., dan Mohamed, M. 2018. Controllable structure of fibrous SiO₂–ZSM-5 support decorated with TiO₂ catalysts for enhanced photodegradation of paracetamol. *Applied Surface Science*. 455:NA: 84–95.
- Babich, I. 2003. Science and technology of novel processes for deep desulfurization of oil refinery streams: a review*. *Fuel*. 82:6: 607–631.
- Bae, C., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, Y., Woo, J.-H., dan Kim, S. 2020. Updating Chinese SO₂ emissions with surface observations for regional air-quality modeling over East Asia. *Atmospheric Environment*. 228:NA: 117416.
- Bai, Y., Wang, P.-Q., Liu, J.-Y., dan Liu, X.-J. 2014. Enhanced photocatalytic performance of direct Z-scheme BiOCl–g-C₃N₄ photocatalysts. *RSC Advances*. 4:37: 19456.
- Balzani, V., Credi, A., dan Venturi, M. 2008. Photochemical Conversion of Solar Energy. *ChemSusChem*. 1:1–2: 26–58.
- Ban, Z., Zhang, J., Wang, S., dan Wu, D. 2004. Direct Reduction of SO₂ to Elemental Sulfur by the Coupling of Cold Plasma and Catalyst (I). *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 43:17: 5000–5005.
- Barnett, S.M., dan Loudon, R. 2010. The enigma of optical momentum in a medium. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 368:1914: 927–939.
- Behar-Cohen, F., Martinsons, C., Viénot, F., Zissis, G., Barlier-Salsi, A., Cesarini, J.P., Enouf, O., Garcia, M., Picaud, S., dan Attia, D. 2011. Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: Any risks for the eye?. *Progress in Retinal and Eye Research*. 30:4: 239–257.
- Behie, K., A., L., dan Kunal. 2004. CS₂ Formation in the Claus Reaction Furnace: A Kinetic Study of Methane–Sulfur and Methane–Hydrogen Sulfide Reactions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 43:13: 3304–3313.

- Bertleff, B., Claußnitzer, J., Korth, W., Wasserscheid, P., Jess, A., dan Albert, J. 2017. Extraction Coupled Oxidative Desulfurization of Fuels to Sulfate and Water-Soluble Sulfur Compounds Using Polyoxometalate Catalysts and Molecular Oxygen. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 5:5: 4110–4118.
- Beshtar, M., Khorasheh, F., Larimi, A., dan Akbar Asgharinezhad, A. 2024. Photocatalytic oxidative desulfurization of model fuel using iron-molybdenum nanocatalyst based on cerium oxide (Fe₂Mox/CeO₂) under visible light. *Fuel*. 360: 130549.
- Bhutto, A.W., Abro, R., Gao, S., Abbas, T., Chen, X., dan Yu, G. 2016A. Oxidative desulfurization of fuel oils using ionic liquids: A review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 62: 84–97.
- Bhutto, A.W., Abro, R., Gao, S., Abbas, T., Chen, X., dan Yu, G. 2016B. Oxidative desulfurization of fuel oils using ionic liquids: A review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 62:NA: 84–97.
- Bishop, G.A., dan Stedman, D.H. 2008. A Decade of On-road Emissions Measurements. *Environmental Science & Technology*. 42:5: 1651–1656.
- Booth, M., Buglass, J.G., dan Unsworth, J.F. 2001. Tailoring Fuels for the New Millennium. *Topics in Catalysis*. 16:1: 39–46.
- Born, M., dan Jordan, P. 1925. Zur Quantenmechanik. *Zeitschrift für Physik*. 34:1: 858–888.
- Born, M., dan Wolf, E. 2020. Introduction., in: Principles of Optics. Cambridge University Press.
- Bradford, A., dan Briggs, B. 2022. Acid Rain: Causes, Effects and Solutions *Live Science*. <https://www.livescience.com/63065-acid-rain.html>.
- British Petroleum. 2021. *Statistical Review of world energy*. British Petroleum.
- Buksh, B.F., Knutson, S.D., Oakley, J. V., Bissonnette, N.B., Oblinsky, D.G., Schwoerer, M.P., Seath, C.P., Geri, J.B., Rodriguez-Rivera, F.P., Parker, D.L., Scholes, G.D., Ploss, A., dan MacMillan, D.W.C. 2022. μ Map-Red: Proximity Labeling by Red Light Photocatalysis. *Journal of the American Chemical Society*. 144:14: 6154–6162.

- Bunker, P.R., Mills, I.M., dan Jensen, P. 2019. The Planck constant and its units. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 237: 106594.
- Burkholder, J.B., dan Øivind, H. 2022. Annex: summary of abundances, lifetimes, ODPs, REs, GWPs, and GTPs., in: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022 278. World Meteorological Organization: Geneva.
- Busenberg, E., dan Plummer, L.N. 2000. Dating young groundwater with sulfur hexafluoride: Natural and anthropogenic sources of sulfur hexafluoride. *Water Resources Research*. 36:10: 3011–3030.
- Butto, N. 2021. The Origin and Nature of the Planck Constant. *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*. 07:01: 324–332.
- C40 Cities. 2017. *Mayors of 12 Pioneering Cities Commit to Create Green and Healthy Streets*. C40 Cities.
- Cai, L., Li, Yanwei, Li, Yanhui, Wang, H., Yu, Y., Liu, Y., dan Duan, Q. 2018. Synthesis of zincphthalocyanine-based conjugated microporous polymers with rigid-linker as novel and green heterogeneous photocatalysts. *Journal of Hazardous Materials*. 348:NA: 47–55.
- Calvert, J.G., Orlando, J.J., Stockwell, W.R., dan Wallington, T.J. 2015. *The Mechanisms of Reactions Influencing Atmospheric Ozone*. Oxford University Press: New York.
- Campagna, S., Puntoriero, F., Nastasi, F., Bergamini, G., dan Balzani, V. 2007. Photochemistry and Photophysics of Coordination Compounds: Ruthenium., in: Photochemistry and Photophysics of Coordination Compounds I. Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, hal. 117–214.
- Campos-Martin, J.M., dan Capel-Sanchez, M.C. 2021. Catalytic Oxidative Desulfurization of Liquid Fuels. hal. 143–174.
- Chandra Srivastava, V. 2012. An evaluation of desulfurization technologies for sulfur removal from liquid fuels. *RSC Adv*. 2:3: 759–783.
- Chang, H., Yi, H., Ke, Q., dan Zhang, J. 2020. Preparation of a AgCl/PbMoO₄ Composite and Investigation of Its Photocatalytic Oxidative Desulfurization Performance. *ACS Omega*. 5:19: 10927–10938.
- Chen, C.-L., Wang, C.-H., dan Weng, H.-S. 2004. Supported transition-metal oxide

- catalysts for reduction of sulfur dioxide with hydrogen to elemental sulfur. *Chemosphere*. 56:5: 425–431.
- Chen, D., Feng, H., dan Li, J. 2012. Graphene Oxide: Preparation, Functionalization, and Electrochemical Applications. *Chemical Reviews*. 112:11: 6027–6053.
- Chen, L., dan Yuan, Z.-Y. 2022. Design strategies of supported metal-based catalysts for efficient oxidative desulfurization of fuel. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 108: 1–14.
- Chen, S., Zang, M., Li, L., Chen, J., Liu, Q., Feng, X., Sun, S., Zang, C., dan Zhao, C. 2021. Efficient biodesulfurization of diesel oil by *Gordonia* sp. SC-10 with highly hydrophobic cell surfaces. *Biochemical Engineering Journal*. 174: 108094.
- Chen, X., Yuan, S., Abdeltawab, A.A., Al-Deyab, S.S., Zhang, J., Yu, L., dan Yu, G. 2014. Extractive desulfurization and denitrogenation of fuels using functional acidic ionic liquids. *Separation and Purification Technology*. 133: 187–193.
- Chen, Y., Shen, C., Wang, J., Xiao, G., dan Luo, G. 2018. Green Synthesis of Ag–TiO₂ Supported on Porous Glass with Enhanced Photocatalytic Performance for Oxidative Desulfurization and Removal of Dyes under Visible Light. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 6:10: 13276–13286.
- Chiang, T.-Y., Yuan, T.-H., Shie, R.-H., Chen, C.-F., dan Chan, C.-C. 2016. Increased incidence of allergic rhinitis, bronchitis and asthma, in children living near a petrochemical complex with SO₂ pollution. *Environment International*. 96: 1–7.
- Chitgar, A., Shabanian, S.R., Dashtpeyma, G., dan Nikzad, M. 2024. Optimizing photocatalytic oxidative desulfurization using novel BiOI/B₄C heterojunction in the presence of air and visible-light irradiation through response surface methodology (RSM). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 132: 182–200.
- Climate Action Tracker. 2021. *Warming Projections Global Update*. Climate Action Tracker.
- Cofala, J., Amann, M., Gyarfas, F., Schoepp, W., Boudri, J., Hordijk, L., Kroeze,

- C., Junfeng, L., Lin, D., Panwar, T., dan Gupta, S. 2004. Cost-effective control of SO₂ emissions in Asia. *Journal of Environmental Management*. 72:3: 149–161.
- Collet, S., Minoura, H., Kidokoro, T., Sonoda, Y., Kinugasa, Y., dan Karamchandani, P. 2014. Evaluation of light-duty vehicle mobile source regulations on ozone concentration trends in 2018 and 2030 in the western and eastern United States. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 64:2: 175–183.
- Commission Regulation. 2016. 2016/427 of 10 March 2016 amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6) (Text with EEA relevance). *Official Journal of The European Union*. 59: 1–98.
- Coronado, M.A., Montero, G., García, C., Valdez, B., Ayala, R., dan Pérez, A. 2017. Quality assessment of biodiesel blends proposed by the new Mexican policy framework. *Energies*. 10:5.
- Cottrell, T.L. 1958. *The Strengths of Chemical Bonds (2nd ed.)*. Butterworths: London.
- Crippa, M., Janssens-Maenhout, G., Dentener, F., Guizzardi, D., Sindelarova, K., Muntean, M., Van Dingenen, R., dan Granier, C. 2016. Forty years of improvements in European air quality: regional policy-industry interactions with global impacts. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 16:6: 3825–3841.
- Dadashi-Silab, S., Lorandi, F., DiTucci, M.J., Sun, M., Szczepaniak, G., Liu, T., dan Matyjaszewski, K. 2021. Conjugated Cross-linked Phenothiazines as Green or Red Light Heterogeneous Photocatalysts for Copper-Catalyzed Atom Transfer Radical Polymerization. *Journal of the American Chemical Society*. 143:25: 9630–9638.
- Dai, X., Xu, X., dan Li, X. 2013. Applications of Visible Light Photoredox Catalysis in Organic Synthesis. *Chinese Journal of Organic Chemistry*. 33:10: 2046.
- Dashtpeyma, G., dan Shabaniyan, S.R. 2023. Efficient photocatalytic oxidative desulfurization of liquid petroleum fuels under visible-light irradiation using a

- novel ternary heterogeneous BiVO₄-CuO/modified natural clinoptilolite zeolite. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 445: 115024.
- Datta, A., Cavell, R.G., Tower, R.W., dan George, Z.M. 1985. Claus catalysis. 1. Adsorption of sulfur dioxide on the alumina catalyst studied by FTIR and EPR spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry*. 89:3: 443–449.
- de Gouw, J.A., Parrish, D.D., Frost, G.J., dan Trainer, M. 2014. Reduced emissions of CO_2 , NO_x , and SO_2 from U.S. power plants owing to switch from coal to natural gas with combined cycle technology. *Earth's Future*. 2:2: 75–82.
- de Lima, F.M., de Andrade Borges, T., Braga, R.M., de Araújo Melo, D.M., dan Martinelli, A.E. 2018. Sulfur removal from model fuel by Zn impregnated retorted shale and with assistance of design of experiments. *Environmental Science and Pollution Research*. 25:14: 13760–13774.
- Dehghan, R., dan Anbia, M. 2017. Zeolites for adsorptive desulfurization from fuels: A review. *Fuel Processing Technology*. 167: 99–116.
- Demuyneck, J., Favre, C., Bosteels, D., Hamje, H., dan Andersson, J. 2017. Real-world emissions measurements of a gasoline direct injection vehicle without and with a gasoline particulate filter.
- Deng, J., Lei, C., Xiao, Y., Cao, K., Ma, L., Wang, W., dan Laiwang, B. 2018. Determination and prediction on “three zones” of coal spontaneous combustion in a gob of fully mechanized caving face. *Fuel*. 211:NA: 458–470.
- Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. 2006. *Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi No 3675 K/24/DJM/2006 Tentang Standar dan Mutu (Spesifikasi) Bahan Bakar Minyak Jenis Minyak Solar yang Dipasarkan di Dalam Negeri*. Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.
- Ding, N., Li, M., Yue, J., Cheng, S., Xu, S., dan Xu, R. 2023. Mechanism of sulfur removal from high sulfur coal by visible light assisted oxidation system. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 43:6: 1076–1097.
- Dirac, P.A.M. 1930. *The Principles of Quantum Mechanics*. Oxford University

- Press: Oxford.
- Directorate General for Environment, E.U. 2009. *Directive 2009/30/EC of The European Parliament and of The Council*. European Union.
- Do, M.T.H. 2019. Melanopsin and the Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cells: Biophysics to Behavior. *Neuron*. 104:2: 205–226.
- Dong, D.-Q., Tian, B.-L., Yang, H., Wei, Z.-H., Yang, S.-H., Zhou, M.-Y., Ding, C.-Z., Wang, Y.-L., Gao, J.-H., Wang, S.-J., Yang, W.-C., Liu, B.-T., dan Wang, Z.-L. 2023. Visible light induced palladium-catalyzed reactions involving halogenated hydrocarbon (RX). *Molecular Catalysis*. 541: 113073.
- Dubey, N., Rayalu, S.S., Labhsetwar, N.K., Naidu, R.R., Chatti, R. V., dan Devotta, S. 2006. Photocatalytic properties of zeolite-based materials for the photoreduction of methyl orange. *Applied Catalysis A: General*. 303:2: 152–157.
- Dutta, B.K. 2007. *Principles of Mass Transfer and Seperation Processes*. PHI Leaning Pvt. Ltd: New Delhi.
- EDGAR. 2022. *Community GHG Database version 7.0, European Commission*. EDGAR.
- Edwards, M.R., Klemun, M.M., Kim, H.C., Wallington, T.J., Winkler, S.L., Tamor, M.A., dan Trancik, J.E. 2017. Vehicle emissions of short-lived and long-lived climate forcers: trends and tradeoffs. *Faraday Discussions*. 200: 453–474.
- EEA. 2017. *Air quality in Europe 2017*. EEA.
- Einstein, A. 1905. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*. 322:6: 132–148.
- EPA. 2024. *National Air Quality: Status and Trends of Key Air Pollutants*. United States Enviromental Protection Agency.
- Eßer, J., Wasserscheid, P., dan Jess, A. 2004. Deep desulfurization of oil refinery streams by extraction with ionic liquids. *Green Chem*. 6:7: 316–322.
- European Commission. 2022. *Review of the EU F-gas regulation and the new commission proposal*. European Commission.
- European Commission. 2017. *Air Quality Standards*. European Commission.

- Fan, B., Zhang, C., Chi, J., Liang, Y., Bao, X., Cong, Y., Yu, B., Li, X., dan Li, G.-Y. 2022. The Molecular Mechanism of Retina Light Injury Focusing on Damage from Short Wavelength Light. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2022: 1–14.
- Fang, X., Hu, X., Janssens-Maenhout, G., Wu, J., Han, J., Su, S., Zhang, J., dan Hu, J. 2013. Sulfur Hexafluoride (SF₆) Emission Estimates for China: An Inventory for 1990–2010 and a Projection to 2020. *Environmental Science & Technology*. 47:8: 3848–3855.
- Fang, X., Thompson, R.L., Saito, T., Yokouchi, Y., Kim, J., Li, S., Kim, K.R., Park, S., Graziosi, F., dan Stohl, A. 2014. Sulfur hexafluoride (SF₆) emissions in East Asia determined by inverse modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 14:9: 4779–4791.
- Faria, R.G., Silva, D., Mirante, F., Gago, S., Cunha-Silva, L., dan Balula, S.S. 2024. Advanced Technologies Conciliating Desulfurization and Denitrogenation to Prepare Clean Fuels. *Catalysts*. 14:2: 137.
- Feng, T., Zhou, P., Zhao, X., Li, L., Xia, X., Zhang, S., Li, J., Wang, L., dan Ma, C. 2019. Sulfur Evolution Reaction during Reduction of SO₂ with CO over Carbon Materials. *Energy & Fuels*. 33:8: 7491–7499.
- Flagiello, D., Di Natale, F., Erto, A., dan Lancia, A. 2020. Wet oxidation scrubbing (WOS) for flue-gas desulphurization using sodium chlorite seawater solutions. *Fuel*. 277:NA: 118055.
- Fraile, J.M., Gil, C., Mayoral, J.A., Muel, B., Roldán, L., Vispe, E., Calderón, S., dan Puente, F. 2016. Heterogeneous titanium catalysts for oxidation of dibenzothiophene in hydrocarbon solutions with hydrogen peroxide: On the road to oxidative desulfurization. *Applied Catalysis B: Environmental*. 180: 680–686.
- Fredricks, M.A., Drees, M., dan Köhler, K. 2010. Acceleration of the Rate of the Heck Reaction through UV- and Visible-Light-Induced Palladium(II) Reduction. *ChemCatChem*. 2:11: 1467–1476.
- Gadipelli, S., dan Guo, Z.X. 2015. Graphene-based materials: Synthesis and gas sorption, storage and separation. *Progress in Materials Science*. 69: 1–60.

- Gao, Fu, F., Zhang, L.-P., dan Li, W.-H. 2013A. The preparation of Ag–BiVO₄ metal composite oxides and its application in efficient photocatalytic oxidative thiophene. *Physica B: Condensed Matter*. 419: 80–85.
- Gao, J., Li, H., Zhang, H., Lu, Y., Meng, H., dan Li, C. 2012. Removal Mechanism of Thiophenic Compounds in Model Oil by Inorganic Lewis Acids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 51:12: 4682–4691.
- Gao, Meng, H., Lu, Y., Zhang, H., dan Li, C. 2013B. A carbonium pseudo ionic liquid with excellent extractive desulfurization performance. *AIChE Journal*. 59:3: 948–958.
- Gao, S., Li, J., Chen, X., Abdeltawab, A.A., Yakout, S.M., dan Yu, G. 2018. A combination desulfurization method for diesel fuel: Oxidation by ionic liquid with extraction by solvent. *Fuel*. 224:NA: 545–551.
- Gao, S., Yu, Y., Li, Y., Zhang, J., Zou, J., Yao, S., dan Chen, X. 2024. Efficient oxidative desulfurization of dibenzothiophene using molybdenum-based catalysts loaded the functionalized UiO-66. *Journal of Solid State Chemistry*. 332: 124587.
- García-Gutiérrez, J.L., Fuentes, G.A., Hernández-Terán, M.E., Murrieta, F., Navarrete, J., dan Jiménez-Cruz, F. 2006. Ultra-deep oxidative desulfurization of diesel fuel with H₂O₂ catalyzed under mild conditions by polymolybdates supported on Al₂O₃. *Applied Catalysis A: General*. 305:1: 15–20.
- Gary, J.H., Handwerk, J.H., Kaiser, M.J., dan Geddes, D. 2007. *Petroleum Refining*. CRC Press.
- Gavenas, E., Rosendahl, K.E., dan Skjerpen, T. 2015. CO₂-emissions from Norwegian oil and gas extraction. *Energy*. 90: 1956–1966.
- Ge, T., Zuo, C., Wei, L., dan Li, C. 2018. Sulfur production from smelter off-gas using CO–H₂ gas mixture as the reducing agent over modified Fe/γ-Al₂O₃ catalysts. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 26:9: 1920–1927.
- Ghogare, A.A., dan Greer, A. 2016. Using Singlet Oxygen to Synthesize Natural Products and Drugs. *Chemical Reviews*. 116:17: 9994–10034.
- Gisbertz, S., Reischauer, S., dan Pieber, B. 2020. Overcoming limitations in dual photoredox/nickel-catalysed C–N cross-couplings due to catalyst deactivation.

- Nature Catalysis*. 3:8: 611–620.
- Glaser, F., dan Wenger, O.S. 2022. Red Light-Based Dual Photoredox Strategy Resembling the Z-Scheme of Natural Photosynthesis. *JACS Au*. 2:6: 1488–1503.
- Gondal, M.A., Siddiqui, M.N., dan Al-Hooshani, K. 2013. Removal of sulfur compounds from diesel using ArF laser and oxygen. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. 48:13: 1663–1669.
- Grange, S.K., Lewis, A.C., Moller, S.J., dan Carslaw, D.C. 2017. Lower vehicular primary emissions of NO₂ in Europe than assumed in policy projections. *Nature Geoscience*. 10:12: 914–918.
- Grigoratos, T., dan Martini, G. 2014. Non-exhaust traffic related emissions., in: Brake and tyre wear PM. Literature Review. JRC Report EUR 26648 EN.
- Guerreiro, C.B.B., Foltescu, V., dan de Leeuw, F. 2014. Air quality status and trends in Europe. *Atmospheric Environment*. 98: 376–384.
- Gunam, I.B.W., Sone, T., dan Asano, K. 2021. Biodesulfurization of the mixture of dibenzothiophene and its alkylated derivatives by *Sphingomonas subarctica* T7b. *Indonesian Journal of Biotechnology*. 26:3: 122.
- Guo, L., Yang, Y., Fraser, P.J., Velders, G.J.M., Liu, Z., Cui, D., Quan, J., Cai, Z., Yao, B., Hu, J., dan Fang, X. 2023. Projected increases in emissions of high global warming potential fluorinated gases in China. *Communications Earth & Environment*. 4:1: 205.
- Guo, X.L., dan Shi, H.S. 2008. Thermal treatment and utilization of flue gas desulphurization gypsum as an admixture in cement and concrete. *Construction and Building Materials*. 22:7: 1471–1476.
- Haimour, N., dan El-Bishtawi, R. 2007. Effects of Impurities in Claus Feed, II. CO 2. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 29:2: 169–178.
- Halliday, D., Resnick, R., dan Walker, J. 2013. *Fundamental of Physics*. John Wiley & Sons, Inc: Hoboken.
- Han, B., Li, W., Li, M., Liu, L., dan Song, J. 2020. Experimental study of

- combination emission gas and hot water from power plant for enhanced heavy oil recovery. *Energy Reports*. 6: 183–188.
- Han, G.B., Park, N.-K., dan Lee, T.J. 2009. Effect of O₂ on SO₂ Reduction with CO or H₂ over SnO₂–ZrO₂ Catalyst. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 48:23: 10307–10313.
- Han, G.B., Park, N.-K., Ryu, S.O., dan Lee, T.J. 2008A. Catalytic reduction of sulfur dioxide using hydrogen or carbon monoxide over Ce_{1-x}Zr_xO₂ catalysts for the recovery of elemental sulfur. *Catalysis Today*. 131:1–4: 330–338.
- Han, G.B., Park, N.-K., Yoon, S.H., dan Lee, T.J. 2008B. Investigation of Catalytic Reduction of Sulfur Dioxide with Carbon Monoxide over Zirconium Dioxide Catalyst for Selective Sulfur Recovery. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 47:5: 1427–1434.
- Han, G.B., Park, N.-K., Yoon, S.H., Lee, T.J., dan Han, G.Y. 2008C. Direct Reduction of Sulfur Dioxide to Elemental Sulfur with Hydrogen over Sn–Zr-Based Catalysts. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 47:14: 4658–4664.
- Han, X., Lin, H., dan Zheng, Y. 2015. Adsorptive denitrogenation and desulfurization of diesel using activated carbons oxidized by (NH₄)₂S₂O₈ under mild conditions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 93:3: 538–548.
- Han, Y., Zhang, Y., Xu, C., dan Hsu, C.S. 2018. Molecular characterization of sulfur-containing compounds in petroleum. *Fuel*. 221: 144–158.
- Handy, S., dan Lavender, K. 2013. Organic synthesis in deep eutectic solvents: Paal–Knorr reactions. *Tetrahedron Letters*. 54:33: 4377–4379.
- Hanif, M.A., Ibrahim, N., dan Abdul Jalil, A. 2020. Sulfur dioxide removal: An overview of regenerative flue gas desulfurization and factors affecting desulfurization capacity and sorbent regeneration. *Environmental Science and Pollution Research*. 27:22: 27515–27540.
- Hansmeier, A.R., Meindersma, G.W., dan de Haan, A.B. 2011. Desulfurization and denitrogenation of gasoline and diesel fuels by means of ionic liquids. *Green*

Chemistry. 13:7: 1907.

- Hari, D.P., dan König, B. 2013. The Photocatalyzed Meerwein Arylation: Classic Reaction of Aryl Diazonium Salts in a New Light. *Angewandte Chemie International Edition*. 52:18: 4734–4743.
- Harrison, R.M., Jones, A.M., Gietl, J., Yin, J., dan Green, D.C. 2012. Estimation of the Contributions of Brake Dust, Tire Wear, and Resuspension to Nonexhaust Traffic Particles Derived from Atmospheric Measurements. *Environmental Science & Technology*. 46:12: 6523–6529.
- Harrop, T.C., dan Mascharak, P.K. 2004. Fe(III) and Co(III) Centers with Carboxamido Nitrogen and Modified Sulfur Coordination: Lessons Learned from Nitrile Hydratase. *Accounts of Chemical Research*. 37:4: 253–260.
- Haruna, A., Merican, Z.M.A., dan Musa, S.G. 2022. Recent advances in catalytic oxidative desulfurization of fuel oil – A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 112: 20–36.
- Hasanbeik, N.Y., Pourmadadi, M., Ghadami, A., Yazdian, F., Rahdar, A., dan Kyzas, G.Z. 2022. Biodesulfurization of Dibenzothiophene by Decorating Rhodococcus erythropolis IGTS8 Using Montmorillonite/Graphitic Carbon Nitride. *Catalysts*. 12:11: 1450.
- Hassan, H.M.A., Mohamed, S.K., Ibrahim, A.A., Betiha, M.A., El-Sharkawy, E.A., dan Mousa, A.A. 2017. A comparative study of the incorporation of TiO₂ into MCM-41 nanostructure via different approaches and its effect on the photocatalytic degradation of methylene blue and CO oxidation. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. 120:2: 791–807.
- He, L., He, J., Cui, P., Feng, Y., Hua, M., Zhang, J., Wu, P., Zhu, W., Li, H., Liu, Z., dan Xu, C. 2023. Microporous boron nitride-based porous ionic liquid for enhanced extractive desulfurization of fuel. *Separation and Purification Technology*. 307: 122781.
- He, W.-L., dan Wu, C.-D. 2018. Incorporation of Fe-phthalocyanines into a porous organic framework for highly efficient photocatalytic oxidation of arylalkanes. *Applied Catalysis B: Environmental*. 234:NA: 290–295.
- Heidari, S., Haghighi, M., dan Shabani, M. 2018. Ultrasound assisted dispersion of

- Bi₂Sn₂O₇-C₃N₄ nanophotocatalyst over various amount of zeolite Y for enhanced solar-light photocatalytic degradation of tetracycline in aqueous solution. *Ultrasonics Sonochemistry*. 43:NA: 61–72.
- Hematpur, H., Mahmood, S.M., Nasr, N.H., dan Elraies, K.A. 2018. Foam flow in porous media: Concepts, models and challenges. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 53: 163–180.
- Hepburn, C. 2007. Carbon Trading: A Review of the Kyoto Mechanisms. *Annual Review of Environment and Resources*. 32:1: 375–393.
- Hernández-Uresti, D.B., Vázquez, A., Sanchez-Martinez, D., dan Obregón, S. 2016. Performance of the polymeric g-C₃N₄ photocatalyst through the degradation of pharmaceutical pollutants under UV–vis irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 324:NA: 47–52.
- Hertz, H. 1887A. Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung. *Annalen der Physik*. 267:8: 983–1000.
- Hertz, H. 1887B. Ueber sehr schnelle elektrische Schwingungen. *Annalen der Physik*. 267:7: 421–448.
- Heying, M.J., Nag, M., dan Jenks, W.S. 2008. Photochemistry of thiophene-S-oxide derivatives. *Journal of Physical Organic Chemistry*. 21:11: 915–924.
- Hill, G.R., dan Dougan, P. 1967. The Characteristics of a Low Temperature In Situ Shale Oil., in: All Days. SPE.
- Hitam, C.N.C., Jalil, A.A., dan Abdulrasheed, A.A. 2019. A review on recent progression of photocatalytic desulphurization study over decorated photocatalysts. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 74: 172–186.
- Hix, R.M., dan Lynn, S. 1991. Reactive adsorption of hydrogen sulfide by a solution of sulfur dioxide in poly(glycol ether): effect of a volatile dissolved reactant on mass-transfer enhancement. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 30:5: 930–939.
- Hoang, A.T., Foley, A.M., Nižetić, S., Huang, Z., Ong, H.C., Ölçer, A.I., Pham, V.V., dan Nguyen, X.P. 2022. Energy-related approach for reduction of CO₂ emissions: A critical strategy on the port-to-ship pathway. *Journal of Cleaner Production*. 355: 131772.

- Hoesly, R.M., Smith, S.J., Feng, L., Klimont, Z., Janssens-Maenhout, G., Pitkanen, T., Seibert, J.J., Vu, L., Andres, R.J., Bolt, R.M., Bond, T.C., Dawidowski, L., Kholod, N., Kurokawa, J., Li, M., Liu, L., Lu, Z., Moura, M.C.P., O'Rourke, P.R., dan Zhang, Q. 2018. Historical (1750–2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS). *Geoscientific Model Development*. 11:1: 369–408.
- Holechek, J.L., Geli, H.M.E., Sawalhah, M.N., dan Valdez, R. 2022. A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050?. *Sustainability*. 14:8: 4792.
- Holton, G. 1999. Centennial Focus: Millikan's Measurement of Planck's Constant. *Focus*. 3: 23.
- Höök, M., dan Tang, X. 2013. Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change—A review. *Energy Policy*. 52: 797–809.
- Hossain, M., Park, H., dan Choi, H. 2019. A Comprehensive Review on Catalytic Oxidative Desulfurization of Liquid Fuel Oil. *Catalysts*. 9:3: 229.
- Hosseini, A., Faghihian, H., dan Sanati, A.M. 2018. Elimination of dibenzothiophene from transportation fuel by combined photocatalytic and adsorptive method. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 87:NA: 110–118.
- Houda, S., Lancelot, C., Blanchard, P., Poinel, L., dan Lamonier, C. 2018. Oxidative Desulfurization of Heavy Oils with High Sulfur Content: A Review. *Catalysts*. 8:9: 344.
- Howie, P., dan Atakhanova, Z. 2022. Assessing initial conditions and ETS outcomes in a fossil-fuel dependent economy. *Energy Strategy Reviews*. 40: 100818.
- Hu, D., Li, H.-P., Mei, J.-L., Xiao, C.-K., Wang, E.-H., Chen, X.-Y., Zhang, W.-X., dan Duan, A.-J. 2022. The effect of chelating agent on hydrodesulfurization reaction of ordered mesoporous alumina supported NiMo catalysts. *Petroleum Science*. 19:1: 321–328.
- Hu, L., Ottinger, D., Bogle, S., Montzka, S.A., DeCola, P.L., Dlugokencky, E., Andrews, A., Thoning, K., Sweeney, C., Dutton, G., Aepli, L., dan Crotwell,

- A. 2023. Declining, seasonal-varying emissions of sulfur hexafluoride from the United States. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 23:2: 1437–1448.
- Huang, Y., Shen, H., Chen, H., Wang, R., Zhang, Y., Su, S., Chen, Y., Lin, N., Zhuo, S., Zhong, Q., Wang, X., Liu, J., Li, B., Liu, W., dan Tao, S. 2014. Quantification of Global Primary Emissions of PM 2.5 , PM 10 , and TSP from Combustion and Industrial Process Sources. *Environmental Science & Technology*. 48:23: 13834–13843.
- Hubbard, C.P., Anderson, J.E., dan Wallington, T.J. 2014. Ethanol and Air Quality: Influence of Fuel Ethanol Content on Emissions and Fuel Economy of Flexible Fuel Vehicles. *Environmental Science & Technology*. 48:1: 861–867.
- Hund, F. 1927. Zur Deutung der Molekelspektren. I. *Zeitschrift für Physik*. 40:10: 742–764.
- Ibrahim, M.H., Hayyan, M., Hashim, M.A., dan Hayyan, A. 2017. The role of ionic liquids in desulfurization of fuels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 76: 1534–1549.
- ICOS. 2021. *Data supplement to the Global Carbon Budget 2021*. ICOS.
- Inanloo, M., dan Sadeghi, G. 2019. Consequence Modeling for Accidental Events of SO₂ Release in a Detergent Manufacturing Company. *Journal of Human, Environment, and Health Promotion*. 5:4: 172–176.
- Intergovernmental Panel On Climate Change. 2023. *Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge.
- International Maritime Organization. 2020. *Sulphur 2020 – Cutting Sulphur Oxide Emissions*. International Maritime Organization.
- IPCC. 2019. *2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change: Geneva.
- Isaacson, W. 2007. *Einstein: His Life and Universe*. Simon & Schuster Paperbacks: New York.
- Ischay, M.A., Anzovino, M.E., Du, J., dan Yoon, T.P. 2008. Efficient Visible Light Photocatalysis of [2+2] Enone Cycloadditions. *Journal of the American*

Chemical Society. 130:39: 12886–12887.

- Jaafar, N.F., Jalil, A.A., dan Triwahyono, S. 2017. Visible-light photoactivity of plasmonic silver supported on mesoporous TiO₂ nanoparticles (Ag-MTN) for enhanced degradation of 2-chlorophenol: Limitation of Ag-Ti interaction. *Applied Surface Science*. 392:NA: 1068–1077.
- Jalil, A.A., Satar, M.A.H., Triwahyono, S., Setiabudi, H.D., Kamarudin, N.H.N., Jaafar, N.F., Sapawe, N., dan Ahamad, R. 2013. Tailoring the current density to enhance photocatalytic activity of CuO/HY for decolorization of malachite green. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 701:NA: 50–58.
- Javadli, R., dan de Klerk, A. 2012. Desulfurization of heavy oil. *Applied Petrochemical Research*. 1:1–4: 3–19.
- Jiang, K., Li, Z., Zheng, Z., Li, J., Qi, X., Zhou, J., Wei, H., He, Y., Xue, M., dan Chu, H. 2021. Enhanced adsorption performance for aromatic sulfur compounds over a hierarchical structured AgX zeolite. *Environmental Science: Atmospheres*. 1:7: 569–576.
- Jiang, L., Yuan, X., Zeng, G., Liang, J., Chen, X., Yu, H., Wang, H., Wu, Z., Zhang, J., dan Xiong, T. 2018A. In-situ synthesis of direct solid-state dual Z-scheme WO₃/g-C₃N₄/Bi₂O₃ photocatalyst for the degradation of refractory pollutant. *Applied Catalysis B: Environmental*. 227:NA: 376–385.
- Jiang, L., Yuan, X., Zeng, G., Liang, J., Wu, Z., Yu, H., Mo, D., Wang, H., Xiao, Z., dan Zhou, C. 2019. Nitrogen self-doped g-C₃N₄ nanosheets with tunable band structures for enhanced photocatalytic tetracycline degradation. *Journal of Colloid and Interface Science*. 536:NA: 17–29.
- Jiang, L., Yuan, X., Zeng, G., Wu, Z., Liang, J., Chen, X., Leng, L., Wang, Hui, dan Wang, Hou. 2018B. Metal-free efficient photocatalyst for stable visible-light photocatalytic degradation of refractory pollutant. *Applied Catalysis B: Environmental*. 221:221: 715–725.
- Jiang, W., dan Xuanzhen, Y. 2001. Decomposition of CO₂ Using Pulsed Corona Discharges Combined with Catalyst. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 21:4: 665–678.
- Jiang, W., Zhu, K., Li, Hongping, Zhu, L., Hua, M., Xiao, J., Wang, C., Yang, Z.,

- Chen, G., Zhu, W., Li, Huaming, dan Dai, S. 2020. Synergistic effect of dual Brønsted acidic deep eutectic solvents for oxidative desulfurization of diesel fuel. *Chemical Engineering Journal*. 394: 124831.
- Jiang, Z., Lu, H., Zhang, Y., dan Li, C. 2011. Oxidative Desulfurization of Fuel Oils. *Chinese Journal of Catalysis*. 32:5: 707–715.
- Jin, D., Xu, Q., Wang, Y., dan Hu, X. 2014. A derivative photoelectrochemical sensing platform for herbicide acetochlor based on TiO₂–poly (3-hexylthiophene)–ionic liquid nanocomposite film modified electrodes. *Talanta*. 127:NA: 169–174.
- Juan, Z., Dishun, Z., Liyan, Y., dan Yongbo, L. 2010. Photocatalytic oxidation dibenzothiophene using TS-1. *Chemical Engineering Journal*. 156:3: 528–531.
- Jusoh, N.W.C., Jalil, A.A., Triwahyono, S., Karim, A.H., Salleh, N.F., Annuar, N.H.R., Jaafar, N.F., Firmansyah, M.L., Mukti, R.R., dan Ali, M.W. 2015A. Structural rearrangement of mesostructured silica nanoparticles incorporated with ZnO catalyst and its photoactivity: Effect of alkaline aqueous electrolyte concentration. *Applied Surface Science*. 330:330: 10–19.
- Jusoh, N.W.C., Jalil, A.A., Triwahyono, S., dan Mamat, C.R. 2015B. Tailoring the metal introduction sequence onto mesostructured silica nanoparticles framework: Effect on physicochemical properties and photoactivity. *Applied Catalysis A: General*. 492:NA: 169–176.
- Kalita, M., Sangannavar, P.A., Chutia, M., Jha, D.K., Sathyanarayana, K., Kumar, J.S., dan Subrahmanyam, G. 2022. Microbial biodesulfurization: a sustainable technology for refining fossil fuels., in: *Microbial Resource Technologies for Sustainable Development*. Elsevier, hal. 333–351.
- Kalyanasundaram, K. 1982. Photophysics, photochemistry and solar energy conversion with tris(bipyridyl)ruthenium(II) and its analogues. *Coordination Chemistry Reviews*. 46: 159–244.
- Kato, N., dan Akimoto, H. 1992. Anthropogenic emissions of SO₂ and NO_x in Asia: emission inventories. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*. 26:16: 2997–3017.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. 2016.

Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi Nomor 28.K/10/DJM.T/2016. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.

- Khan, N., dan Srivastava, V.C. 2022. Extractive desulfurization using ethylene glycol and glycerol-based deep eutectic solvents: engineering aspects and intensification using ultrasound. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 180: 108973.
- Khani, M., Mousavi, S.E., Pahlavanzadeh, H., Ale Ebrahim, H., dan Mozaffari, A. 2019. Study of MoO₃- γ Al₂O₃ catalysts behavior in selective catalytic reduction of SO₂ toxic gas to sulfur with CH₄. *Environmental Science and Pollution Research*. 26:10: 9686–9696.
- Khusnun, N.F., Jalil, A.A., Triwahyono, S., Jusoh, N.W.C., Johari, A., dan Kidam, K. 2016. Interaction between copper and carbon nanotubes triggers their mutual role in the enhanced photodegradation of p-chloroaniline. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 18:17: 12323–12331.
- Koay, W.L., Ye, E., Lee, C.-L.K., Loh, X.J., Lu, Y., dan Truong, V.X. 2024. Red light activatable photobase generator for rapid thiol-nucleophilic polymerization. *Materials Today Chemistry*. 35: 101872.
- Kobayashi, M., Nagasawa, T., dan Yamada, H. 1992. Enzymatic synthesis of acrylamide: a success story not yet over. *Trends in Biotechnology*. 10: 402–408.
- Kolahdouz, M., Xu, B., Nasiri, A.F., Fathollahzadeh, M., Manian, M., Aghababa, H., Wu, Y., dan Radamson, H.H. 2022. Carbon-Related Materials: Graphene and Carbon Nanotubes in Semiconductor Applications and Design. *Micromachines*. 13:8.
- Kongpol, K., Chaihao, P., Shuapan, P., Kongduk, P., Chunglok, W., dan Yusakul, G. 2022. Therapeutic hydrophobic deep eutectic solvents of menthol and fatty acid for enhancing anti-inflammation effects of curcuminoids and curcumin on RAW264.7 murine macrophage cells. *RSC Advances*. 12:27: 17443–17453.
- Koo, B., Yoo, H., Choi, H.J., Kim, M., Kim, C., dan Kim, K.T. 2021. Visible Light Photochemical Reactions for Nucleic Acid-Based Technologies. *Molecules*.

26:3: 556.

- Koul, B., Poonia, A.K., Singh, R., dan Kajla, S. 2022. Strategies to cope with the emerging waste water contaminants through adsorption regimes., in: Development in Wastewater Treatment Research and Processes. Elsevier, hal. 61–106.
- Kovacs, J.A. 2004. Synthetic Analogues of Cysteinate-Ligated Non-Heme Iron and Non-Corrinoid Cobalt Enzymes. *Chemical Reviews*. 104:2: 825–848.
- Kovács, T., Feng, W., Totterdill, A., Plane, J.M.C., Dhomse, S., Gómez-Martín, J.C., Stiller, G.P., Haenel, F.J., Smith, C., Forster, P.M., García, R.R., Marsh, D.R., dan Chipperfield, M.P. 2017. Determination of the atmospheric lifetime and global warming potential of sulfur hexafluoride using a three-dimensional model. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 17:2: 883–898.
- Kragh, H. 2000. Max Planck: the reluctant revolutionary. *Physics World*. 13:12: 31–36.
- Krotkov, N.A., McLinden, C.A., Li, C., Lamsal, L.N., Celarier, E.A., Marchenko, S. V., Swartz, W.H., Bucsela, E.J., Joiner, J., Duncan, B.N., Boersma, K.F., Veefkind, J.P., Levelt, P.F., Fioletov, V.E., Dickerson, R.R., He, H., Lu, Z., dan Streets, D.G. 2016. Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂ pollution changes from 2005 to 2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 16:7: 4605–4629.
- Kulkarni, P.S., dan Afonso, C.A.M. 2010. Deep desulfurization of diesel fuel using ionic liquids: current status and future challenges. *Green Chemistry*. 12:7: 1139.
- Kumar, S., Srivastava, V.C., Nanoti, S.M., dan Kumar, A. 2015A. Solvent evaluation for desulfurization and denitrification of gas oil using performance and industrial usability indices. *AIChE Journal*. 61:7: 2257–2267.
- Kumar, S., Srivastava, V.C., Raghuvanshi, R., Nanoti, S.M., dan Sudhir, N. 2015B. Removal of Refractive Sulfur and Aromatic Compounds from Straight-Run, Fluidized Catalytic Cracking, and Coker Gas Oil Using N -Methyl-2-pyrrolidone in Batch and Packed-Bed Extractors. *Energy & Fuels*. 29:7: 4634–

4643.

- Kwon, J., Moon, J., Bae, Y., Lee, D., Sohn, H., dan Lee, C. 2008. Adsorptive Desulfurization and Denitrogenation of Refinery Fuels Using Mesoporous Silica Adsorbents. *ChemSusChem*. 1:4: 307–309.
- Laube, J.C., dan Tegtmeier, S. Chapter 1: update on ozone-depleting substances (ODSs) and other gases of interest to the Montreal Protocol., in: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022 278. World Meteorological Organization: Geneva.
- Lee, K., dan Greenstone, M. 2021. *Polusi Udara Indonesia dan Dampaknya Terhadap Usia Harapan hidup*. AQLI: Air Quality Life Index.
- Lee, K.X., dan Valla, J.A. 2019. Adsorptive desulfurization of liquid hydrocarbons using zeolite-based sorbents: a comprehensive review. *Reaction Chemistry & Engineering*. 4:8: 1357–1386.
- LeGates, T.A., Fernandez, D.C., dan Hattar, S. 2014. Light as a central modulator of circadian rhythms, sleep and affect. *Nature Reviews Neuroscience*. 15:7: 443–454.
- Lemaoui, T., Benguerba, Y., Darwish, A.S., Hatab, F.A., Warrag, S.E.E., Kroon, M.C., dan Alnashef, I.M. 2021. Simultaneous dearomatization, desulfurization, and denitrogenation of diesel fuels using acidic deep eutectic solvents as extractive agents: A parametric study. *Separation and Purification Technology*. 256: 117861.
- Lenard, P. 1902. Ueber die lichtelektrische Wirkung. *Annalen der Physik*. 313:5: 149–198.
- Lewis, N.S. 2007. Toward Cost-Effective Solar Energy Use. *Science*. 315:5813: 798–801.
- Li, F., Kou, C., Sun, Z., Hao, Y., Liu, R., dan Zhao, D. 2012. Deep extractive and oxidative desulfurization of dibenzothiophene with C₅H₉NO·SnCl₂ coordinated ionic liquid. *Journal of Hazardous Materials*. 205–206: 164–170.
- Li, Han, K., Li, J., Li, M., dan Lu, C. 2017A. Preparation and characterization of super activated carbon produced from gulfweed by KOH activation. *Microporous and Mesoporous Materials*. 243: 291–300.

- Li, Li, F., Lu, X., Zuo, S., Li, Z., Yao, C., dan Ni, C. 2018A. Microwave hydrothermal synthesis of BiP1-xVxO4/attapulgite nanocomposite with efficient photocatalytic performance for deep desulfurization. *Powder Technology*. 327:NA: 467–475.
- Li, Li, F., Lu, X., Zuo, S., Yao, C., dan Ni, C. 2017B. Development of Bi2W1-xMoxO6/Montmorillonite nanocomposite as efficient catalyst for photocatalytic desulfurization. *Journal of Alloys and Compounds*. 709:NA: 285–292.
- Li, Li, Y.-Y., Yang, F., Liu, Z., Gao, R.-M., dan Zhao, J. 2015A. Photocatalytic oxidation desulfurization of model diesel over phthalocyanine/La 0.8 Ce 0.2 NiO 3. *Journal of Colloid and Interface Science*. 460:460: 8–17.
- Li, Li, Y., Sun, L., Xun, S., Jiang, W., Zhang, M., Zhu, W., dan Li, H. 2018B. H2O2 decomposition mechanism and its oxidative desulfurization activity on hexagonal boron nitride monolayer: A density functional theory study. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*. 84: 166–173.
- Li, McLinden, C., Fioletov, V., Krotkov, N., Carn, S., Joiner, J., Streets, D., He, H., Ren, X., Li, Z., dan Dickerson, R.R. 2017C. India Is Overtaking China as the World's Largest Emitter of Anthropogenic Sulfur Dioxide. *Scientific Reports*. 7:1: 14304.
- Li, N., Zhu, J., Ma, X., Zha, Q., dan Song, C. 2013. Tailoring of surface oxygen-containing functional groups and their effect on adsorptive denitrogenation of liquid hydrocarbons over activated carbon. *AIChE Journal*. 59:4: 1236–1244.
- Li, Wu, B., Liu, R., Wang, X., Chen, L., dan Zhao, D. 2015B. An inexpensive N-methyl-2-pyrrolidone-based ionic liquid as efficient extractant and catalyst for desulfurization of dibenzothiophene. *Chemical Engineering Journal*. 274: 192–199.
- Li, X., Ai, S., Huang, Y., Huang, C., Yu, W., dan Mao, Z. 2021. Fast and reversible adsorption for dibenzothiophene in fuel oils with metallic nano-copper supported on mesoporous silica. *Environmental Science and Pollution Research*. 28:3: 2741–2752.
- Li, X., Zhang, Z., Yao, C., Lu, X., Zhao, X., dan Ni, C. 2016. Attapulgite-

- CeO₂/MoS₂ ternary nanocomposite for photocatalytic oxidative desulfurization. *Applied Surface Science*. 364:NA: 589–596.
- Li, Y., Alharthi, M., Ahmad, I., Hanif, I., dan Ul Hassan, M. 2022. Nexus between renewable energy, natural resources and carbon emissions under the shadow of transboundary trade relationship from South East Asian economies. *Energy Strategy Reviews*. 41: 100855.
- Li, Y., Liu, H., Huang, Z., He, Y., Xu, B.-H., Wang, H., dan Yu, Z. 2021. Visible-Light-Driven, Palladium-Catalyzed Heck Reaction of Internal Vinyl Bromides with Styrenes. *The Journal of Organic Chemistry*. 86:12: 8402–8413.
- Li, Zhang, Q., Zhang, Y., Zheng, B., Wang, K., Chen, Y., Wallington, T.J., Han, W., Shen, W., Zhang, X., dan He, K. 2015C. Source contributions of urban PM_{2.5} in the Beijing–Tianjin–Hebei region: Changes between 2006 and 2013 and relative impacts of emissions and meteorology. *Atmospheric Environment*. 123: 229–239.
- Li, Zhang, Y., Wu, P., Feng, C., dan Xue, G. 2018C. Catalytic Oxidative/Extractive Desulfurization of Model Oil using Transition Metal Substituted Phosphomolybdates-Based Ionic Liquids. *Catalysts*. 8:12: 639.
- Li, Zhu, W., Lu, X., Zuo, S., Yao, C., dan Ni, C. 2017D. Integrated nanostructures of CeO₂/attapulgite/g-C₃N₄ as efficient catalyst for photocatalytic desulfurization: Mechanism, kinetics and influencing factors. *Chemical Engineering Journal*. 326:NA: 87–98.
- Lima, F., Dave, M., Silvestre, A.J.D., Branco, L.C., dan Marrucho, I.M. 2019. Concurrent Desulfurization and Denitrogenation of Fuels Using Deep Eutectic Solvents. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 7:13: 11341–11349.
- Lin, F., Jiang, Z., Tang, N., Zhang, C., Chen, Z., Liu, T., dan Dong, B. 2016. Photocatalytic oxidation of thiophene on RuO₂/SO₄²⁻-TiO₂: Insights for cocatalyst and solid-acid. *Applied Catalysis B: Environmental*. 188:NA: 253–258.
- Lin, L.-S., Cong, Z.-X., Li, J., Ke, K.-M., Guo, S.-S., Yang, H.-H., dan Chen, G.-N. 2014. Graphitic-phase C₃N₄ nanosheets as efficient photosensitizers and pH-responsive drug nanocarriers for cancer imaging and therapy. *Journal of*

Materials Chemistry B. 2:8: 1031.

- Liu, G.H., Zong, Z.M., Liu, F.J., Meng, X.L., Zhang, Y.Y., Wang, S.K., Li, S., Zhu, C., Wei, X.Y., Ma, F.Y., dan Liu, J.M. 2019. Deep hydroconversion of ethanol-soluble portion from the ethanolysis of Dahuangshan lignite to clean liquid fuel over a mordenite supported nickel catalyst. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 139: 13–21.
- Liu, Jia, Q., Long, J., Wang, X., Gao, Z., dan Gu, Q. 2018A. Amorphous NiO as co-catalyst for enhanced visible-light-driven hydrogen generation over g-C₃N₄ photocatalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*. 222:NA: 35–43.
- Liu, Jiang, Y., Wang, Y., Shang, S., Ni, Y., Zhang, N., Cao, M., dan Hu, C. 2018B. Influence of dimensionality and crystallization on visible-light hydrogen production of Au@TiO₂ core-shell photocatalysts based on localized surface plasmon resonance. *Catalysis Science & Technology*. 8:4: 1094–1103.
- Liu, R., Zhang, J., Xu, Z., Zhao, D., dan Sun, S. 2018. Visible light photocatalytic oxidative desulfurization using Ti-MCM-41-loaded iron phthalocyanine combined with ionic liquid extraction. *Journal of Materials Science*. 53:7: 4927–4938.
- Liu, W., Sarofim, A.F., dan Flytzani-Stephanopoulos, M. 1994. Reduction of sulfur dioxide by carbon monoxide to elemental sulfur over composite oxide catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*. 4:2–3: 167–186.
- Liu, W., Wadia, C., dan Flytzani-Stephanopoulos, M. 1996. Transition metal/fluorite-type oxides as active catalysts for reduction of sulfur dioxide to elemental sulfur by carbon monoxide. *Catalysis Today*. 28:4: 391–403.
- Lo, J.M.H., Ziegler, T., dan Clark, P.D. 2010. SO₂ Adsorption and Transformations on γ -Al₂O₃ Surfaces: A Density Functional Theory Study. *The Journal of Physical Chemistry C*. 114:23: 10444–10454.
- Low, J., Qiu, S., Xu, D., Jiang, C., dan Cheng, B. 2018. Direct evidence and enhancement of surface plasmon resonance effect on Ag-loaded TiO₂ nanotube arrays for photocatalytic CO₂ reduction. *Applied Surface Science*. 434:NA: 423–432.
- Lu, X., Li, X., Qian, J., Miao, N., Yao, C., dan Chen, Z. 2016. Synthesis and

- characterization of CeO₂/TiO₂ nanotube arrays and enhanced photocatalytic oxidative desulfurization performance. *Journal of Alloys and Compounds*. 661:NA: 363–371.
- Lu, Z., Streets, D.G., Zhang, Q., Wang, S., Carmichael, G.R., Cheng, Y.F., Wei, C., Chin, M., Diehl, T., dan Tan, Q. 2010. Sulfur dioxide emissions in China and sulfur trends in East Asia since 2000. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 10:13: 6311–6331.
- Luo, J., Zhou, X., Ning, X., Zhan, L., Chen, J., dan Li, Z. 2018. Constructing a direct Z-scheme La₂NiO₄/g-C₃N₄ hybrid photocatalyst with boosted visible light photocatalytic activity. *Separation and Purification Technology*. 201:NA: 327–335.
- Lv, J., Li, D., Dai, K., Liang, C., Jiang, D., Lu, L., dan Zhu, G. 2017. Multi-walled carbon nanotube supported CdS-DETA nanocomposite for efficient visible light photocatalysis. *Materials Chemistry and Physics*. 186:NA: 372–381.
- Ma, S., Li, X., Lu, X., Zuo, S., Li, Z., dan Yao, C. 2018. Carbon quantum dots/attapulgite nanocomposites with enhanced photocatalytic performance for desulfurization. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 29:4: 2709–2715.
- Maezono, I., dan Chang, J.-S. 1990. Reduction of CO₂ from combustion gases by DC corona torches. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 26:4: 651–655.
- Mahima, K. 2018. Science behind Smog and Ominous Implications. *Down to Earth*. <https://www.downtoearth.org.in/blog/air/science-behind-smog-and-its-ominous-implications-60080>.
- Majid, M.F., Mohd Zaid, H.F., Kait, C.F., Jumbri, K., Yuan, L.C., dan Rajasuriyan, S. 2020. Futuristic advance and perspective of deep eutectic solvent for extractive desulfurization of fuel oil: A review. *Journal of Molecular Liquids*. 306: 112870.
- Mamuad, R.Y., dan Choi, A.E.S. 2023. Biodesulfurization Processes for the Removal of Sulfur from Diesel Oil: A Perspective Report. *Energies*. 16:6: 2738.

- Mannu, G.S. 2014. Retinal phototransduction. *Neurosciences (Riyadh, Saudi Arabia)*. 19:4: 275–80.
- Marakatti, V.S., Marappa, S., dan Gaigneaux, E.M. 2019. Sulfated zirconia: an efficient catalyst for the Friedel–Crafts monoalkylation of resorcinol with methyl tertiary butyl ether to 4-tertiary butylresorcinol. *New Journal of Chemistry*. 43:20: 7733–7742.
- Marchese, A.D., Durant, A.G., Reid, C.M., Jans, C., Arora, R., dan Lautens, M. 2022. Pd(0)/Blue Light Promoted Carboiodination Reaction – Evidence for Reversible C–I Bond Formation via a Radical Pathway. *Journal of the American Chemical Society*. 144:45: 20554–20560.
- Mbayachi, V.B., Ndayiragije, E., Sammani, T., Taj, S., Mbuta, E.R., dan Khan, A. 2021. Graphene synthesis, characterization and its applications: A review. *Results in Chemistry*. 3: 100163.
- McAuliffe, T., dan Marie, A. 2016. *Migrant Smuggling Data and Research: A global review of the emerging evidence base*, NA.
- McDonald, B.C., de Gouw, J.A., Gilman, J.B., Jathar, S.H., Akherati, A., Cappa, C.D., Jimenez, J.L., Lee-Taylor, J., Hayes, P.L., McKeen, S.A., Cui, Y.Y., Kim, S.-W., Gentner, D.R., Isaacman-VanWertz, G., Goldstein, A.H., Harley, R.A., Frost, G.J., Roberts, J.M., Ryerson, T.B., dan Trainer, M. 2018. Volatile chemical products emerging as largest petrochemical source of urban organic emissions. *Science*. 359:6377: 760–764.
- McLinden, C.A., Fioletov, V., Shephard, M.W., Krotkov, N., Li, C., Martin, R. V., Moran, M.D., dan Joiner, J. 2016. Space-based detection of missing sulfur dioxide sources of global air pollution. *Nature Geoscience*. 9:7: 496–500.
- Meindersma, W. (G. W., dan De Haan, A.B. 2012. Separation Processes with Ionic Liquids., in: *Ionic Liquids Uncoiled*. Wiley, hal. 119–179.
- Mguni, L.L., Ndhlovu, A., Liu, X., Hildebrandt, D., dan Yao, Y. 2022. Insight into Adsorptive Desulfurization by Zeolites: A Machine Learning Exploration. *Energy & Fuels*. 36:8: 4427–4438.
- Miao, G., Huang, D., Ren, X., Li, X., Li, Z., dan Xiao, J. 2016. Visible-light induced photocatalytic oxidative desulfurization using BiVO₄/C₃N₄@SiO₂ with

- air/cumene hydroperoxide under ambient conditions. *Applied Catalysis B: Environmental*. 192:NA: 72–79.
- Milici, R.C., Flores, R.M., dan Stricker, G.D. 2013. Coal resources, reserves and peak coal production in the United States. *International Journal of Coal Geology*. 113: 109–115.
- Millikan, R.A. 1914. A Direct Determination of Planck's "h." *Physical Review*. 4:1: 73–75.
- Minkowski, H. 1910. Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern. *Mathematische Annalen*. 68:4: 472–525.
- Mitchell, M.B., Sheinker, V.N., dan White, M.G. 1996. Adsorption and Reaction of Sulfur Dioxide on Alumina and Sodium-Impregnated Alumina. *The Journal of Physical Chemistry*. 100:18: 7550–7557.
- Mkhalid, I.A. 2018. Photocatalytic activity of Bi₂S₃ enlargement by decoration of silver for visible light thiophene degradation. *Applied Nanoscience*. 8:7: 1855–1864.
- Mohammed, S., Raj, A., Al Shoaibi, A., dan Sivashanmugam, P. 2015. Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in Claus process from contaminants in H₂S feed gas. *Chemical Engineering Science*. 137:NA: 91–105.
- Mohebali, G., dan Ball, A.S. 2016. Biodesulfurization of diesel fuels – Past, present and future perspectives. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 110: 163–180.
- Morton, O. 2006. Solar energy: A new day dawning?: Silicon Valley sunrise. *Nature*. 443: 19+.
- Mughal, N., Arif, A., Jain, V., Chupradit, S., Shabbir, M.S., Ramos-Meza, C.S., dan Zhanbayev, R. 2022. The role of technological innovation in environmental pollution, energy consumption and sustainable economic growth: Evidence from South Asian economies. *Energy Strategy Reviews*. 39: 100745.
- Mujahid, A., Maryam, A., Afzal, A., Zafar Bajwa, S., Hussain, T., Imran Din, M., Latif, U., dan Irshad, M. 2020. Molecularly imprinted poly(methyl methacrylate)-nickel sulfide hybrid membranes for adsorptive desulfurization of dibenzothiophene. *Separation and Purification Technology*. 237: 116453.

- Mulligan, D.J., dan Berk, D. 1989. Reduction of sulfur dioxide with methane over selected transition metal sulfides. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 28:7: 926–931.
- Muradov, N. 2017. Low to near-zero CO₂ production of hydrogen from fossil fuels: Status and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*. 42:20: 14058–14088.
- Muzic, M., Sertic-Bionda, K., dan Gomzi, Z. 2008. Kinetic and Statistical Studies of Adsorptive Desulfurization of Diesel Fuel on Commercial Activated Carbons. *Chemical Engineering & Technology*. 31:3: 355–364.
- Narayan, R., Nayak, U., Raichur, A., dan Garg, S. 2018. Mesoporous Silica Nanoparticles: A Comprehensive Review on Synthesis and Recent Advances. *Pharmaceutics*. 10:3: 118.
- Narayanan, J.M.R., Tucker, J.W., dan Stephenson, C.R.J. 2009. Electron-Transfer Photoredox Catalysis: Development of a Tin-Free Reductive Dehalogenation Reaction. *Journal of the American Chemical Society*. 131:25: 8756–8757.
- Naseri, A., Samadi, M., Pourjavadi, A., Moshfegh, A.Z., dan Ramakrishna, S. 2017. Graphitic carbon nitride (g-C₃N₄)-based photocatalysts for solar hydrogen generation: recent advances and future development directions. *Journal of Materials Chemistry A*. 5:45: 23406–23433.
- Nassar, H.N., Abu Amr, S.S., dan El-Gendy, N.S. 2021. Biodesulfurization of refractory sulfur compounds in petro-diesel by a novel hydrocarbon tolerable strain *Paenibacillus glucanolyticus* HN4. *Environmental Science and Pollution Research*. 28:7: 8102–8116.
- Nath Prajapati, Y., dan Verma, N. 2018. Hydrodesulfurization of Thiophene on Activated Carbon Fiber Supported NiMo Catalysts. *Energy & Fuels*. 32:2: 2183–2196.
- Nejabat, F., dan Rayati, S. 2019. Surface modification of multi-walled carbon nanotubes to produce a new bimetallic Fe/Mn catalyst for the aerobic oxidation of hydrocarbons. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 69:NA: 324–330.
- Ng, K.H. 2021. Reduction of hazardous SO₂ into elemental sulphur over chicken

- eggshells-derived calcium-based redox agent: A systematic step-by-step thermodynamic analysis and process validations. *Journal of Cleaner Production*. 278:NA: 123927.
- Ng, K.H., Liew, S.C., dan Zhang, S. 2021. Thermodynamic analysis of CaS production from various Ca-based precursors: A prequel to SO₂ reduction mediated by CaS/CaSO₄ redox agents. *Process Safety and Environmental Protection*. 147:NA: 900–911.
- Nicewicz, D.A., dan MacMillan, D.W.C. 2008. Merging Photoredox Catalysis with Organocatalysis: The Direct Asymmetric Alkylation of Aldehydes. *Science*. 322:5898: 77–80.
- Nicola, T.-S., Schneider, C., Niederau, A., Vogt, R., dan Hausberger, S. 2016. Modelling the effect on air quality of Euro 6 emission factor scenarios. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*. 6:4: 227–244.
- Nocera, D.G. 2006. On the Future of Global Energy. *Daedalus*. 135:4: 112–115.
- Nogueira, L.S., Ribeiro, S., Granadeiro, C.M., Pereira, E., Feio, G., Cunha-Silva, L., dan Balula, S.S. 2014. Novel polyoxometalate silica nano-sized spheres: efficient catalysts for olefin oxidation and the deep desulfurization process. *Dalton Trans*. 43:25: 9518–9528.
- Nopmongcol, U., Grant, J., Knipping, E., Alexander, M., Schurhoff, R., Young, D., Jung, J., Shah, T., dan Yarwood, G. 2017. Air Quality Impacts of Electrifying Vehicles and Equipment Across the United States. *Environmental Science & Technology*. 51:5: 2830–2837.
- Ogura, A., Ichii, N., Shibata, K., dan Takao, K. 2020. Red-Light-Mediated Barton–McCombie Reaction. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*. 93:7: 936–941.
- Oku, N., Murakami, M., dan Miura, T. 2022. Photoassisted Cross-Coupling Reaction of α -Chlorocarbonyl Compounds with Arylboronic Acids. *Organic Letters*. 24:8: 1616–1619.
- Olkkonen, V., Hirvonen, J., Heljo, J., dan Syri, S. 2021. Effectiveness of building stock sustainability measures in a low-carbon energy system: A scenario analysis for Finland until 2050. *Energy*. 235: 121399.

- Paik, S.C., dan Chung, J.S. 1996. Selective hydrogenation of SO₂ to elemental sulfur over transition metal sulfides supported on Al₂O₃. *Applied Catalysis B: Environmental*. 8:3: 267–279.
- Park, N.-K., Lee, T.H., Lee, T.J., Baek, J.-I., dan Lee, J.B. 2016. Catalytic reduction of SO₂ under the regeneration of off-gas containing oxygen over Cu-Sn-Zr-based oxides for the hot coal gas desulfurization process. *Catalysis Today*. 265:NA: 131–137.
- Paucar, N.E., Kiggins, P., Blad, B., De Jesus, K., Afrin, F., Pashikanti, S., dan Sharma, K. 2021. Ionic liquids for the removal of sulfur and nitrogen compounds in fuels: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 19:2: 1205–1228.
- Pham, X.N., Nguyen, B.M., Thi, H.T., dan Van Doan, H. 2018. Synthesis of Ag-AgBr/Al-MCM-41 nanocomposite and its application in photocatalytic oxidative desulfurization of dibenzothiophene. *Advanced Powder Technology*. 29:8: 1827–1837.
- Pibiri, I., Buscemi, S., Palumbo Piccionello, A., dan Pace, A. 2018. Photochemically Produced Singlet Oxygen: Applications and Perspectives. *ChemPhotoChem*. 2:7: 535–547.
- Pirhashemi, M., Habibi-Yangjeh, A., dan Rahim Pouran, S. 2018. Review on the criteria anticipated for the fabrication of highly efficient ZnO-based visible-light-driven photocatalysts. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 62:NA: 1–25.
- Piumetti, M., Bensaïd, S., Fino, D., dan Russo, N. 2015. Catalysis in Diesel engine NO_x aftertreatment: a review. *Catalysis, Structure & Reactivity*. 1:4: 155–173.
- Planck, M. 1901. Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum. *Annalen der Physik*. 309:3: 553–563.
- Poullikkas, A. 2015. Review of Design, Operating, and Financial Considerations in Flue Gas Desulfurization Systems. *Energy Technology & Policy*. 2:1: 92–103.
- Pradhan, B.K., dan Sandle, N.K. 1999. Effect of different oxidizing agent treatments on the surface properties of activated carbons. *Carbon*. 37:8: 1323–1332.

- Prado, G.H.C., Rao, Y., dan de Klerk, A. 2017. Nitrogen Removal from Oil: A Review. *Energy & Fuels*. 31:1: 14–36.
- Prasoulas, G., Dimos, K., Glekas, P., Kalantzi, S., Sarris, S., Templis, C., Vavitsas, K., Hatzinikolaou, D.G., Papayannakos, N., Kekos, D., dan Mamma, D. 2021. Biodesulfurization of Dibenzothiophene and Its Alkylated Derivatives in a Two-Phase Bubble Column Bioreactor by Resting Cells of *Rhodococcus erythropolis* IGTS8. *Processes*. 9:11: 2064.
- Preradovic, L., Ilic, P., Markovic, S., dan Janjus, Z. 2011. Meteorological parameters and pollution caused by Sulfur dioxide and their influence on construction materials and heritage. *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*. 24:1: 9–20.
- Prier, C.K., Rankic, D.A., dan MacMillan, D.W.C. 2013. Visible Light Photoredox Catalysis with Transition Metal Complexes: Applications in Organic Synthesis. *Chemical Reviews*. 113:7: 5322–5363.
- Qasim, M., Ansari, T.M., dan Hussain, M. 2017. Combustion, performance, and emission evaluation of a diesel engine with biodiesel like fuel blends derived from a mixture of Pakistani waste canola and waste transformer oils. *Energies*. 10:7.
- Qian, W. 2023. On the Physical Process and Essence of the Photoelectric Effect. *Journal of Applied Mathematics and Physics*. 11:06: 1580–1597.
- Qiao, X., Ying, Q., Li, X., Zhang, H., Hu, J., Tang, Y., dan Chen, X. 2018. Source apportionment of PM_{2.5} for 25 Chinese provincial capitals and municipalities using a source-oriented Community Multiscale Air Quality model. *Science of The Total Environment*. 612: 462–471.
- Ramin Skibba. 2018. *Einstein, Bohr and the war over quantum theory*, Nature. Nature Publishing Group.
- Ravetz, B.D., Pun, A.B., Churchill, E.M., Congreve, D.N., Rovis, T., dan Campos, L.M. 2019. Photoredox catalysis using infrared light via triplet fusion upconversion. *Nature*. 565:7739: 343–346.
- Ray, E.A., Moore, F.L., Elkins, J.W., Rosenlof, K.H., Laube, J.C., Röckmann, T., Marsh, D.R., dan Andrews, A.E. 2017. Quantification of the SF₆ lifetime

- based on mesospheric loss measured in the stratospheric polar vortex. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 122:8: 4626–4638.
- Reli, M., Huo, P., Šihor, M., Ambrožová, N., Troppová, I., Matějová, L., Lang, J., Svoboda, L., Kušrowski, P., Ritz, M., Praus, P., dan Kočí, K. 2016. Novel $\text{TiO}_2/\text{C}_3\text{N}_4$ Photocatalysts for Photocatalytic Reduction of CO_2 and for Photocatalytic Decomposition of N_2O . *The Journal of Physical Chemistry A*. 120:43: 8564–8573.
- Renzi, P., Azzi, E., Bessone, E., Ghigo, G., Parisotto, S., Pellegrino, F., dan Deagostino, A. 2022. Blue light enhanced Heck arylation at room temperature applied to allenes. *Organic Chemistry Frontiers*. 9:4: 906–916.
- Rezvani, M.A., Afshari, P., dan Aghmasheh, M. 2021. Deep catalytic oxidative desulfurization process catalyzed by TBA-PWFe@NiO@BNT composite material as an efficient and recyclable phase-transfer nanocatalyst. *Materials Chemistry and Physics*. 267: 124662.
- Ribeiro, S.O., Nogueira, L.S., Gago, S., Almeida, P.L., Corvo, M.C., Castro, B. de, Granadeiro, C.M., dan Balula, S.S. 2017. Desulfurization process conciliating heterogeneous oxidation and liquid extraction: Organic solvent or centrifugation/water?. *Applied Catalysis A: General*. 542: 359–367.
- Rigby, M., Park, S., Saito, T., Western, L.M., Redington, A.L., Fang, X., Henne, S., Manning, A.J., Prinn, R.G., Dutton, G.S., Fraser, P.J., Ganesan, A.L., Hall, B.D., Harth, C.M., Kim, J., Kim, K.-R., Krummel, P.B., Lee, T., Li, S., Liang, Q., Lunt, M.F., Montzka, S.A., Mühle, J., O'Doherty, S., Park, M.-K., Reimann, S., Salameh, P.K., Simmonds, P., Tunnicliffe, R.L., Weiss, R.F., Yokouchi, Y., dan Young, D. 2019. Increase in CFC-11 emissions from eastern China based on atmospheric observations. *Nature*. 569:7757: 546–550.
- Robert, B., dan Deborah, J.. 1998. *Instruments of Science: An Historical Encyclopedia*. Routledge: London.
- Robinson, P.R., dan Hsu, C.S. 2017. Petroleum and Its Products., in: *Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology*. Springer International Publishing: Cham, hal. 13–106.
- Robock, A., Oman, L., dan Stenchikov, G.L. 2008. Regional climate responses to

- geoengineering with tropical and Arctic SO₂ injections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 113:D16.
- Rodriguez, J.A., Jirsak, T., Chaturvedi, S., dan Hrbek, J. 1998. Surface Chemistry of SO₂ on Sn and Sn/Pt(111) Alloys: Effects of Metal–Metal Bonding on Reactivity toward Sulfur. *Journal of the American Chemical Society*. 120:43: 11149–11157.
- Rybicka-Jasińska, K., Wdowik, T., Łuczak, K., Wierzba, A.J., Drapała, O., dan Gryko, D. 2022. Porphyrins as Promising Photocatalysts for Red-Light-Induced Functionalizations of Biomolecules. *ACS Organic & Inorganic Au*. 2:5: 422–426.
- Ryu, H.W., Kim, Y.S., Kim, J.H., dan Cheong, I.W. 2014. Direct synthetic route for water-dispersible polythiophene nanoparticles via surfactant-free oxidative polymerization. *Polymer*. 55:3: 806–812.
- Sadare, O., Obazu, F., dan Daramola, M. 2017. Biodesulfurization of Petroleum Distillates—Current Status, Opportunities and Future Challenges. *Environments*. 4:4: 85.
- Saha, B., Vedachalam, S., dan Dalai, A.K. 2021. Review on recent advances in adsorptive desulfurization. *Fuel Processing Technology*. 214: 106685.
- Saleh, T.A. 2020. Characterization, determination and elimination technologies for sulfur from petroleum: Toward cleaner fuel and a safe environment. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*. 25: e00080.
- Saleh, T.A. 2016. *Applying Nanotechnology to the Desulfurization Process in Petroleum Engineering*, Advances in Chemical and Materials Engineering. IGI Global.
- Saleh, T.A., AL-Hammadi, S.A., dan Al-Amer, A.M. 2019. Effect of boron on the efficiency of MoCo catalysts supported on alumina for the hydrodesulfurization of liquid fuels. *Process Safety and Environmental Protection*. 121: 165–174.
- Saleh, T.A., Sulaiman, K.O., dan AL-Hammadi, S.A. 2020. Effect of carbon on the hydrodesulfurization activity of MoCo catalysts supported on zeolite/ active carbon hybrid supports. *Applied Catalysis B: Environmental*. 263: 117661.

- Samanta, R., dan Antonchick, A.P. 2011. Palladium-Catalyzed Double C-H Activation Directed by Sulfoxides in the Synthesis of Dibenzothiophenes. *Angewandte Chemie International Edition*. 50:22: 5217–5220.
- Saravanan, R., Agarwal, S., Gupta, V.K., Khan, M.M., Gracia, F., Mosquera, E., Narayanan, V., dan Stephen, A. 2018. Line defect Ce³⁺ induced Ag/CeO₂/ZnO nanostructure for visible-light photocatalytic activity. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 353:NA: 499–506.
- Sawant, S.Y., Sayed, M.S., Han, T.H., Karim, M.R., Shim, J.-J., dan Cho, M.H. 2019. Bio-synthesis of finely distributed Ag nanoparticle-decorated TiO₂ nanorods for sunlight-induced photoelectrochemical water splitting. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 69:NA: 48–56.
- Schrödinger, E. 1926. Quantisierung als Eigenwertproblem. *Annalen der Physik*. 384:4: 361–376.
- Schwartz, S.H. 2017. *Visual Perception: A Clinical Orientation, Fifth Edition*. McGraw Hill Professional.
- Seal, P., Xu, J., De Luca, S., Boyer, C., dan Smith, S.C. 2019. Unraveling Photocatalytic Mechanism and Selectivity in PET-RAFT Polymerization. *Advanced Theory and Simulations*. 2:6.
- Sellet, N., Cormier, M., dan Goddard, J.-P. 2021. The dark side of photocatalysis: near-infrared photoredox catalysis for organic synthesis. *Organic Chemistry Frontiers*. 8:23: 6783–6790.
- Senko, O., Maslova, O., Gladchenko, M., Gaydamaka, S., Akopyan, A., Lysenko, S., Karakhanov, E., dan Efremenko, E. 2019. Prospective Approach to the Anaerobic Bioconversion of Benzo- and Dibenzothiophene Sulfones to Sulfide. *Molecules*. 24:9: 1736.
- Serway, R., dan Jewett, J.. 2018. *Physics for Scientists and Engineers*. Cengage Learning: Boston.
- Shafi, R., dan Hutchings, G.J. 2000. Hydrodesulfurization of hindered dibenzothiophenes: an overview. *Catalysis Today*. 59:3–4: 423–442.
- Shafiq, I., Shafique, S., Akhter, P., Ishaq, M., Yang, W., dan Hussain, M. 2021. Recent breakthroughs in deep aerobic oxidative desulfurization of petroleum

- refinery products. *Journal of Cleaner Production*. 294: 125731.
- Sharma, H.N., Sharma, V., Mhadeshwar, A.B., dan Ramprasad, R. 2015. Why Pt Survives but Pd Suffers From SO_x Poisoning?. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 6:7: 1140–1148.
- Sharma, P., dan Sasson, Y. 2017. A photoactive catalyst Ru–g-C₃N₄ for hydrogen transfer reaction of aldehydes and ketones. *Green Chemistry*. 19:3: 844–852.
- Shen, H., Huang, Y., Wang, R., Zhu, D., Li, W., Shen, G., Wang, B., Zhang, Y., Chen, Y., Lu, Y., Chen, H., Li, T., Sun, K., Li, B., Liu, W., Liu, J., dan Tao, S. 2013. Global Atmospheric Emissions of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from 1960 to 2008 and Future Predictions. *Environmental Science & Technology*. 47:12: 6415–6424.
- Shen, Y., Liu, X., Sun, T., dan Jia, J. 2012. Recent advances of sodium borohydride reduction in coal water slurry desulfurization: integration of chemical and electrochemical reduction. *RSC Advances*. 2:24: 8867.
- Shindell, D., dan Smith, C.J. 2019. Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels. *Nature*. 573:7774: 408–411.
- Shinozaki, T.-A., Suenaga, M., Ko, Y., Yamamoto, E., Murayama, H., dan Tokunaga, M. 2022. Ultraviolet light-induced decomposition of benzothiophene and dibenzothiophene derivatives for efficient sulfur removal without additives and catalysts. *Journal of Cleaner Production*. 370: 133402.
- Sikarwar, P., Gosu, V., Palla, V.C.S., dan Subbaramaiah, V. 2023. Central composite design approach for concurrent desulfurization and denitrogenation of model liquid fuel over Mo-AAC. *Environmental Quality Management*.
- Simmonds, P.G., Rigby, M., Manning, A.J., Park, S., Stanley, K.M., McCulloch, A., Henne, S., Graziosi, F., Maione, M., Arduini, J., Reimann, S., Vollmer, M.K., Mühle, J., O’Doherty, S., Young, D., Krummel, P.B., Fraser, P.J., Weiss, R.F., Salameh, P.K., Harth, C.M., Park, M.-K., Park, H., Arnold, T., Rennick, C., Steele, L.P., Mitrevski, B., Wang, R.H.J., dan Prinn, R.G. 2020. The increasing atmospheric burden of the greenhouse gas sulfur hexafluoride (SF₆). *Atmospheric Chemistry and Physics*. 20:12: 7271–7290.

- Sliney, D.H. 2016. What is light? The visible spectrum and beyond. *Eye*. 30:2: 222–229.
- Song, C. 2003. An overview of new approaches to deep desulfurization for ultra-clean gasoline, diesel fuel and jet fuel. *Catalysis Today*. 86:1–4: 211–263.
- Sönnichsen, N. 2023. Daily Global Crude Oil Demand 2006–2026 *Statistica*. <https://www.statista.com/statistics/271823/daily-global-crude-oil-demand-since-2006/>.
- Spojarkina, A., Damyanova, S., Petrov, L., dan Vit, Z. 1989. Effect of phosphorus on the surface state of alumina-supported nickel–molybdenum catalysts for hydrodesulphurization. *Applied Catalysis*. 56:1: 163–176.
- Strubinger, A., Ehrmann, U., León, V., DeSisto, A., dan González, M. 2015. Changes in Venezuelan Orinoco belt crude after different biotechnological approaches. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 127: 421–432.
- Stylianou, M., Vyrides, I., dan Agapiou, A. 2021. Oil biodesulfurization: A review of applied analytical techniques. *Journal of Chromatography B*. 1171: 122602.
- Su, F., Wu, Q., Song, D., Zhang, X., Wang, M., dan Guo, Y. 2013. Pore morphology-controlled preparation of ZrO₂-based hybrid catalysts functionalized by both organosilica moieties and Keggin-type heteropoly acid for the synthesis of levulinate esters. *Journal of Materials Chemistry A*. 1:42: 13209.
- Sultana, S., Mansingh, S., dan Parida, K.M. 2018. Rational design of light induced self healed Fe based oxygen vacancy rich CeO₂ (CeO₂ NS–FeOOH/Fe₂O₃) nanostructure materials for photocatalytic water oxidation and Cr(vi) reduction. *Journal of Materials Chemistry A*. 6:24: 11377–11389.
- Sun, C., Zhang, H., Liu, H., Zheng, X., Zou, W., Dong, L., dan Qi, L. 2018. Enhanced activity of visible-light photocatalytic H₂ evolution of sulfur-doped g-C₃N₄ photocatalyst via nanoparticle metal Ni as cocatalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*. 235:NA: 66–74.
- Svinterikos, E., Zuburtikudis, I., dan Al-Marzouqi, M. 2019. Carbon Nanomaterials for the Adsorptive Desulfurization of Fuels. *Journal of Nanotechnology*. 2019: 1–13.

- Tahir, M. 2018. Photocatalytic carbon dioxide reduction to fuels in continuous flow monolith photoreactor using montmorillonite dispersed Fe/TiO₂ nanocatalyst. *Journal of Cleaner Production*. 170:NA: 242–250.
- Takeuchi, M., Hidaka, M., dan Anpo, M. 2012. Efficient removal of toluene and benzene in gas phase by the TiO₂/Y-zeolite hybrid photocatalyst. *Journal of Hazardous Materials*. 237–238:NA: 133–139.
- Tanimu, A., Abdel-Azeim, S., Ganiyu, S.A., dan Alhooshani, K. 2021. Experimental and Theoretical Investigation of the Synergy Effect of Zr and Ce on the Catalytic Efficiency of NiMoS Grafted on SBA-15 for Oil Hydrodesulfurization. *Energy & Fuels*. 35:3: 2579–2589.
- Tao, F., Liu, Y., Luo, Q., Su, F., Xu, Y., Li, F., Yu, B., Ma, C., dan Xu, P. 2011. Novel organic solvent-responsive expression vectors for biocatalysis: Application for development of an organic solvent-tolerant biodesulfurizing strain. *Bioresource Technology*. 102:20: 9380–9387.
- Tao, S., Ru, M.Y., Du, W., Zhu, X., Zhong, Q.R., Li, B.G., Shen, G.F., Pan, X.L., Meng, W.J., Chen, Y.L., Shen, H.Z., Lin, N., Su, S., Zhuo, S.J., Huang, T.B., Xu, Y., Yun, X., Liu, J.F., Wang, X.L., Liu, W.X., Cheng, H.F., dan Zhu, D.Q. 2018. Quantifying the rural residential energy transition in China from 1992 to 2012 through a representative national survey. *Nature Energy*. 3:7: 567–573.
- Thaligari, S.K., Srivastava, V.C., dan Prasad, B. 2015. Simultaneous Adsorptive Desulfurization and Denitrogenation by Zinc Loaded Activated Carbon: Optimization of Parameters. *Petroleum Science and Technology*. 33:19: 1667–1675.
- The People's Republic of China. 2023. *hird Biennial Update Report on Climate Change*. The People's Republic of China.
- Timmers, V.R.J.H., dan Achten, P.A.J. 2016. Non-exhaust PM emissions from electric vehicles. *Atmospheric Environment*. 134: 10–17.
- Tomé, L.I.N., Baião, V., da Silva, W., dan Brett, C.M.A. 2018. Deep eutectic solvents for the production and application of new materials. *Applied Materials Today*. 10: 30–50.

- Tong, H., Zhou, Y., Chang, G., Li, P., Zhu, R., dan He, Y. 2018. Anatase TiO₂ single crystals with dominant {0 0 1} facets: Synthesis, shape-control mechanism and photocatalytic activity. *Applied Surface Science*. 444:NA: 267–275.
- Triantafyllidis, K.S., dan Deliyanni, E.A. 2014. Desulfurization of diesel fuels: Adsorption of 4,6-DMDBT on different origin and surface chemistry nanoporous activated carbons. *Chemical Engineering Journal*. 236:NA: 406–414.
- U.S. Energy Information Administration. 2017. *Annual Energy Outlook 2017*. U.S. Energy Information Administration.
- U.S. EPA. 2014. *2014 National Emissions Inventory (NEI) Data: Sector Summaries—Criteria and Hazardous Air Pollutants by 60 EIS emission sectors*. U.S. EPA.
- U.S. Federal Highway Administration. 2015. *Public Road Mileage, Lane-Miles, and VMT 1920-2015*. Highway Statistics.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. 2015. *Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. United Nations Framework Convention on Climate Change.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. 1998. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. UNITED NATIONS.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). 2019. *Global Non-CO₂ greenhouse gas emission projections & marginal abatement cost analysis: methodology documentation*. United States Environmental Protection Agency (US EPA).
- Vissers, J. 1988. Carbon-covered alumina as a support for sulfide catalysts*1. *Journal of Catalysis*. 114:2: 291–302.
- Vollmer, M.K., dan Weiss, R.F. 2002. Simultaneous determination of sulfur hexafluoride and three chlorofluorocarbons in water and air. *Marine Chemistry*. 78:2–3: 137–148.
- Vu, T.H.T., Nguyen, T.T.T., Nguyen, P.H.T., Do, M.H., Au, H.T., Nguyen, T.B.,

- Nguyen, D.L., dan Park, J.S. 2012. Fabrication of photocatalytic composite of multi-walled carbon nanotubes/TiO₂ and its application for desulfurization of diesel. *Materials Research Bulletin*. 47:2: 308–314.
- Wang, B., Zhu, J., dan Ma, H. 2009. Desulfurization from thiophene by SO₂/ZrO₂ catalytic oxidation at room temperature and atmospheric pressure. *Journal of Hazardous Materials*. 164:1: 256–264.
- Wang, C.-H., Lin, S.-S., Hwang, W.-U., dan Weng, H.-S. 2002. Supported Transition-Metal Oxide Catalysts for Catalytic Reduction of SO₂ with CO as a Reducing Agent. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 41:4: 666–671.
- Wang, C., Zhu, W., Xu, Y., Xu, H., Zhang, M., Chao, Y., Yin, S., Li, H., dan Wang, J. 2014. Preparation of TiO₂/g-C₃N₄ composites and their application in photocatalytic oxidative desulfurization. *Ceramics International*. 40:8: 11627–11635.
- Wang, Chen, Z., Zhu, Wangqin, Wu, P., Jiang, W., Zhang, M., Li, Hongping, Zhu, Wenshuai, dan Li, Huaming. 2017A. One-Pot Extraction and Oxidative Desulfurization of Fuels with Molecular Oxygen in Low-Cost Metal-Based Ionic Liquids. *Energy & Fuels*. 31:2: 1376–1382.
- Wang, Cheng, T.-H., Gu, X.-F., Chen, H., Guo, H., Wang, Y., Bao, F.-W., Shi, S.-Y., Xu, B.-R., Zuo, X., Meng, C., dan Zhang, X.-C. 2017B. Assessing Spatial and Temporal Patterns of Observed Ground-level Ozone in China. *Scientific Reports*. 7:1: 3651.
- Wang, Fan, H., dan Ai, S. 2015A. Lignin templated synthesis of porous carbon–CeO₂ composites and their application for the photocatalytic desulphuration. *Chemical Engineering Journal*. 260:NA: 785–790.
- Wang, Feng, Y., Qi, X., Deng, M., Tian, J., dan Zhang, Q. 2018A. Designing Explosive Poly(Ionic Liquid)s as Novel Energetic Polymers. *Chemistry – A European Journal*. 24:59: 15897–15902.
- Wang, Huang, L., Guo, Z., Han, X., Liu, C., Wang, W., dan Yuan, W. 2018B. Enhanced photocatalytic hydrogen production over Au/SiC for water reduction by localized surface plasmon resonance effect. *Applied Surface*

- Science*. 456:NA: 871–875.
- Wang, X.-Y., Guerzo, A., Tunuguntla, H., dan Schmehl, R.H. 2007. Photophysical behavior of Ru(II) and Os(II) terpyridyl phenylene vinylene complexes: perturbation of MLCT state by intra-ligand charge-transfer state. *Research on Chemical Intermediates*. 33:1–2: 63–77.
- Wang, Xue, L., Brimblecombe, P., Lam, Y.F., Li, L., dan Zhang, L. 2017C. Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects. *Science of The Total Environment*. 575: 1582–1596.
- Wang, Xuehai, Wang, A., Li, N., Wang, Xiaodong, Liu, Z., dan Zhang, T. 2006. Catalytic Reduction of SO₂ with CO over Supported Iron Catalysts. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 45:13: 4582–4588.
- Wang, Y., Han, R., dan Kubota, J. 2016. Is there an Environmental Kuznets Curve for SO₂ emissions? A semi-parametric panel data analysis for China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 54: 1182–1188.
- Wang, Y., dan Hu, A. 2014. Carbon quantum dots: synthesis, properties and applications. *Journal of Materials Chemistry C*. 2:34: 6921.
- Wang, Yuan, X., Wu, Y., Zeng, G., Chen, X., Leng, L., dan Li, H. 2015B. Synthesis and applications of novel graphitic carbon nitride/metal-organic frameworks mesoporous photocatalyst for dyes removal. *Applied Catalysis B: Environmental*. 174–175:NA: 445–454.
- Wang, Z., Li, S., Jin, Z., Li, Z., Liu, Q., dan Zhang, K. 2023. Oil and gas pathway to net-zero: Review and outlook. *Energy Strategy Reviews*. 45: 101048.
- Wang, Zhang, F., Pilot, E., Yu, J., Nie, C., Holdaway, J., Yang, L., Li, Y., Wang, W., Vardoulakis, S., dan Krafft, T. 2018C. Taking Action on Air Pollution Control in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) Region: Progress, Challenges and Opportunities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 15:2: 306.
- Warrag, S.E.E., Darwish, A.S., Abuhatab, F.O.S., Adeyemi, I.A., Kroon, M.C., dan AlNashef, I.M. 2020. Combined Extractive Dearomatization, Desulfurization, and Denitrogenation of Oil Fuels Using Deep Eutectic Solvents: A Parametric

- Study. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 59:25: 11723–11733.
- Wen, X.-J., Niu, C.-G., Zhang, L., Liang, C., dan Zeng, G.-M. 2018. A novel Ag₂O/CeO₂ heterojunction photocatalysts for photocatalytic degradation of enrofloxacin: possible degradation pathways, mineralization activity and an in depth mechanism insight. *Applied Catalysis B: Environmental*. 221:NA: 701–714.
- Wilburn, M.S., dan Epling, W.S. 2019. Formation and Decomposition of Sulfite and Sulfate Species on Pt/Pd Catalysts: An SO₂ Oxidation and Sulfur Exposure Study. *ACS Catalysis*. 9:1: 640–648.
- Winkler, S.L., Anderson, J.E., Garza, L., Ruona, W.C., Vogt, R., dan Wallington, T.J. 2018. Vehicle criteria pollutant (PM, NO_x, CO, HCs) emissions: how low should we go?. *Npj Climate and Atmospheric Science*. 1:1: 26.
- Wu, Jia, L., Fan, H., dan Mi, J. 2017A. Hot Coal Gas Desulfurization Using Regenerable ZnO/MCM41 Prepared via One-Step Hydrothermal Synthesis. *Energy & Fuels*. 31:9: 9814–9823.
- Wu, L.-C., Zhao, H., Jin, L.-G., dan Xu, H.-Y. 2016. TiO₂/g-C₃N₄ heterojunctions: In situ fabrication mechanism and enhanced photocatalytic activity. *Frontiers of Materials Science*. 10:3: 310–319.
- Wu, X., Gao, M., Guo, S., dan Maqbool, R. 2019. Environmental and economic effects of sulfur dioxide emissions trading pilot scheme in China: A quasi-experiment. *Energy & Environment*. 30:7: 1255–1274.
- Wu, Y., Ward-Bond, J., Li, D., Zhang, S., Shi, J., dan Jiang, Z. 2018. g-C₃N₄@ α -Fe₂O₃/C Photocatalysts: Synergistically Intensified Charge Generation and Charge Transfer for NADH Regeneration. *ACS Catalysis*. 8:7: 5664–5674.
- Wu, Zhang, S., Hao, J., Liu, H., Wu, X., Hu, J., Walsh, M.P., Wallington, T.J., Zhang, K.M., dan Stevanovic, S. 2017B. On-road vehicle emissions and their control in China: A review and outlook. *Science of The Total Environment*. 574: 332–349.
- Xi, Y., Yi, H., dan Lei, A. 2013. Synthetic applications of photoredox catalysis with visible light. *Organic & Biomolecular Chemistry*. 11:15: 2387.
- Xiao, G., Zhao, Y., Li, L., Pratt, J.O., Su, H., dan Tan, T. 2018. Facile synthesis of

- dispersed Ag nanoparticles on chitosan-TiO₂ composites as recyclable nanocatalysts for 4-nitrophenol reduction. *Nanotechnology*. 29:15: 155601.
- Xiao, J., Wu, L., Wu, Y., Liu, B., Dai, L., Li, Z., Xia, Q., dan Xi, H. 2014. Effect of gasoline composition on oxidative desulfurization using a phosphotungstic acid/activated carbon catalyst with hydrogen peroxide. *Applied Energy*. 113:NA: 78–85.
- Xu, L., Huang, W.-Q., Wang, L.-L., Tian, Z.-A., Hu, W., Ma, Y., Wang, X., Pan, A., dan Huang, G.-F. 2015. Insights into Enhanced Visible-Light Photocatalytic Hydrogen Evolution of g-C₃N₄ and Highly Reduced Graphene Oxide Composite: The Role of Oxygen. *Chemistry of Materials*. 27:5: 1612–1621.
- Xu, Liu, Q., Liu, C., Zhai, Y., Xie, M., Huang, L., Xu, H., Li, H., dan Jing, J. 2018A. Visible-light-driven Ag/AgBr/ZnFe₂O₄ composites with excellent photocatalytic activity for E. coli disinfection and organic pollutant degradation. *Journal of Colloid and Interface Science*. 512:NA: 555–566.
- Xu, Zhang, L., Yu, J., Wageh, S., Al-Ghamdi, A.A., dan Jaroniec, M. 2018B. Direct Z-scheme photocatalysts: Principles, synthesis, and applications. *Materials Today*. 21:10: 1042–1063.
- Xuan, J., Lu, L., Chen, J., dan Xiao, W. 2013. Visible-Light-Driven Photoredox Catalysis in the Construction of Carbocyclic and Heterocyclic Ring Systems. *European Journal of Organic Chemistry*. 2013:30: 6755–6770.
- Yamamoto, H., Yamaoka, K., Shinohara, A., Shibata, K., Takao, K., dan Ogura, A. 2023. Red-light-mediated Barton decarboxylation reaction and one-pot wavelength-selective transformations. *Chemical Science*. 14:40: 11243–11250.
- Yang, H., Jiang, B., Sun, Y., Zhang, L., Huang, Z., Sun, Z., dan Yang, N. 2017. Heterogeneous oxidative desulfurization of diesel fuel catalyzed by mesoporous polyoxometallate-based polymeric hybrid. *Journal of Hazardous Materials*. 333: 63–72.
- Yang, P.-K. 2016. How does Planck's constant influence the macroscopic world? *European Journal of Physics*. 37:5: 055406.

- Yang, Zhang, C., Lai, C., Zeng, G., Huang, D., Cheng, M., Wang, J., Chen, F., Zhou, C., dan Xiong, W. 2018A. BiOX (X = Cl, Br, I) photocatalytic nanomaterials: Applications for fuels and environmental management. *Advances in Colloid and Interface Science*. 254:NA: 76–93.
- Yang, Zhang, W., Liu, R., Cui, J., dan Deng, C. 2018B. Preparation and photocatalytic properties of visible light driven Ag-AgBr-RGO composite. *Separation and Purification Technology*. 190:NA: 278–287.
- Ye, Feng, Y., Bruning, H., Yntema, D., dan Rijnaarts, H.H.M. 2018A. Photocatalytic degradation of metoprolol by TiO₂ nanotube arrays and UV-LED: Effects of catalyst properties, operational parameters, commonly present water constituents, and photo-induced reactive species. *Applied Catalysis B: Environmental*. 220:NA: 171–181.
- Ye, Zhang, P., Zhang, G., Wang, S., Nabi, M., Zhang, Q., dan Zhang, H. 2018B. Biotransformation of high sulfur fat coal with indigenous and exotic microorganisms. *Journal of Cleaner Production*. 197: 562–570.
- Yi, H., Huang, D., Qin, L., Zeng, G., Lai, C., Cheng, M., Ye, S., Song, B., Ren, X., dan Guo, X. 2018. Selective prepared carbon nanomaterials for advanced photocatalytic application in environmental pollutant treatment and hydrogen production. *Applied Catalysis B: Environmental*. 239:NA: 408–424.
- Yop, Z.K., Park, S.-J., dan Rhee, Y. 2019. A modeling methodology to investigate the effect of interfacial adhesion on the yield strength of MMT reinforced nanocomposites. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 69:NA: 331–337.
- Yu, G., Fang, Y., Li, H., Wang, C., dan Zhang, D. 2021. Establishment and application of prediction model of natural gas reserve and production in Sichuan Basin. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 11:6: 2679–2689.
- Yu, H., Xu, L., Wang, P., Wang, X., dan Yu, J. 2014. Enhanced photoinduced stability and photocatalytic activity of AgBr photocatalyst by surface modification of Fe(III) cocatalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*. 144:NA: 75–82.

- Yu, J.-J., Yu, Q., Jin, Y., dan Chang, S.-G. 1997. Reduction of Sulfur Dioxide by Methane to Elemental Sulfur over Supported Cobalt Catalysts. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 36:6: 2128–2133.
- Yu, Jiang, Z., Li, W., Mayta, J.Q., Ding, H., Song, Y., Li, Z., Dong, Z., Pan, F., Wang, B., Zhang, P., dan Cao, X. 2018A. Elevated performance of hybrid membranes by incorporating metal organic framework CuBTC for pervaporative desulfurization of gasoline. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 123: 12–19.
- Yu, Zhao, J., Zhang, J., Zuo, W., Kong, L., dan Cui, Hao, N.T. 2018B. Z-scheme 2D/3D g-C₃N₄@ZnO with enhanced photocatalytic activity for cephalixin oxidation under solar light. *Chemical Engineering Journal*. 352:NA: 412–422.
- Yuan, D., dan Liu, Q. 2022. Photon energy and photon behavior discussions. *Energy Reports*. 8: 22–42.
- Yuan, X., Jiang, L., Liang, J., Pan, Y., Zhang, J., Wang, H., Leng, L., Wu, Z., Guan, R., dan Zeng, G. 2019. In-situ synthesis of 3D microsphere-like In₂S₃/InVO₄ heterojunction with efficient photocatalytic activity for tetracycline degradation under visible light irradiation. *Chemical Engineering Journal*. 356:NA: 371–381.
- Yun, L., Yang, Z., Yu, Z.-B., Cai, T., Li, Y., Guo, C., Qi, C., dan Ren, T. 2017. Synthesis of four-angle star-like CoAl-*MMO*/BiVO₄ p–n heterojunction and its application in photocatalytic desulfurization. *RSC Advances*. 7:41: 25455–25460.
- Zadek, S. 2019. Financing a Just Transition. *Organization & Environment*. 32:1: 18–25.
- Zaidi, Z., dan Sorokhaibam, L.G. 2022. Sequential Approach to Liquid Fuel Desulfurization through *Rhodococcus erythropolis* Assisted Molybdenum Modified *Euryale ferox* Biomass. *Energy & Fuels*. 36:3: 1614–1625.
- Zarrabi, M., Entezari, M.H., dan Goharshadi, E.K. 2015. Photocatalytic oxidative desulfurization of dibenzothiophene by C/TiO₂@MCM-41 nanoparticles under visible light and mild conditions. *RSC Advances*. 5:44: 34652–34662.
- Zeng, L., Huang, L., Lin, W., Jiang, L.-H., dan Han, G. 2023. Red light-driven

- electron sacrificial agents-free photoreduction of inert aryl halides via triplet-triplet annihilation. *Nature Communications*. 14:1: 1102.
- Zeng, X., Xiao, X., Chen, J., dan Wang, H. 2019. Electron-hole interactions in choline-phosphotungstic acid boosting molecular oxygen activation for fuel desulfurization. *Applied Catalysis B: Environmental*. 248:NA: 573–586.
- Zeng, X., Xiao, X., Li, Y., Chen, J., dan Wang, H. 2017. Deep desulfurization of liquid fuels with molecular oxygen through graphene photocatalytic oxidation. *Applied Catalysis B: Environmental*. 209:NA: 98–109.
- Zhang, G., Yang, F., Liu, X., Zhao, H., Che, S., Li, J., Yan, X., Sun, S., Chen, F., Xu, C., Liu, H., Wei, Q., dan Li, Y. 2022. Tuning surface chemical property in hierarchical porous carbon via nitrogen and phosphorus doping for deep desulfurization. *Separation and Purification Technology*. 280: 119923.
- Zhang, J., Wang, A., Li, X., dan Ma, X. 2011. Oxidative desulfurization of dibenzothiophene and diesel over [Bmim]3PMo12O40. *Journal of Catalysis*. 279:2: 269–275.
- Zhang, M., dan Wang, W. 2014. Analysis of spatial distribution of global energy-related CO₂ emissions. *Natural Hazards*. 73:2: 165–171.
- Zhang, S., Zhang, Q., dan Zhang, Z.C. 2004. Extractive Desulfurization and Denitrogenation of Fuels Using Ionic Liquids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 43:2: 614–622.
- Zhang, Thrithamarassery Gangadharan, D., Liu, Y., Xu, Z., Chaker, M., dan Ma, D. 2017. Recent advancements in plasmon-enhanced visible light-driven water splitting. *Journal of Materiomics*. 3:1: 33–50.
- Zhang, X., Zuo, G., Lu, X., Tang, C., Cao, S., dan Yu, M. 2017. Anatase TiO₂ sheet-assisted synthesis of Ti³⁺ self-doped mixed phase TiO₂ sheet with superior visible-light photocatalytic performance: Roles of anatase TiO₂ sheet. *Journal of Colloid and Interface Science*. 490:NA: 774–782.
- Zhang, Y.-L., dan Cao, F. 2015. Fine particulate matter (PM_{2.5}) in China at a city level. *Scientific Reports*. 5:1: 14884.
- Zhao, D., Yang, X., Chen, C., dan Wang, X. 2013. Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue on multiwalled carbon nanotubes–TiO₂.

- Journal of Colloid and Interface Science*. 398:NA: 234–239.
- Zhao, H., dan Baker, G.A. 2015. Oxidative desulfurization of fuels using ionic liquids: A review. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 9:3: 262–279.
- Zhao, X. 2010. Porous materials for direct and indirect evaporative cooling in buildings., in: *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings*. Elsevier, hal. 399–426.
- Zheng, B., Tong, D., Li, M., Liu, F., Hong, C., Geng, G., Li, H., Li, X., Peng, L., Qi, J., Yan, L., Zhang, Y., Zhao, H., Zheng, Y., He, K., dan Zhang, Q. 2018. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 18:19: 14095–14111.
- Zhong, Q., Shen, H., Yun, X., Chen, Y., Ren, Y., Xu, H., Shen, G., Du, W., Meng, J., Li, W., Ma, J., dan Tao, S. 2020. Global Sulfur Dioxide Emissions and the Driving Forces. *Environmental Science & Technology*. 54:11: 6508–6517.
- Zhong, Q., Shen, H., Yun, X., Chen, Y., Ren, Y., Xu, H., Shen, G., Ma, J., dan Tao, S. 2019. Effects of International Fuel Trade on Global Sulfur Dioxide Emissions. *Environmental Science & Technology Letters*. 6:12: 727–731.
- Zhou, Ma, dan Song. 2006. Liquid-Phase Adsorption of Multi-Ring Thiophenic Sulfur Compounds on Carbon Materials with Different Surface Properties. *The Journal of Physical Chemistry B*. 110:10: 4699–4707.
- Zhou, X., Wang, T., Liu, H., Gao, X., Wang, C., dan Wang, G. 2021. Desulfurization through Photocatalytic Oxidation: A Critical Review. *ChemSusChem*. 14:2: 492–511.
- Zhou, Y., Shan, Y., Liu, G., dan Guan, D. 2018. Emissions and low-carbon development in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area cities and their surroundings. *Applied Energy*. 228: 1683–1692.
- Zhu, Q., Xiao, S., Hua, Z., Yang, D., Hu, M., Zhu, Y.-T., dan Zhong, H. 2021. Near Infrared (NIR) Light Therapy of Eye Diseases: A Review. *International Journal of Medical Sciences*. 18:1: 109–119.
- Zhu, S., Cheng, H., Dai, Y., Gao, J., dan Jiang, X. 2020. Extractive Desulfurization and Denitrogenation from Fuel Oil by a Polyether-Amine-Based Solvent.

- Energy & Fuels*. 34:7: 8186–8194.
- Zhu, T., Kundakovic, L., Dreher, A., dan Flytzani-Stephanopoulos, M. 1999. Redox chemistry over CeO₂-based catalysts: SO₂ reduction by CO or CH₄. *Catalysis Today*. 50:2: 381–397.
- Zhu, W., Li, H., Gu, Q., Wu, P., Zhu, G., Yan, Y., dan Chen, G. 2011. Kinetics and mechanism for oxidative desulfurization of fuels catalyzed by peroxo-molybdenum amino acid complexes in water-immiscible ionic liquids. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 336:1–2: 16–22.
- Zhu, Wang, C., Li, Hongping, Wu, P., Xun, S., Jiang, W., Chen, Z., Zhao, Z., dan Li, Huaming. 2015A. One-pot extraction combined with metal-free photochemical aerobic oxidative desulfurization in deep eutectic solvent. *Green Chemistry*. 17:4: 2464–2472.
- Zhu, Z., Lin, H., Chi, M., Gao, X., Feng, Y., Yang, K., dan Lü, H. 2022. Unveiling structure-function relationships in deep eutectic solvents based biomimetic catalysis for aerobic oxidative desulfurization. *Fuel*. 308: 122070.
- Zhu, Zhang, P., dan Dai, S. 2015B. Recent Advances of Lanthanum-Based Perovskite Oxides for Catalysis. *ACS Catalysis*. 5:11: 6370–6385.
- Zou, W., Deng, B., Hu, X., Zhou, Y., Pu, Y., Yu, S., Ma, K., Sun, J., Wan, H., dan Dong, L. 2018. Crystal-plane-dependent metal oxide-support interaction in CeO₂/g-C₃N₄ for photocatalytic hydrogen evolution. *Applied Catalysis B: Environmental*. 238:NA: 111–118.
- Zou, X. 2021. Institutional Deficiencies of the Paris Agreement and China's Compliance Capacity: An Evaluation after US Withdrawal. *China: An International Journal*. 19:2: 164–177.