

TESIS
DESULFURISASI MINYAK DIESEL SECARA *BATCH*
DENGAN BANTUAN SINAR TAMPAK MERAH DAN
METAL



ISMAIL
03012682327001

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

HALAMAN PENGESAHAN

DESULFURISASI MINYAK DIESEL SECARA BATCH
DENGAN BANTUAN SINAR TAMPAK MERAH DAN
METAL

TESIS

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan
Gelar 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,

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya



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

NIP. 197502112003121002

Ketua Jurusan Teknik Kimia



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

NIP. 197502012000122001

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa Laporan Tesis ini dengan judul “Desulfurisasi Minyak Diesel Secara *Batch* dengan Bantuan Sinar Tampak Merah dan *Meta*” 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

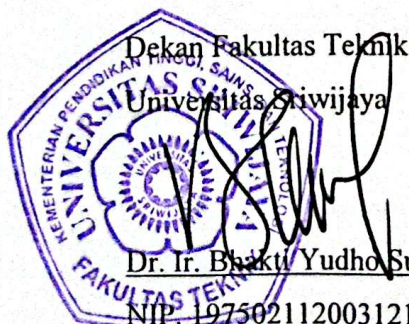
()

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 : Ismail

NIM : 03012682327001

Judul : Desulfurisasi Minyak Diesel Secara Batch dengan Bantuan Sinar Tampak Merah dan Metal

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



Ismail

NIM. 03012682327001

RINGKASAN

DESULFURISASI MINYAK DIESEL SECARA BATCH DENGAN BANTUAN SINAR TAMPAK MERAH DAN METAL

Karya tulis ilmiah berupa Tesis, 1 Januari 2025

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

Batch Desulfurization of Diesel Oil with The Assistance of Red Visible Light and Metal

xiv + 101 Halaman, 5 Tabel, 26 Gambar

RINGKASAN

Minyak diesel yang digunakan di Indonesia memiliki kandungan sulfur yang sangat tinggi, mencapai 1.200 bagian per juta (ppm). Hal ini telah diidentifikasi sebagai masalah lingkungan yang signifikan karena dampaknya yang merusak pada organisme hidup. Proses desulfurisasi konvensional untuk minyak diesel telah diimplementasikan; namun, efisiensi metode ini terbatas karena kebutuhan akan aditif, katalis, dan kondisi operasi yang tinggi. Penelitian ini menyajikan pendekatan inovatif untuk desulfurisasi minyak diesel yang berasal dari minyak kilang dengan menggunakan sinar tampak merah. Proses ini hemat biaya, lebih aman, dan ramah lingkungan, serta terjadi di bawah kondisi ambient. Analisis kandungan sulfur menunjukkan bahwa minyak diesel dapat didesulfurisasi dari 1.200 ppm menjadi 500-670 ppm. Penggabungan logam Sn dan PbO menghasilkan efek iradiasi yang lebih nyata pada minyak diesel, menunjukkan penurunan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan proses tanpa penambahan logam ketika daya lampu ditingkatkan.

Kata Kunci: minyak diesel, sinar tampak merah, sulfur, metal, kondisi ambient

Kepustakaan: 223 (1901-2024)

SUMMARY

BATCH DESULFURIZATION OF DIESEL OIL WITH THE ASSISTANCE OF RED VISIBLE LIGHT AND METAL

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

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

Desulfurisasi Minyak Diesel Secara Batch dengan Bantuan Sinar Tampak Merah dan Metal

xiv + 101 Pages, 5 Tables, 26 Pictures

SUMMARY

The diesel oil utilized in Indonesia is characterized by a remarkably elevated sulfur content, reaching 1,200 parts per million (ppm). This has been identified as a significant environmental issue due to its deleterious impact on living organisms. Conventional desulfurization processes for diesel oil have been implemented; however, the efficiency of these methods is limited due to the necessity for additives, catalysts, and high operating conditions. This research presents an innovative approach to the desulfurization of diesel oil derived from refinery oil using red visible light. This process is cost-effective, safer, and environmentally friendly, and it occurs under ambient conditions. The sulfur content analysis demonstrated that diesel oil can be desulfurized from 1,200 ppm to 500-670 ppm. The incorporation of Sn and PbO metals resulted in a more pronounced irradiation effect on diesel oil, exhibiting a significantly higher decrease compared to the process without metal addition when the lamp power was increased.

Keywords: diesel oil, red visible light, sulfur, metal, ambient condition

Citations: 223 (1901-2024)

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan atas kehadiran Allah SWT atas berkat rahmat dan hidayah-nya sehingga saya dapat menyelesaikan karya tulis ilmiah berupa laporan tesis yang berjudul “Desulfurisasi Minyak Diesel secara *Batch* dengan Bantuan Sinar Tampak Merah dan *Metal*” dapat diselesaikan dengan baik. Isi laporan tesis ini diharapkan dapat bermanfaat dan berguna bagi pembaca dan semoga penurunan kandungan Sulphur pada produk Minyak Diesel dapat dilakukan sehingga gas hasil pembakaran produk Minyak Diesel tidak merusak lingkungan.

Laporan tesis ini dibuat sebagai salah satu syarat yang harus dilewati dan dikerjakan untuk memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) pada Program Studi Teknik Kimia BKU Teknologi Petrokimia Program Pascasarjana Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya. Besar harapan penulis agar isi laporan tesis ini dapat bermanfaat secara nyata bagi kehidupan, dan diharapkan mahasiswa dapat mempelajari dan memahami aplikasi ilmu yang didapatkan dibangku kuliah dalam kehidupan nyata.

Laporan tesis ini tidak terselesaikan tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, ucapan terima kasih diberikan penulis kepada:

1. Orang tua dan keluarga tercinta yang telah memberikan doa, semangat, dan motivasi yang sehingga proposal tesis ini dapat diselesaikan dengan baik.
2. Prof. Dr. Ir. H.M. Djoni Bustan, M.Eng., selaku dosen pembimbing tesis ke-I yang selalu memberikan bimbingan dan arahan hingga pengerjaan tesis berjalan lancar.
3. Prof. Dr. Ir. Hj. Sri Haryati, DEA, selaku dosen pembimbing tesis ke-II yang selalu memberikan bimbingan dan arahan hingga pengerjaan tesis berjalan lancar.
4. Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T., IPM. selaku dekan Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
5. Dr. Selpiana, S.T., M.T, selaku ketua prodi Magister Teknik Kimia Universitas Sriwijaya.
6. Dr. Tuti Indah Sari, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Kimia Universitas Sriwijaya.

7. Dr. Fitri Hadiyah, S.T., M.T. selaku Sektretaris Jurusan Teknik Kimia Universitas Sriwijaya.
8. Ibu Laras selaku admin prodi Magister Teknik Kimia yang selalu membantu proses administrasi selama pengerjaan tesis.
9. Orang Tua, Istri dan Anak-anak yang telah memberikan dukungan dan semangat.
10. Rekan-rekan di Bengkel Teknik Kimia Pascasarjana Unsri yang telah memberikan dukungan dan semangat.
11. Rekan-rekan di Laboratory Fuel PT. Kilang Pertamina Internasional (KPI) Plaju khususnya shift D yang telah memberikan dukungan dan semangat.
12. Teman-teman seperjuangan Magister Teknik Kimia 2023 dan teman-teman terdekat serta semua pihak yang selalu memberikan dukungan dan semangat yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Akhir kata diharapkan kritik dan saran yang bersifat ilmiah dan membangun agar laporan tesis ini dapat lebih bermanfaat sebagaimana mestinya.

Palembang, Desember 2024

Hormat Saya,

Ismail

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR NOTASI.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Permasalahan.....	8
1.3. Tujuan.....	15
1.4. Keterbaruan	17
1.5. Ruang Lingkup	17
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	18
2.1. Emisi Sulfur.....	18
2.1.1. Senyawa Sulfur dalam Bahan Bakar Minyak	24
2.1.2. Peraturan Kandungan Sulfur dalam Bahan Bakar Minyak	25
2.2. Proses Desulfurisasi Konvensional yang Umum Digunakan di Industri .	27
2.2.1. Proses Desulfurisasi dengan Metode Hidrodesulfurisasi.....	29
2.2.2. Proses Desulfurisasi dengan Metode Biodesulfurisasi	32
2.2.3. Proses Desulfurisasi dengan Metode Pervaporasi.....	34
2.2.4. Proses Desulfurisasi dengan Metode Ekstraktif.....	36

2.2.5.	Proses Desulfurisasi dengan Metode Oksidatif.....	37
2.2.6.	Proses Desulfurisasi dengan Metode Adsorpsi	40
2.3.	Sinar dalam Proses Desulfurisasi	56
2.3.1.	Sinar	56
2.3.2.	Aplikasi Sinar pada Berbagai Reaksi.....	57
2.3.3.	Aplikasi Sinar Merah pada Reaksi Kimia.....	59
2.4.	Efek <i>Metal</i> pada Sinar	59
BAB III KONSEP DESAIN PENELITIAN		61
3.1.	Langkah – langkah Penelitian	61
3.2.	Analisa Penelitian.....	62
3.3.	Diagram Alir Penelitian.....	63
3.4.	Skema Proses Penelitian.....	64
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		65
4.1.	Pengaruh Daya Sinar Merah (5 W s.d. 20 W) dan Waktu Iradiasi (10 s.d. 60 menit) terhadap Hasil Desulfurisasi	65
4.2.	Pengaruh Daya Sinar Merah (20 W, 50 W, 80 W) dan Waktu Iradiasi (5 jam dan 10 jam) terhadap Hasil Desulfurisasi	66
4.3.	Pengaruh <i>Metal</i> dalam Peningkatan Sinar Merah dalam Desulfurisasi Minyak Diesel	70
4.4.	Analisa Karakterisasi Minyak Diesel yang Di-iradiasi	75
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		78
5.1.	Kesimpulan.....	78
5.2.	Saran	78
DAFTAR PUSTAKA		79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1. Pemanfaatan Energi di Indonesia (BPPT, 2021).....	1
Gambar 2. 1. Metode Desulfurisasi untuk Menghilangkan Sulfur secara Efisien dan Menghasilkan Bahan Bakar Ramah Lingkungan (Haruna dkk., 2022).	21
Gambar 2. 2 . Kontribusi yang Dipublikasikan selama Sepuluh Tahun Terakhir di Bidang yang Terkait dengan Desulfurisasi Bahan Bakar Minyak (Haruna dkk., 2022)	23
Gambar 2. 3. Struktur Atomistik 3D dari Beberapa Senyawa Belerang dan Turunannya (Haruna dkk., 2022).	24
Gambar 2. 4. Konsumsi Minyak Mentah (Ribu Barel Per Hari) per Tahun dari Sepuluh Negara Teratas (Saha dkk., 2021).	28
Gambar 2. 5. Kemungkinan Jalur HDS Senyawa DBT (Saha dkk., 2019).	30
Gambar 2. 6. Senyawa Organosulfur yang Berbeda menurut Tingkat Kesulitannya untuk HDS (Tran dkk., 2018).	31
Gambar 2. 7. Jalur BDS senyawa DBT (Moheballi dan Ball, 2016).	32
Gambar 2. 8. Proses Desulfurisasi Pervaporatif (Fihri dkk., 2016).	35
Gambar 2. 9. Hubungan Konstanta Laju Oksidasi dan Densitas Elektron Senyawa Sulfur (Rajendran dkk., 2020A).	38
Gambar 2. 10. Proses ODS yang Dikombinasikan dengan EDS (Rajendran dkk., 2020A).	39
Gambar 2. 11. Mekanisme Adsorpsi yang Berbeda yang Bekerja dengan Adsorben berbasis Zeolit dan Benzotiofen (Lee dan Valla, 2019).	41
Gambar 2. 12. Efisiensi Desulfurisasi (a) A0 (γ -Al ₂ O ₃), Z5 (Zn/ γ - Al ₂ O ₃), C5 (Cu / γ - Al ₂ O ₃), N5 (Ni/ γ - Al ₂ O ₃), A5 (Ag/ γ - Al ₂ O ₃) (Liao dkk., 2015)	46
Gambar 2. 13. Analisis NH ₃ - TPD - TiO ₂ - SiO ₂ Oksida <i>Metal</i> Campuran pada berbagai % Berat SiO ₂ (Qin dkk., 2018).	47
Gambar 2. 14. Interaksi antara (-NH ₂) dan Gugus Karboksilat (-COOH) dari UiO-66 dan senyawa belerang (Zhang dkk., 2018).	54
Gambar 3. 1. Alur Penelitian.....	63
Gambar 3. 2. Skema Proses Penelitian.....	64

Gambar 4. 1 Hasil Desulfurisasi Sinar Merah tanpa <i>Metal</i> pada Daya Sinar Merah (5 W s.d. 20 W) dan Waktu Iradiasi (10 s.d. 60 menit)	65
Gambar 4. 2. Kandungan Sulfur (ppm) Minyak Diesel dengan Variasi Waktu Iradiasi (5 dan 10 jam) dan Variasi Metal (No Metal, Cu, Fe, PbO, Sn).....	69
Gambar 4. 3. <i>Removal of Sulfur</i> (%) dari Minyak Diesel dengan Variasi Waktu Iradiasi (5 & 10 jam) dan Variasi Metal (No Metal, Cu, Fe, PbO, Sn)	69
Gambar 4. 4. Energi Foton Berbanding dengan Daya pada Minyak Diesel yang Di-iradiasi Sinar Tampak Merah.....	71
Gambar 4. 5. Pengaruh Daya Sinar dan <i>Metal</i> terhadap Perubahan Frekuensi ..	72
Gambar 4. 6. Pengaruh Daya Sinar dan <i>Metal</i> terhadap Perubahan Panjang Gelombang Sinar Tampak Merah	72
Gambar 4. 7. Energi Kinetik Maksimum <i>Metal</i> Cu dan PbO	73
Gambar 4. 8. Energi Kinetik Maksimum <i>Metal</i> Fe dan Sn.....	74
Gambar 4. 9. Analisa FTIR Minyak Diesel yang Diiradiasi Sinar Tampak Merah dengan <i>Metal</i> Sn.....	76
Gambar 4. 10. Analisa FTIR Minyak Diesel yang Diiradiasi Sinar Tampak Merah dengan <i>Metal</i> PbO.....	77

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1. Permasalahan Penelitian yang Ada.....	11
Tabel 2. 1. Batas Sulfur (ppm) Bensin dan Solar per Tahun yang Diberlakukan oleh Negara-negara Berkembang (Rajendran dkk., 2020A).....	29
Tabel 2. 3. Efisiensi Adsorben yang Berbeda untuk Desulfurisasi Bahan Bakar Model.	42
Tabel 2. 4. Efisiensi Adsorben Zeolit Tipe-Y (% adsorpsi) untuk Desulfurisasi Bahan Bakar Model (Yoosuk dkk., 2020).	49
Tabel 4. 1. Hasil Desulfurisasi Minyak Diesel oleh Iradiasi Sinar Merah dengan Bantuan <i>Metal</i>	67

DAFTAR NOTASI

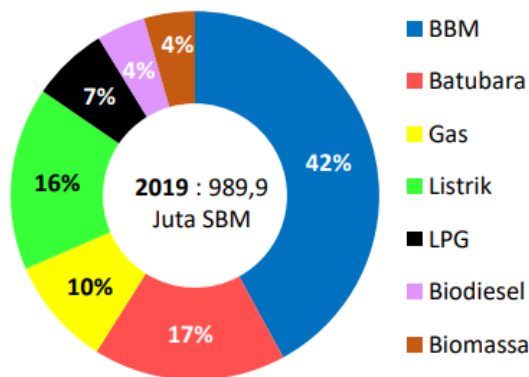
λ	: Panjang gelombang (nm)
E_{kmax}	: Energi kinetik maksimum sinar (kJ mol^{-1})
E_o	: Energi ambang batas <i>metal</i> (kJ mol^{-1})
E_p	: Energi Foton (J s^{-1})
f	: Frekuensi sinar (Hz)
h	: Konstanta plack (J s^{-1})
BT	: <i>Benzotiofena</i>
DBT	: <i>Dibenzotiofena</i>
DMBT	: <i>Dimetilbezotiofena</i>
DRS	: <i>Diffuse Reflectansion Spectroscopy</i>
ECODS	: <i>Extraction and Catalytic Oxidative Desulfurization System</i>
EDS	: <i>Extractive Desulfurization Sulfur</i>
FTIR	: <i>Fourier Transform Infrared</i>
HDS	: <i>Hydrodesulfurization Sulfur</i>
IL	: <i>Ionic Liquid</i>
LED	: <i>Light Emitting diode</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>
XPS	: <i>X-ray Photoelectron Spectroscopy</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara dengan konsumsi energi terbesar di Kawasan Asia Tenggara dan urutan kelima di Asia Pasifik dalam konsumsi energi primer, setelah negara China, India, Jepang, dan Korea Selatan. Pertumbuhan PDB yang tinggi, mencapai rata-rata 6,04% per tahun selama periode 2017-2050, diperkirakan akan semakin mendorong peningkatan kebutuhan energi Indonesia di masa depan. Hal ini menyebabkan peran Indonesia dalam pasar energi dunia dan dalam upaya penurunan emisi rumah kaca global bertambah signifikan (BPPT, 2021).



Gambar 1. 1. Pemanfaatan Energi di Indonesia (BPPT, 2021)

Pada tahun 2019, Konsumsi energi Indonesia sebaesar 989,9 juta SBM (Setara Barel Minyak). Sektor transportasi merupakan pengguna energi terbesar dibandingkan sektor pengguna energi lainnya. Energi yang digunakan di sektor transportasi hampir keseluruhannya menggunakan BBM (BPPT, 2021). BBM yang digunakan diantaranya Peralite, Pertamina, Biosolar B35, Dexlite, dan Pertadex. Biosolar B-35 merupakan bahan bakar yang digunakan untuk mesin diesel yang digunakan pada transportasi, pertambangan, dll. Biosolar B-35 didapatkan dari hasil pencampuran 65% Minyak Diesel dengan 30% biodiesel. Minyak Diesel adalah bahan bakar minyak untuk mesin diesel yang didapatkan dari proses

fraksinasi *crude oil* di *Crude Distilling Unit*. Sedangkan Biodiesel adalah bahan bakar nabati untuk aplikasi mesin/motor diesel berupa ester metil asam lemak (fatty acid methyl ester/FAME) yang terbuat dari minyak nabati atau lemak hewani melalui proses esterifikasi/transesterifikasi.

Surat Keputusan Dirjen Migas No. 447.K/MG.06/DJM/2023 tanggal 27 Desember 2023 mengatur tentang tentang Standar dan Mutu (Spesifikasi) Bahan Bakar Minyak jenis Minyak Solar (B0) dengan Angka Setana (CN) 48 dengan Campuran Biodiesel (B100) 35% (B-35) yang Dipasarkan dalam Negeri. Regulasi ini mengatur agar penggunaan Biosolar B35 tidak menyebabkan hal negatif untuk kendaraan dan lingkungan. Pada regulasi ini salah satunya mengatur jumlah maksimal kandungan sulphur yang terkandung pada produk Biosolar B35. Pada tahun 2024 maksimal 0,2 % massa (setara 2000 ppm), tanggal 1 Desember 2027 maksimal 0,005 % massa (setara 500 ppm) (Dirjen Migas, 2023).

Minyak mentah terdiri dari berbagai macam hidrokarbon dan campuran lain yang mengandung senyawa organosulfur atau *Organosulfuric Compounds* (OSC), nitrogen, dan oksigen dalam jumlah yang bervariasi, yang sebagian besar tetap berada dalam produk minyak bumi olahan termasuk diesel, bensin, dan bahan bakar jet (Abdullah dan Xing, 2018; Speight, 2016). Senyawa sulfur yang terdapat dalam *crude oil* diantaranya thiols, sulfide, sulfide siklis, disulfide, tiofen, benzotiofen, dibenzotiofen, dan naftobenzotiofen. Keberadaan OSC dalam bahan bakar tersebut tidak diundang karena emisi SO_x dari pembakarannya, yang merupakan penyebab utama pemanasan global, hujan asam, dan kontaminasi atmosfer, serta beberapa masalah kesehatan termasuk penyakit pernapasan, penyakit jantung, dan asma (Rezvani dkk., 2018). Dalam proses otomotif dan penyulingan, sulfur juga tidak diinginkan karena cenderung menonaktifkan katalis dan menyebabkan masalah korosi pada pipa dan peralatan penyulingan (Srivastava, 2012). Dalam bahan bakar, senyawa sulfur terdapat dalam berbagai bentuk yang dapat dikategorikan ke dalam empat kelompok utama, yaitu merkaptan, sulfida, disulfida, dan tiofen (TH).

Ketika dihadapkan pada kebijakan pengendalian polusi yang lebih ketat, negara-negara di seluruh dunia telah memvalidasi bahwa pembuangan konsentrasi sulfur harus di bawah 50 ppm atau bahkan kurang dari itu. Untuk mengurangi

kandungan sulfur agar memenuhi persyaratan peraturan lingkungan yang ketat, perhatian yang signifikan telah diberikan pada pengembangan proses yang efisien untuk membuat bahan bakar yang lebih bersih (Farzin Nejad dkk., 2013; G dkk., 2015; Huang dkk., 2011). Teknik konvensional untuk menghilangkan sulfur dari bahan bakar dikenal sebagai hidrodessulfurisasi (HDS). HDS sangat efektif dalam menghilangkan senyawa sulfur asiklik dan alifatik seperti sulfida, disulfida, dan tiol, dengan mengubahnya menjadi hidrogen sulfida (Zhang dkk., 2013). Namun demikian, teknologi ini dioperasikan pada tekanan tinggi (3-6 MPa) dan suhu (200-450°C), menggunakan katalis yang mahal, dan membutuhkan hidrogen, yang membuatnya kurang mampu mengurangi kandungan sulfur (ChenK dkk., 2018; Ja'fari dkk., 2018). Selain itu, katalis HDS mengalami kesulitan dalam mereduksi beberapa senyawa sulfur bandel seperti dibenzotiofen (DBT) dan turunannya karena adanya penghalang sterik (GaoJ dkk., 2018). HDS terutama dilanjutkan melalui rute hidrogenasi sehubungan dengan penghalang sterik tersebut. Meskipun katalis *metal* mulia yang didukung berkinerja baik dalam hidrogenasi, katalis tersebut mudah diracuni dan dinonaktifkan oleh sulfur. Untuk mengatasi masalah tersebut dan untuk mempercepat proses HDS, proses paduan untuk mengurangi sensitivitas sulfur dan pendukung asam yang memungkinkan dealkalisasi dan isomerisasi gugus alkil digunakan. Hal ini menghasilkan spesies yang lebih reaktif dari senyawa tahan api (Sun dkk., 2010). Karena ketidakefektifan HDS, pengembangan metode yang lebih baik untuk desulfurisasi bahan bakar secara mendalam semakin menarik perhatian. Sangatlah penting untuk memperkenalkan pendekatan lain terhadap desulfurisasi, seperti *Extractive Desulfurization* (EDS), *Adsorptive Desulfurization* (ADS), *Biodesulfurization* (BDS), dan *Oxidative Desulfurization* (ODS).

EDS adalah teknologi yang banyak digunakan karena dapat dilakukan pada tekanan dan suhu sekitar. Kriteria penting untuk ekstraktan atau pelarut yang baik meliputi kemampuan ekstraksi yang baik, kemurnian yang tinggi, ramah lingkungan, tidak beracun, dan dapat digunakan kembali. Banyak jenis ekstraktan seperti air, N, N-dimetilformamida, asetonitril, metanol, dan dimetilsulfoksida telah dieksplorasi dalam EDS (Rodríguez-Cabo dkk., 2013). Namun, masalah

lingkungan dan keselamatan yang muncul, seperti emisi air limbah dan bahaya kebakaran yang timbul dari senyawa organik yang mudah terbakar dan mudah menguap, telah menjadi perhatian dunia. Selain itu, efisiensi EDS dalam ekstraksi tunggal masih belum terlalu memuaskan dan ekstraksi ganda biasanya penting untuk mendapatkan kandungan sulfur yang ditetapkan dalam bahan bakar minyak (Lü dkk., 2014). Karena pelarut organik umum yang disebutkan di atas tidak mencapai hasil yang menjanjikan dan memiliki keterbatasan dalam masalah lingkungan dan penggunaan kembali, agen ekstraksi baru sedang dicari secara luas.

Adsorptive desulphurization (ADS) memiliki beberapa keunggulan dalam hal skalabilitas untuk mendesulfurisasi bahan bakar hidrokarbon ke konsentrasi sulfur yang rendah tanpa memerlukan hidrogen. Hal ini dapat menjadi langkah pemolesan untuk proses HDS dan memberikan metode alternatif untuk mengurangi biaya produksi bahan bakar yang lebih bersih yang secara kompeten dapat menghilangkan senyawa sulfur aromatik yang tahan api. Pemilihan adsorben untuk desulfurisasi ultra-dalam sangat penting karena bahan tersebut menyediakan area permukaan aktif dengan volume tinggi dengan ukuran pori-pori yang tepat (Triantafyllidis dan Deliyanni, 2014). Selain itu, persyaratan penting untuk adsorben yang efisien termasuk metode sintesis yang mudah, kondisi preparasi yang ringan, kemampuan regenerasi yang tinggi, dan kepraktisan lingkungan (Ahmed dan Jhung, 2016). Karena permukaan mikro/mesopori adsorben dapat dimodifikasi dengan menggunakan berbagai metode, maka dimungkinkan untuk menawarkan porositas dan karakteristik permukaan yang merupakan kriteria penting dalam kinerja desulfurisasi. Namun, terkadang masalah utama dengan adsorben umum adalah bahwa struktur, porositas, dan fungsionalitas permukaannya tidak didefinisikan secara eksplisit, dan oleh karena itu sulit untuk memodifikasinya untuk memenuhi persyaratan tertentu. Akibatnya, banyak penelitian telah didedikasikan untuk menyediakan adsorben baru dengan kemampuan adsorpsi yang menjanjikan dan selektivitas yang sangat baik serta dapat digunakan kembali, serta untuk memperjelas mekanisme adsorpsi (To dkk., 2016).

Desulfurisasi mikroba, juga dikenal sebagai *biodesulfurization* (BDS), melibatkan proses instalasi yang sederhana, konsumsi energi yang rendah, kondisi

reaksi yang ringan, dan biaya operasi yang rendah, penghilangan senyawa sulfur yang sangat selektif, dan lebih sedikit pembentukan produk samping yang tidak diinginkan (ChenS dkk., 2018; Ye dkk., 2018). Dalam BDS, DBT biasanya digunakan sebagai model senyawa sulfur. Banyak mikroorganisme yang telah digunakan dalam BDS termasuk *Rhodococcus erythropolis H-2*; *Rhodococcus sp. IGTS8*; *Mycobacterium sp. G3*; *Pseudomonas delafieldii R-8*; *Bacillus subtilis WU-S28*; *Microbacterium sp. ZD-M2*; dan *Mycobacterium pheli WU-F1*, dan lain-lain. Meskipun demikian, jalur BDS tidak layak secara komersial untuk bahan bakar minyak bumi karena sejumlah besar karbon termineralisasi sehingga mengurangi nilai bahan bakar (Almashjary dkk., 2018). Pendekatan yang sangat baru diperlukan untuk mengkomersialkannya, termasuk dengan meningkatkan aktivitas desulfurisasi spesifik, menghilangkan sulfur pada suhu yang lebih tinggi, toleransi fasa hidrokarbon, dan memisahkan galur-galur baru untuk menghilangkan lebih banyak jenis senyawa sulfur (de Araújo dkk., 2012).

Di antara teknologi desulfurisasi yang disebutkan di atas, ODS dianggap sebagai salah satu teknik yang paling menggembirakan untuk memenuhi peraturan lingkungan untuk desulfurisasi bahan bakar minyak yang sangat dalam (Shojaei dkk., 2014). Manfaat utama ODS adalah kondisi operasi yang ringan yang mencakup suhu rendah dan tekanan sekitar, serta kemampuannya yang tinggi untuk mengoksidasi dan mengkonversi sebagian besar senyawa sulfur yang tahan api seperti DBT tanpa adanya hidrogen (Banisharif dkk., 2019; Haghghat Mamaghani dkk., 2013). Untuk meningkatkan kinerja ODS, teknik bantuan lain biasanya digunakan seperti ODS adsorptif, ekstraktif, gelombang mikro, elektrokimia, ultrasonik, dan fotokatalitik (Abdi dkk., 2017; de Luna dkk., 2018; Du dkk., 2018; GaoS dkk., 2018; Lin dkk., 2016; Moaseri dkk., 2014). Selain itu, berbagai bahan katalis termasuk asam organik, heteropolyoxometalates, cairan ionik, saringan molekuler, dan fotokatalis telah dieksplorasi untuk ODS (Rezvani dkk., 2016). Hingga saat ini, berbagai jenis oksidan juga telah digunakan, seperti NO_2 , O_3 , H_2O_2 , dan zat pengoksidasi padat (Ali dkk., 2014). Perlu disebutkan bahwa produk teroksidasi dari ODS dapat dihilangkan dengan pelarut polar seperti asetonitril, air,

metanol, dll., Karena polaritasnya yang lebih tinggi daripada belerang (Rezvani dkk., 2017).

Dalam ODS dengan bantuan gelombang mikro, larutan reaksi mengalami kemungkinan pemanasan yang selektif dan cepat dibandingkan dengan proses pemanasan konvensional (Liew dkk., 2019). Hal ini disebabkan oleh sifat gelombang mikro yang dapat menembus dan menyebarkan energi dalam bahan, serta kemampuannya untuk menghasilkan panas secara merata di seluruh bahan, sehingga menyebabkan pemanasan yang cepat untuk proses pemanasan yang efisien dan cepat (State dkk., 2019). Mengambil keuntungan dari keunggulan tersebut, kinerja yang menjanjikan dapat dicapai dengan menggunakan ODS berbantuan gelombang mikro dalam kondisi reaksi yang lebih ringan (Shang dkk., 2013). Mesdour dkk. (2017) melaporkan ODS dengan bantuan gelombang mikro menggunakan cairan ionik (IL) dalam oksidasi yang dikatalisis oleh *metal* yang beroperasi pada tiga daya keluaran gelombang mikro yang berbeda, yaitu 150, 350, dan 500 W. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan daya iradiasi gelombang mikro meningkatkan kemanjuran desulfurisasi, dan 500 W memberikan kinerja tertinggi (86,67%) dalam waktu 90 detik. Patut dicatat bahwa radiasi gelombang mikro menghasilkan dua jenis energi aktivasi; (i) oksidasi cepat dan dekomposisi termal katalis dengan oksidan yang sangat polar untuk mempercepat kinerja desulfurisasi dan (ii) transpor energi termal dari senyawa sulfur yang sangat polar ke senyawa sulfur non-kutub seperti DBT dan turunannya, dengan penghilangan sulfur yang lebih baik. Dilaporkan bahwa keadaan statis molekul oksidan dipol dapat tereksitasi pada iradiasi gelombang mikro, yang akan dapat menginduksi kerangka molekul senyawa ke keadaan energi yang lebih tinggi, melemahkan ikatan Csingle bondS dan selanjutnya dioksidasi oleh oksidan untuk membentuk sulfoksida dan sulfonat (Shang dkk., 2013).

Electrochemical Oxidative Desulfurization (EOD) telah mendapat perhatian baru-baru ini, karena kemampuannya untuk mengurangi kandungan sulfur pada suhu dan tekanan ringan tanpa penambahan oksidan (Du dkk., 2018). Selain itu, produk desulfurisasi dan efisiensi reaksi dapat dikontrol dengan menggunakan potensial dan arus yang berbeda. Tang dkk. (2015) mengusulkan metode EOD

untuk pengurangan kandungan sulfur dalam minyak tanah, yang dilakukan dalam larutan NaCl. Diketahui bahwa Cl⁻ dari elektrolit NaCl teroksidasi membentuk Cl₂ dan ClO⁻ yang dapat mengoksidasi senyawa sulfur menjadi sulfoksida dan sulfonat. Dalam penelitian tersebut, N-methyl-2-pyrrolidone (NMP) digunakan untuk mengekstrak produk teroksidasi dari minyak tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 1-heptyl mercaptan sebagai senyawa sulfur utama dalam minyak tanah, teroksidasi secara efisien, yang dapat dipisahkan dengan ekstraksi. Setelah EOD, kandungan sulfur dalam minyak tanah berkurang menjadi 13,2 µg g⁻¹ dengan efisiensi desulfurisasi sebesar 92,7%. Meskipun demikian, perlu disebutkan bahwa teknologi ini masih memerlukan penelitian lebih lanjut untuk mendorongnya ke arah komersialisasi.

Demikian pula, *Ultrasound Assitance Oxidative Desulfurization* (UAOD) juga dapat dilakukan dalam kondisi ringan tanpa menggunakan hidrogen yang mudah meledak (Margeta dkk., 2016). Telah dilaporkan bahwa oksidasi senyawa sulfur terjadi pada sebagian besar pelarut atau pada antarmuka, yang jelas membutuhkan dispersi yang baik dari fase pelarut dan bahan bakar. Untuk itu, pulsa ultrasonik digunakan untuk membuat tetesan yang sangat kecil dengan dispersi tinggi dari kedua fase tersebut. Selain itu, air dalam larutan air dapat dengan mudah terurai di bawah ultrasound untuk membentuk radikal hidroksil dan hidrogen peroksida, yang sebagian dapat mengoksidasi senyawa sulfur menjadi sulphon. Selain itu, sonikasi juga dapat secara langsung menguraikan tiofen dan tioeter yang semi-volatil dan mudah menguap dalam larutan berair (Wu dan Ondruschka, 2010). Dengan memanfaatkan hal tersebut, reaktivitas yang lebih tinggi dari senyawa tiofena dicapai selama UAOD (98,4%), yang mengubahnya menjadi sulfoksida dan sulfonat yang sangat polar yang dapat dengan mudah dihilangkan dengan adsorpsi atau ekstraksi

Meskipun proses desulfurisasi yang disebutkan di atas memberikan hasil yang nyata, namun proses tersebut masih belum mencukupi untuk diaplikasikan di industri dengan proses yang efektif dan efisien. Proses yang banyak diterapkan di industri adalah hidrodessulfurisasi dan desulfurisasi oksidatif. Namun, proses tersebut tidak menguntungkan secara ekonomi karena penggunaan berbagai bahan

kimia dalam pembuatan katalis dan aditif untuk mendukung proses tersebut, termasuk kebutuhan H_2 dan H_2O_2 . Mengingat pertimbangan-pertimbangan ini, jelaslah bahwa desain proses yang mampu mencapai efisiensi desulfurisasi yang tinggi namun tetap layak secara ekonomi adalah yang terpenting. Pemanfaatan sinar merah tampak, yang hemat biaya dan memiliki sejarah aplikasi yang berhasil dalam banyak reaksi kimia, merupakan jalan yang menjanjikan untuk eksplorasi. Namun, potensinya untuk pemrosesan desulfurisasi sebagian besar masih belum dimanfaatkan. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang proses desulfurisasi yang dapat dilakukan dengan bantuan sinar merah tampak.

1.2. Permasalahan

Dalam menentukan permasalahan penelitian, perlu kajian penelitian terdahulu agar dapat menemukan dan menentukan permasalahan yang masih terjadi pada penelitian desulfurisasi ini. Seperti yang sudah disebutkan di awal, desulfurisasi saat ini memiliki lima proses umum yang digunakan yakni hidrodessulfurisasi, biodesulfurisasi, ekstraktif desulfurisasi, adsorptif desulfurisasi dan oksidatif desulfurisasi. Proses-proses ini belum maksimal karena memiliki beberapa kelemahan yang perlu dikembangkan dan menemukan proses alternatif yang lebih efisien. Selain itu, pengembangan telah dilakukan seperti penggunaan fotokatalis pada proses oksidatif desulfurisasi dan penggunaan sinar UV. Akan tetapi, proses – proses desulfurisasi ini masih beberapa kelemahan yang diuraikan sebagai berikut dan dirangkum pada Tabel 1.1.

Hidrodessulfurisasi (HDS) secara konvensional telah digunakan dalam meningkatkan kualitas fraksi minyak bumi di industri petrokimia. Selama proses ini, senyawa sulfur dari hidrokarbon (HCs) dihilangkan dengan adanya sejumlah katalis tertentu. Huang dkk. melakukan desulfurisasi *thiophene* dengan menggunakan katalis bifungsional $Ni_2P/SAPO-11$. Hasil penelitiannya menunjukkan konversi *thiophene* 100% dengan selektivitasnya 74% yang dicapai pada suhu $320^\circ C$ dan 1,5 MPa pada kondisi *steady state* selama 2 jam reaksi.

Xing dkk. melakukan desulfurisasi oksidatif dengan katalis $CNT@C_4VW_{12}$ dan oksidan sebagai sumber oksigen adalah hidrogen peroksida. Proses reaksi

dilakukan pada suhu 60°C selama 30 menit. Konversi desulfurisasi yang dihasilkan mencapai 100% dengan tingkat penghilangan 97,4%. Katalis yang digunakan tersebut dapat didaur ulang sebanyak 5 kali. Secara keseluruhan, katalis yang stabil dan terdispersi secara molekuler dibangun oleh efek kerja sama dari π - π *stacking*, ikatan hidrogen, dan interaksi gaya elektrostatik di antara CNT, [C₄mim]⁺ dan [VW₁₂O₄₀]⁴⁻ (Xing dkk., 2025).

Khalse dan De melakukan desulfurisasi adsorptif dengan larutan sulfur 300 ppm. Adsorpsi dilakukan selama 1 jam pada suhu 70°C disertai pengadukan konstan 300 rpm. Adsorben yang digunakan adalah *graphene* yang dimodifikasi dengan nitrogen. Hasil adsorpsi memberikan hasil pengurangan sulfur sebesar 70,1% untuk tiofena, 65,4% untuk benzotiofena, dan 61,2% untuk dibenzotiofena. Modifikasi nitrogen meningkatkan pemisahan lapisan *graphene*, menghasilkan peningkatan luas permukaan dan volume pori. Dengan peningkatan kandungan nitrogen, kedua sifat tersebut semakin ditingkatkan. Setelah dimodifikasi tingkat desulfurisasi meningkat 97,3% untuk tiofena, 92,8% untuk benzotiofena dan 88,4% untuk dibenzotiofena (Khalse dan De, 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).

He dkk. melakukan ekstraktif desulfurisasi berbasis cairan ionik berbasis boron nitrida mikropori sebagai m-BN-PIL sebagai ekstrak. 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).

Chang dkk. melakukan 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 PbMoO_4 berada di 250 nm sedangkan fotokatalis komposit AgCl/PbMoO_4 berada di 380 nm. Hasil desulfurisasi menunjukkan pada katalis komposit dengan jumlah katalis 1,5 g/L mendapatkan hasil mencapai 97%. Lampu merkuri dipilih dibanding xenon karena tingkat penyerapan PbMoO_4 yang kuat pada panjang gelombang 200-400 nm dengan tingkat penyisihan 94% (Chang dkk., 2020).

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 H_2 . Penelitian ini menggunakan sinar UV dengan panjang gelombang 254 nm pada lampu 8 W pada suhu 25°C selama 24 jam. 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).

Proses desulfurisasi pada larutan diesel dengan laser ArF dengan bantuan oksigen dilakukan oleh Gondal dkk. Laser ArF menggunakan sinar *ultraviolet* pada panjang gelombang 193 nm yang digunakan untuk eksitasi oksigen pada DMBT. Energi laser yang digunakan dari 50 – 200 mJ/cm^2 . Penelitiannya menunjukkan minyak model diesel dari larutan DMBT yang mengandung 200 ppm dapat diturunkan hingga 95% dalam waktu 5 menit penyinaran laser (Gondal dkk., 2013).

Proses – proses ini memiliki beberapa kelemahan seperti masih tingginya kondisi operasi yang digunakan, penggunaan katalis serta bahan aditif seperti oksidan dan proses yang lama. Penggunaan sinar dengan menggunakan lampu UV sudah pernah digunakan, akan tetapi memiliki tingkat bahaya bagi kesehatan manusia sehingga akan sulit diimplementasikan ke industri. Kelemahan – kelemahan tersebut menjadi permasalahan yang akan dicoba untuk dikembangkan dalam penelitian ini. Permasalahan yang akan diuraikan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Proses desulfurisasi konvensional menggunakan kondisi tekanan dan suhu tinggi diatas kondisi *ambient*.
- 2) Proses desulfurisasi masih menggunakan banyak bahan dan perlu preprasi bahan seperti penggunaan katalis dan bahan oksidan
- 3) Proses desulfurisasi sebagian besar masih terbatas pada minyak model larutan sulfur

Tabel 1. 1. Permasalahan Penelitian yang Ada

Ref	Tahun	Metode	Kondisi Eksperimental	Review
(Xing dkk., 2025)	2025	Desulfurisasi Oksidatif	Bahan bakar adalah BT, DBT, DMBT yang dilarutkan dalam n-oktan; Katalis CNT@C ₄ VW ₁₂ ; Oksidan H ₂ O ₂ ; Suhu reaksi 60°C, Waktu reaksi 30 menit	Konversi desulfurisasi yang dihasilkan mencapai 100% dengan tingkat penghilangan 97,4%. Katalis yang digunakan tersebut dapat didaur ulang sebanyak 5 kali.
(Hasanbeik dkk., 2022)	2022	Biodesulfurisasi	Media sulfur adalah <i>Basal Salt Medium</i> (BSM) dicampurkan dengan DBT; Mikroorganisme <i>Rhodococcus</i> sp. Strain IGST8;	Peningkatan efisiensi biodesulfurisasi sebesar 52%. Waktu reaksi yang lama hingga 10 hari lebih dan dibutuhkan

Ref	Tahun	Metode	Kondisi Eksperimental	Review
			Waktu perlakuan 248 jam	penjagaan proses yang teratur
(Khalse dan De, 2024)	2024	Desulfurisasi Adsorptif	Bahan bakar yang digunakan adalah larutan sulfur dengan kandungan 300 ppm; Adsorben <i>graphene</i> dimodifikasi dengan nitrogen; Waktu perlakuan 1 jam, Suhu 70°C; Pengadukan konstan 300 rpm	Modifikasi dengan nitrogen menunjukkan peningkatan luas permukaan dan volume pori adsorben sehingga memberikan hasil desulfurisasi meningkat 97,3% untuk tiofena, 92,8% untuk benzotiofena dan 88,4% untuk dibenzotiofena
(Huang dkk., 2025)	2025	Hidrodessulfurisasi	Bahan bakar model yakni tiofena dilarutkan dalam 1-heksena; Katalis Ni ₂ P/SAPO-11;	Konversi <i>thiophene</i> 100% dengan selektivitasnya 74% yang dicapai pada suhu 320°C dan

Ref	Tahun	Metode	Kondisi Eksperimental	Review
			Suhu 550°C; Tekanan 1 MPa; Waktu reaksi 2 jam	1,5 MPa pada kondisi <i>steady state</i> selama 2 jam reaksi
(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%. Kekurangan : Tingginya biaya pelarut karena penggunaan <i>double</i> pelarut serta dapat menimbulkan polutan dari pelarut tersebut
(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 ;	Hasilnya menunjukkan bahwa pembebanan AgCl menyebabkan pergeseran

Ref	Tahun	Metode	Kondisi Eksperimental	Review
			Percobaan dengan radiasi Cu K α	merah pada tepi serapan PbMoO ₄ , yang meningkatkan aktivitas fotokatalitik material. Pada saat loading AgCl 25,0%, jumlah katalis 1,5 g/L, dan waktu penyinaran <i>visible light</i> 2,0 jam, laju desulfurisasi DBT tertinggi mencapai 97,0%.
(Shinozaki dkk., 2022)	2022	Desulfurisasi dengan UV	Bahan bakar model menggunakan senyawa sulfur yang dilarutkan dalam sikloheksana; Sumber sinar lampu UV	BT dan DBT terurai sempurna masing-masing dalam waktu sekitar 8 jam dan 16 jam. Hasil endapan menggunakan analisa XRF

Ref	Tahun	Metode	Kondisi Eksperimental	Review
			panjang gelombang 254 nm; Daya 8 W; Suhu 25°C	menunjukkan BT dan DBT menghasilkan endapan sulfur dalam bentuk alotrop (Sn) sebanyak 88% dengan berat 46 µg. 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

Sinar tampak atau *visible light* menarik perhatian karena energinya yang bersih, mudah penangannya serta rendah biaya. *Visible light* sendiri sudah banyak diaplikasikan pada berbagai reaksi kimia. 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.

Reaksi karboiodinasi yang dikatalisis oleh Pd(0) yang diinduksi oleh sinar biru dibentuk oleh gugus Lautens (Marchese dkk., 2022). Katalis yang digunakan adalah [Pd(allyl)Cl]₂, hasil penelitian berhasil menyiapkan serangkaian hetero- dan karbosiklus teriodinasi, termasuk *oksindol*, *dihidrobenzofuran*, *indolin*, *kroma*, dan *tetrahidronaftalena*. Sistem reaksi menunjukkan toleransi gugus fungsi yang luas, memungkinkan penggabungan fenol, asam karboksilat bebas, anilin, dan piridin, antara lain, ke dalam produk terkait dengan hasil hingga 94%.

Penggunaan sinar tampak, khususnya sinar merah, sebagai sumber energi untuk reaksi organik menarik perhatian para ahli kimia organik karena profil keamanannya. Ogura dkk. melakukan penelitian tentang reaksi Barton-McCombie yang dimediasi oleh lampu merah (Ogura dkk., 2020). Temuan tersebut menunjukkan bahwa dalam konteks klorofil a yang bertindak sebagai katalis dan tris (trimetilsilil) silan atau ester Hantzsch yang berfungsi sebagai sumber hidrogen, penyinaran dengan lampu merah menghasilkan penghilangan gugus metil xantin. Mekanisme reaksi yang diusulkan melibatkan pembentukan kompleks antara substrat dan fotokatalis, diikuti dengan transfer muatan (Seal dkk., 2019). Selain itu, kondisi operasi yang digunakan dianggap lebih aman dan lebih efisien daripada yang biasanya digunakan dalam proses konvensional.

Red light pada fotokatalis mampu mencegah terjadinya produk samping yang tidak diinginkan. Selain itu, *red light* memiliki energi foton yang lebih kecil dibanding foton biru atau UV. Misalnya, foton biru dengan gelombang 410 nm membawa energi 3,0 eV sedangkan foton merah dengan gelombang 620 nm mempunyai energi 2,0 eV (Glaser dan Wenger, 2022).

Red light menarik untuk digunakan pada proses desulfurisasi pengganti proses dengan katalis dan media penyerap karena keefektifannya pada berbagai reaksi kimia serta dapat beroperasi pada kondisi *ambient* dan mudah penanganannya. Selain penggunaan sinar, *metal* akan digunakan penelitian untuk melihat pengaruhnya terhadap sinar karena adanya efek fotolistrik yang dapat

mengontrol energi foton dan panjang gelombang pada sinar (Qian, 2023). Oleh karena itu, dari penjabaran tersebut maka tujuan penelitian ini dapat diuraikan menjadi sebagai berikut:

- 1) Meninjau proses desulfurisasi dengan sinar merah pada kondisi ambient
- 2) Mengkaji proses *batch* proses desulfurisasi pada minyak diesel terhadap penurunan sulfur
- 3) Mengevaluasi pengaruh penggunaan *metal* yang dilewati oleh sinar merah

1.4. Keterbaruan

- 1). Penelitian ini mengembang proses desulfurisasi minyak diesel tanpa penggunaan katalis, absorben, adsorben, ekstraktan dan bahan aditif lainnya sehingga mengurangi biaya produksi proses.
- 2). Penggunaan metal untuk memperkuat sinar tampak merah belum pernah diteliti dan dipublikasikan
- 3). Sinar tampak merah belum pernah digunakan sebagai media utama dalam proses reaksi kimia dan belum pernah digunakan dalam proses reaksi desulfurisasi minyak diesel

1.5. Ruang Lingkup

- 1). Bahan yang digunakan diambil langsung dari kilang PT Pertamina Kilang International, RU III Plaju, Indonesia
- 2). Katalis metal Sn, PbO, Cu dan Fe dibeli di toko kimia Palembang
- 3). Lampu sinar tampak merah dibeli langsung dari PT Donggua Houke Electronic Co., Ltd.
- 4). Variabel tetap yakni volume reaktor
- 5). Variabel bebas yakni daya sinar, waktu iradiasi dan jenis katalis
- 6). Variabel terikat yakni konversi desulfurisasi minyak diesel dan gugus fungsi karakteriasi minyak diesel

DAFTAR PUSTAKA

- Abdi, G., Ashokkumar, M., dan Alizadeh, A. 2017. Ultrasound-assisted oxidative-adsorptive desulfurization using highly acidic graphene oxide as a catalyst-adsorbent. *Fuel*. 210:NA: 639–645.
- Abdullah, G.H., dan Xing, Y. 2018. Oxidation of Dibenzothiophene in Diesel with In Situ Produced Hydrogen Peroxide. *Energy & Fuels*. 32:8: 8254–8258.
- Abro, R., Kiran, N., Ahmed, S., Muhammad, A., Jatoi, A.S., Mazari, S.A., Salma, U., dan Plechkova, N. V. 2022. Extractive desulfurization of fuel oils using deep eutectic solvents – A comprehensive review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 10:3: 107369.
- Agarwal, P., dan Sharma, D.K. 2010. Comparative Studies on the Bio-desulfurization of Crude Oil with Other Desulfurization Techniques and Deep Desulfurization through Integrated Processes. *Energy & Fuels*. 24:1: 518–524.
- Ahmed, I., dan Jung, 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, R., Fallah, S., dan Mohamadi, Z. 2014. Anatase titania-vanadium polyphosphomolybdate as an efficient and reusable nano catalyst for desulphurization of gas oil. *Journal of the Serbian Chemical Society*. 79:9: 1099–1110.
- Almashjary, K.H., Khalid, M., Dharaskar, S., Jagadish, P., Walvekar, R., dan Gupta, T.C.S.M. 2018. Optimisation of extractive desulfurization using Choline Chloride-based deep eutectic solvents. *Fuel*. 234:NA: 1388–1400.
- Alvarado-Perea, L., Colín-Luna, J.A., López-Gaona, A., Wolff, T., Pacheco-Sosa, J.G., dan García-Martínez, J.C. 2020. Simultaneous adsorption of quinoline and dibenzothiophene over Ni-based mesoporous materials at different Si/Al ratio. *Catalysis Today*. 353: 26–38.

- Arbab, A.I. 2016. Propagation of photons in a medium and refractive index. *Optik*. 127:22: 10758–10765.
- Asimov, A. 1964. *Asimov's Biographical Encyclopedia of Science and Technology*. Doubleday: New York.
- Bagheri, M., Masoomi, M.Y., dan Morsali, A. 2017. High organic sulfur removal performance of a cobalt based metal-organic framework. *Journal of Hazardous Materials*. 331: 142–149.
- Banisharif, F., Dehghani, M.R., Capel-Sanchez, M.C., dan Campos-Martin, J.M. 2019. Highly catalytic oxidative desulfurization and denitrogenation of diesel using anchored-silica-gel vanadium-substituted Dawson-type polyoxometalate. *Catalysis Today*. 333:NA: 219–225.
- 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.
- Blumberg, K., Walsh, M., dan Pera, C. 2003. *Low-Sulfur Gasoline and Diesel: The Key to Lower Vehicle Emissions*. The International Council on Clean Transportation.
- Boniek, D., Figueiredo, D., dos Santos, A.F.B., dan de Resende Stoianoff, M.A. 2015. Biodesulfurization: a mini review about the immediate search for the future technology. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 17:1: 29–37.
- Born, M., dan Jordan, P. 1925. Zur Quantenmechanik. *Zeitschrift für Physik*. 34:1: 858–888.
- BPPT. 2021. *Outlook Energi Indonesia 2021*. Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi (PPIPE) Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT).
- 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.
- Butto, N. 2021. The Origin and Nature of the Planck Constant. *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*. 07:01: 324–332.
- Chang, H., Yi, H., Ke, Q., dan Zhang, J. 2020. Preparation of a AgCl/PbMoO 4

- Composite and Investigation of Its Photocatalytic Oxidative Desulfurization Performance. *ACS Omega*. 5:19: 10927–10938.
- Chen, K., Zhang, X.-M., Yang, X.-F., Jiao, M.-G., Zhou, Z., Zhang, M.-H., Wang, D.-H., dan Bu, X.-H. 2018. Electronic structure of heterojunction MoO₂/g-C₃N₄ catalyst for oxidative desulfurization. *Applied Catalysis B: Environmental*. 238:NA: 263–273.
- Chen, M., Liu, J., Liu, Y., Ding, Y., Chen, J., Yang, B., Ma, L., dan Li, L. 2019. Magnetic hybridized Fe₃O₄/HKUST-1 composite modified with graphite oxide to remove thiophene from model fuels. *Petroleum Science and Technology*. 37:22: 2260–2268.
- Chen, S., Zhao, C., Liu, Q., Zang, M., Liu, C., dan Zhang, Y. 2018. Thermophilic biodesulfurization and its application in oil desulfurization. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 102:21: 9089–9103.
- Cheraghali, R., Tavakoli, H., dan Sepehrian, H. 2013. Preparation, characterization and lead sorption performance of alginate-SBA-15 composite as a novel adsorbent. *Scientia Iranica*. 20:3: 1028–1034.
- 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.
- Crowley, T.J. 2000. Causes of Climate Change Over the Past 1000 Years. *Science*. 289:5477: 270–277.
- Cullinane, K., dan Cullinane, S. 2013. Atmospheric Emissions from Shipping: The Need for Regulation and Approaches to Compliance. *Transport Reviews*. 33:4: 377–401.
- 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, F., Zhuang, Q., Huang, G., Deng, H., dan Zhang, X. 2023. Infrared Spectrum Characteristics and Quantification of OH Groups in Coal. *ACS Omega*. 8:19: 17064–17076.
- 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.
- Danmaliki, G.I., Saleh, T.A., dan Shamsuddeen, A.A. 2017. Response surface methodology optimization of adsorptive desulfurization on nickel/activated carbon. *Chemical Engineering Journal*. 313: 993–1003.
- de Araújo, H.C., de Freitas Siva, M.C., Lins, C.M., do Nascimento, A.E., da Silva, C.A., dan Campos-Takaki, G.M. 2012. Oxidation of dibenzothiophene (DBT) by *Serratia marcescens* UCP 1549 formed biphenyl as final product. *Biotechnology for Biofuels*. 5:1: 33.
- de Luna, M.D.G., Samaniego, M.L., Ong, D.C., Wan, M.-W., dan Lu, M.-C. 2018. Kinetics of sulfur removal in high shear mixing-assisted oxidative-adsorptive desulfurization of diesel. *Journal of Cleaner Production*. 178:NA: 468–475.
- de Vries, W., Dobbertin, M.H., Solberg, S., van Dobben, H.F., dan Schaub, M. 2014. Impacts of acid deposition, ozone exposure and weather conditions on forest ecosystems in Europe: an overview. *Plant and Soil*. 380:1–2: 1–45.
- Dehghan, R., dan Anbia, M. 2017. Zeolites for adsorptive desulfurization from fuels: A review. *Fuel Processing Technology*. 167: 99–116.
- Dharaskar, S., Sillanpaa, M., dan Tadi, K.K. 2018. Sulfur extraction from liquid fuels using trihexyl(tetradecyl)phosphonium tetrafluoroborate: as promising solvent. *Environmental Science and Pollution Research*. 25:17: 17156–17167.
- 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.
- Ding, R., ZU, Y., ZHOU, C., WANG, H., MO, Z., QIN, Y., SUN, Z., dan SONG, L. 2018. Insight into the correlation between the effective adsorption sites and

- adsorption desulfurization performance of CuNaY zeolite. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*. 46:4: 451–458.
- 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.
- Dirjen Migas. 2023. *Surat Keputusan Dirjen Migas No. 447.K/MG.06/DJM/2023 tanggal 27 Desember 2023*. Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi (Dirjen Migas) Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral.
- Dmuchowski, W., Gozdowski, D., Baczewska-Dąbrowska, A.H., Dąbrowski, P., Gworek, B., dan Suwara, I. 2018. Evaluation of the impact of reducing national emissions of SO₂ and metals in Poland on background pollution using a bioindication method. *PLOS ONE*. 13:2: e0192711.
- Du, X., Liu, J., Chen, H., dan Zhang, Z. 2018. Study on the Electrochemical Oxidation Desulfurization Behavior of Model Diesel on Anodic Alumina Oxide and Ceria Nanotubes. *Energy & Fuels*. 32:2: 2612–2621.
- Duan, J., Pan, Y., Liu, G., dan Jin, W. 2018. Metal-organic framework adsorbents and membranes for separation applications. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 20: 122–131.
- Dutta, B.K. 2007. *Principles of Mass Transfer and Separation Processes*. PHI Learning Pvt. Ltd: New Delhi.
- EEA. 2017. *Air quality in Europe 2017*. EEA.
- Elias, T., Kern, C., Horton, K.A., Sutton, A.J., dan Garbeil, H. 2018. Measuring SO₂ Emission Rates at Kīlauea Volcano, Hawaii, Using an Array of Upward-Looking UV Spectrometers, 2014–2017. *Frontiers in Earth Science*. 6:NA: 214-NA.
- 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.

- Farzin Nejad, N., Shams, E., Amini, M.K., dan Bennett, J.C. 2013. Synthesis of magnetic mesoporous carbon and its application for adsorption of dibenzothiophene. *Fuel Processing Technology*. 106:NA: 376–384.
- Fei, L., Rui, J., Wang, R., Lu, Y., dan Yang, X. 2017. Equilibrium and kinetic studies on the adsorption of thiophene and benzothiophene onto NiCeY zeolites. *RSC Advances*. 7:37: 23011–23020.
- Fihri, A., Mahfouz, R., Shahrani, A., Taie, I., dan Alabedi, G. 2016. Pervaporative desulfurization of gasoline: A review. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 107: 94–105.
- G, E.-G., James, S., dan Nour, S. 2015. *Handbook of Refinery Desulfurization*, NA.
- Gao, J., Zhu, S., Dai, Y., Xiong, C., Li, C., Yang, W., dan Jiang, X. 2018. Performance and mechanism for extractive desulfurization of fuel oil using modified polyethylene glycol. *Fuel*. 233: 704–713.
- Gao, Meng, H., Lu, Y., Zhang, H., dan Li, C. 2013. 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.
- 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.
- González-García, O., dan Cedeño-Caero, L. 2009. V-Mo based catalysts for oxidative desulfurization of diesel fuel. *Catalysis Today*. 148:1–2: 42–48.
- Grande, J.A., de la Torre, M.L., Cerón, J.C., Beltrán, R., dan Gómez, T. 2010. Overall hydrochemical characterization of the Iberian Pyrite Belt. Main acid mine drainage-generating sources (Huelva, SW Spain). *Journal of Hydrology*.

390:3–4: 123–130.

- Guan, X., Wang, Y., dan Cai, W. 2019. A composite metal-organic framework material with high selective adsorption for dibenzothiophene. *Chinese Chemical Letters*. 30:6: 1310–1314.
- Habimana, F., Huo, Y., Jiang, S., dan Ji, S. 2016. Synthesis of europium metal-organic framework (Eu-MOF) and its performance in adsorptive desulfurization. *Adsorption*. 22:8: 1147–1155.
- Habimana, F., Shi, D., dan Ji, S. 2018. Synthesis of Cu-BTC/Mt composites porous materials and their performance in adsorptive desulfurization process. *Applied Clay Science*. 152: 303–310.
- Haghighat Mamaghani, A., Fatemi, S., dan Asgari, M. 2013. Investigation of Influential Parameters in Deep Oxidative Desulfurization of Dibenzothiophene with Hydrogen Peroxide and Formic Acid. *International Journal of Chemical Engineering*. 2013:2013: 1–10.
- Han, L., Zhang, J., Mao, Y., Zhou, W., Xu, W., dan Sun, Y. 2019. Facile and Green Synthesis of MIL-53(Cr) and Its Excellent Adsorptive Desulfurization Performance. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 58:34: 15489–15496.
- Han, X., Li, H., Huang, H., Zhao, L., Cao, L., Wang, Y., Gao, J., dan Xu, C. 2016. Effect of olefin and aromatics on thiophene adsorption desulfurization over modified NiY zeolites by metal Pd. *RSC Advances*. 6:78: 75006–75013.
- 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.
- 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.

- 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.
- Henker, M., Wendlandt, K.-P., Shpiro, E.S., dan Tkachenko, O.P. 1990. Phase and surface composition and dispersion of MoO₃ in MoO₃/Al₂O₃—SiO₂ catalysts. *Applied Catalysis*. 61:1: 253–263.
- Hertz, H. 1887A. Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die electrische Entladung. *Annalen der Physik*. 267:8: 983–1000.
- Hertz, H. 1887B. Ueber sehr schnelle electrische Schwingungen. *Annalen der Physik*. 267:7: 421–448.
- Hossain, M., Park, H., dan Choi, H. 2019. A Comprehensive Review on Catalytic Oxidative Desulfurization of Liquid Fuel Oil. *Catalysts*. 9:3: 229.
- 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.
- Hu, B., Li, Z., dan Zhang, L. 2019. Long-run dynamics of sulphur dioxide emissions, economic growth, and energy efficiency in China. *Journal of Cleaner Production*. 227:NA: 942–949.
- Huang, G., Sun, Z., Liu, Y.-Y., Yu, Z., Wang, Y., Liu, J., Wang, A., dan Hu, Y. 2025. Bifunctional Ni₂P/SAPO-11 catalyst for simultaneous hydroisomerization of 1-hexene and hydrodesulfurization of thiophene. *Chemical Engineering Science*. 301: 120714.
- Huang, L., Wang, G., Qin, Z., Dong, M., Du, M., Ge, H., Li, X., Zhao, Y., Zhang, J., Hu, T., dan Wang, J. 2011. In situ XAS study on the mechanism of reactive adsorption desulfurization of oil product over Ni/ZnO. *Applied Catalysis B: Environmental*. 106:1: 26–38.
- Hund, F. 1927. Zur Deutung der Molekelspektren. I. *Zeitschrift für Physik*. 40:10: 742–764.
- Ibrahim, J.J., Gao, S., Abdeltawab, A.A., Al-Deyab, S.S., Yu, L., Yu, G., Chen, X., dan Yong, X. 2015. Extractive Desulfurization of Fuel Oils with

- Dicyano(nitroso)methanide-based Ionic Liquids. *Separation Science and Technology*. 50:8: 1166–1174.
- 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.
- Ja'fari, M., Ebrahimi, S.L., dan Khosravi-Nikou, M.R. 2018. Ultrasound-assisted oxidative desulfurization and denitrogenation of liquid hydrocarbon fuels: A critical review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 40:Pt A: 955–968.
- Jatoi, A.S., Hashmi, Z., Anjum, A., Bhatti, Z.A., Siyal, S.H., Mazari, S., Akhter, F., Mubarak, N.M., dan Iqbal, A. 2023. Overview of bioelectrochemical approaches for sulfur reduction: current and future perspectives. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 13:14: 12333–12348.
- Jha, D., Haider, M.B., Kumar, R., Byamba-Ochir, N., Shim, W.G., Marriyappan Sivagnanam, B., dan Moon, H. 2019. Enhanced Adsorptive Desulfurization Using Mongolian Anthracite-Based Activated Carbon. *ACS Omega*. 4:24: 20844–20853.
- Jha, D., Haider, M.B., Kumar, R., Shim, W.G., dan Marriyappan Sivagnanam, B. 2020. Batch and Continuous Adsorptive Desulfurization of Model Diesel Fuels Using Graphene Nanoplatelets. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 65:4: 2120–2132.
- Jin, Y., Wu, J., Wang, J., Fan, Y., Zhang, S., Ma, N., dan Dai, W. 2020. Highly efficient capture of benzothiophene with a novel water-resistant-bimetallic Cu-ZIF-8 material. *Inorganica Chimica Acta*. 503: 119412.
- Kampouraki, Z.-C., Giannakoudakis, D.A., Nair, V., Hosseini-Bandegharai, A., Colmenares, J.C., dan Deliyanni, E.A. 2019. Metal Organic Frameworks as Desulfurization Adsorbents of DBT and 4,6-DMDBT from Fuels. *Molecules*. 24:24: 4525.
- Khalse, N.M., dan De, M. 2024. Adsorptive desulfurization of thiophenic sulfur compounds using nitrogen modified graphene. *Separation and Purification Technology*. 331: 125693.
- Khan, N.A., Hasan, Z., dan Jung, S.H. 2014. Ionic Liquids Supported on Metal-

- Organic Frameworks: Remarkable Adsorbents for Adsorptive Desulfurization. *Chemistry – A European Journal*. 20:2: 376–380.
- Khan, N.A., dan Jhung, S.H. 2015. Scandium-Triflate/Metal–Organic Frameworks: Remarkable Adsorbents for Desulfurization and Denitrogenation. *Inorganic Chemistry*. 54:23: 11498–11504.
- Khan, N.A., Kim, C.M., dan Jhung, S.H. 2017. Adsorptive desulfurization using Cu–Ce/metal–organic framework: Improved performance based on synergy between Cu and Ce. *Chemical Engineering Journal*. 311: 20–27.
- Kianpour, E., dan Azizian, S. 2014. Polyethylene glycol as a green solvent for effective extractive desulfurization of liquid fuel at ambient conditions. *Fuel*. 137: 36–40.
- 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.
- 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.
- Li, H., Dong, L., Zhao, L., Cao, L., Gao, J., dan Xu, C. 2017. Enhanced Adsorption Desulfurization Performance over Mesoporous ZSM-5 by Alkali Treatment. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 56:14: 3813–3821.
- Li, J., Yang, Z., Li, S., Jin, Q., dan Zhao, J. 2020. Review on oxidative desulfurization of fuel by supported heteropolyacid catalysts. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 82:NA: 1–16.
- 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, 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.
- Liao, J., Wang, Y., Chang, L., dan Bao, W. 2015. Preparation of M/ γ -Al₂O₃ sorbents and their desulfurization performance in hydrocarbons. *RSC Advances*. 5:77: 62763–62771.
- Lichtblau, J. 2017. *World Oil Outlook 2040*. Organization of the Petroleum Exporting Countries.
- Lide, D.R. 2010. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Taylor and Francis Group: Boca Raton.
- Liew, R.K., Chai, C., Yek, P.N.Y., Phang, X.Y., Chong, M.Y., Nam, W.L., Su, M.H., Lam, W.H., Ma, N.L., dan Lam, S.S. 2019. Innovative production of highly porous carbon for industrial effluent remediation via microwave vacuum pyrolysis plus sodium-potassium hydroxide mixture activation. *Journal of Cleaner Production*. 208:NA: 1436–1445.
- Likus-Cieřlik, J., dan Pietrzykowski, M. 2019. HIGH SULFUR CONTAMINATION EFFECT ON THE ENVIRONMENT AT THE AFFORESTED FORMER JEZIÓRKO SULFUR MINE. *Journal American Society of Mining and Reclamation*. 2019:3: 66–90.
- Likus-Cieřlik, J., Pietrzykowski, M., Szostak, M., dan Szulczewski, M. 2017. Spatial distribution and concentration of sulfur in relation to vegetation cover and soil properties on a reclaimed sulfur mine site (Southern Poland). *Environmental Monitoring and Assessment*. 189:2: 87.
- 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.
- Liu, C., He, Q., Zhang, Z., Su, Y., Xu, R., dan Hu, B. 2014. Efficient Extractive Desulfurization of Fuel Oils Using N-Pyrrolidone/Alkylphosphate-Based Ionic Liquids. *Chinese Journal of Chemistry*. 32:5: 410–416.
- Liu, F., Yu, J., Qazi, A.B., Zhang, L., dan Liu, X. 2021. Metal-Based Ionic Liquids in Oxidative Desulfurization: A Critical Review. *Environmental Science &*

- Technology*. 55:3: 1419–1435.
- Liu, K.-H., FANG, Y.-T., YU, F.-M., LIU, Q., LI, F.-R., dan PENG, S.-L. 2010. Soil Acidification in Response to Acid Deposition in Three Subtropical Forests of Subtropical China. *Pedosphere*. 20:3: 399–408.
- Liu, X., Li, J., Guo, Y., Wu, J., dan Hu, B. 2022. Oxidative desulfurization of fuel oil catalyzed by a carbon nitride supported phosphotungstic acid based dicationic ionic liquid. *Reaction Chemistry & Engineering*. 7:6: 1380–1390.
- LIU, X., WANG, J., LI, Q., JIANG, S., ZHANG, T., dan JI, S. 2014. Synthesis of rare earth metal-organic frameworks (Ln-MOFs) and their properties of adsorption desulfurization. *Journal of Rare Earths*. 32:2: 189–194.
- Lü, H., Deng, C., Ren, W., dan Yang, X. 2014. Oxidative desulfurization of model diesel using [(C₄H₉)₄N]₆Mo₇O₂₄ as a catalyst in ionic liquids. *Fuel Processing Technology*. 119:NA: 87–91.
- 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.
- Ma, X., Liu, H., Li, W., Peng, S., dan Chen, Y. 2016. Reactive adsorption of low concentration methyl mercaptan on a Cu-based MOF with controllable size and shape. *RSC Advances*. 6:99: 96997–97003.
- Maghsoudi, S., Vossoughi, M., Kheiriloom, A., Tanaka, E., dan Katoh, S. 2001. Biodesulfurization of hydrocarbons and diesel fuels by *Rhodococcus* sp. strain P32C1. *Biochemical Engineering Journal*. 8:2: 151–156.
- Makoś-Chełstowska, P., Kaykhaili, M., Płotka-Wasyłka, J., dan de la Guardia, M. 2022. Magnetic deep eutectic solvents – Fundamentals and applications. *Journal of Molecular Liquids*. 365: 120158.
- Mansouri, A., Khodadadi, A.A., dan Mortazavi, Y. 2014. Ultra-deep adsorptive desulfurization of a model diesel fuel on regenerable Ni–Cu/γ-Al₂O₃ at low temperatures in absence of hydrogen. *Journal of Hazardous Materials*. 271: 120–130.
- 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.
- Margeta, D., Sertić-Bionda, K., dan Foglar, L. 2016. Ultrasound assisted oxidative desulfurization of model diesel fuel. *Applied Acoustics*. 103:NA: 202–206.
- Martin, A.B., Alcon, A., Santos, V.E., dan Garcia-Ochoa, F. 2004. Production of a Biocatalyst of *Pseudomonas putida* CECT5279 for Dibenzothiophene (DBT) Biodesulfurization for Different Media Compositions. *Energy & Fuels*. 18:3: 851–857.
- Matloob, A.M., El-Hafiz, D.R.A., Saad, L., Mikhail, S., dan Guirguis, D. 2019. Metal organic framework-graphene nano-composites for high adsorption removal of DBT as hazard material in liquid fuel. *Journal of Hazardous Materials*. 373: 447–458.
- Méndez, F.J., Franco-López, O.E., Bokhimi, X., Solís-Casados, D.A., Escobar-Alarcón, L., dan Klimova, T.E. 2017. Dibenzothiophene hydrodesulfurization with NiMo and CoMo catalysts supported on niobium-modified MCM-41. *Applied Catalysis B: Environmental*. 219: 479–491.
- Mesdour, S., Lekbir, C., Doumandji, L., dan Hamada, B. 2017. Microwave-assisted extractive catalytic-oxidative desulfurization of diesel fuel via a VO(acac)₂/ionic liquid system with H₂O₂ and H₂SO₄ as oxidizing agents. *Journal of Sulfur Chemistry*. 38:4: 421–439.
- Moaseri, E., Shahsavand, A., dan Bazubandi, B. 2014. Microwave-Assisted Oxidative Desulfurization of Sour Natural Gas Condensate via Combination of Sulfuric and Nitric Acids. *Energy & Fuels*. 28:2: 825–831.
- Mohebbi, G., dan Ball, A.S. 2016. Biodesulfurization of diesel fuels – Past, present and future perspectives. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 110: 163–180.
- Narayanam, 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.
- Neubauer, R., Husmann, M., Weinlaender, C., Kienzl, N., Leitner, E., dan

- Hochenauer, C. 2017. Acid base interaction and its influence on the adsorption kinetics and selectivity order of aromatic sulfur heterocycles adsorbing on Ag-Al₂O₃. *Chemical Engineering Journal*. 309: 840–849.
- Ni, J., dan Yang, L. 2023. Photoelectric properties and magnetic changes of defective tantalum disulfide adsorbed (non -) metal atoms. *Materials Today Communications*. 37: 107033.
- 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.
- Niti Aayog India. 2018. *A report on energy efficiency and energy mix in the Indian Energy System 2030 using India energy security scenarios 2047*. MOSPI.
- 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.
- Oldfield, C., Wood, N.T., Gilbert, S.C., Murray, F.D., dan Faure, F.R. 1998. Desulphurisation of benzothiophene and dibenzothiophene by actinomycete organisms belonging to the genus *Rhodococcus*, and related taxa. *Antonie Van Leeuwenhoe*. 74: 119–132.
- Otsuki, S., Nonaka, T., Takashima, N., Qian, W., Ishihara, A., Imai, T., dan Kabe, T. 2000. Oxidative Desulfurization of Light Gas Oil and Vacuum Gas Oil by Oxidation and Solvent Extraction. *Energy & Fuels*. 14:6: 1232–1239.
- Palomino, J.M., Tran, D.T., Hauser, J.L., Dong, H., dan Oliver, S.R.J. 2014. Mesoporous silica nanoparticles for high capacity adsorptive desulfurization. *J. Mater. Chem. A*. 2:36: 14890–14895.
- 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.
- Pietrzykowski, M., dan Likus-Cieślik, J. 2018. Comprehensive Study of Reclaimed Soil, Plant, and Water Chemistry Relationships in Highly S-Contaminated Post Sulfur Mine Site Jeziórko (Southern Poland). *Sustainability*. 10:7: 2442.

- Piscopo, C.G., Granadeiro, C.M., Balula, S.S., dan Bošković, D. 2020. Metal-Organic Framework-Based Catalysts for Oxidative Desulfurization. *ChemCatChem*. 12:19: 4721–4731.
- Planck, M. 1901. Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum. *Annalen der Physik*. 309:3: 553–563.
- 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.
- Qian, Y., Cao, H., dan Huang, S. 2020. Decoupling and decomposition analysis of industrial sulfur dioxide emissions from the industrial economy in 30 Chinese provinces. *Journal of Environmental Management*. 260:NA: 110142.
- Qin, B., Shen, Y., Xu, B., Zhu, S., Li, P., dan Liu, Y. 2018. Mesoporous TiO₂ – SiO₂ adsorbent for ultra-deep desulfurization of organic-S at room temperature and atmospheric pressure. *RSC Advances*. 8:14: 7579–7587.
- Qin, L., Zhou, Y., Li, D., Zhang, L., Zhao, Z., Zuhra, Z., dan Mu, C. 2016. Highly Dispersed HKUST-1 on Millimeter-Sized Mesoporous γ -Al₂O₃ Beads for Highly Effective Adsorptive Desulfurization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 55:27: 7249–7258.
- Rajagopal, S. 1992. Denitrogenation of piperidine on alumina, silica, and silica-aluminas: The effect of surface acidity. *Journal of Catalysis*. 137:2: 453–461.
- Rajendran, A., Cui, T., Fan, H., Yang, Z., Feng, J., dan Li, W. 2020A. A comprehensive review on oxidative desulfurization catalysts targeting clean energy and environment. *Journal of Materials Chemistry A*. 8:5: 2246–2285.
- Rajendran, A., Fan, H., Feng, J., dan Li, W. 2020B. Desulfurization on Boron Nitride and Boron Nitride-based Materials. *Chemistry – An Asian Journal*. 15:14: 2038–2059.
- Rezvani, M.A., Asli, M.A., Khandan, S., Mousavi, H., dan Aghbolagh, Z.S. 2017. Synthesis and characterization of new nanocomposite CTAB-PTA@CS as an

- efficient heterogeneous catalyst for oxidative desulphurization of gasoline. *Chemical Engineering Journal*. 312:NA: 243–251.
- Rezvani, M.A., Nia Asli, M.A., Oveisi, M., Babaei, R., Qasemi, K., dan Khandan, S. 2016. An organic–inorganic hybrid based on an Anderson-type polyoxometalate immobilized on PVA as a reusable and efficient nanocatalyst for oxidative desulphurization of gasoline. *RSC Advances*. 6:58: 53069–53079.
- Rezvani, M.A., Shaterian, M., Akbarzadeh, F., dan Khandan, S. 2018. Deep oxidative desulfurization of gasoline induced by PMoCu@MgCu₂O₄-PVA composite as a high-performance heterogeneous nanocatalyst. *Chemical Engineering Journal*. 333:NA: 537–544.
- Robert, B., dan Deborah, J.. 1998. *Instruments of Science: An Historical Encyclopedia*. Routledge: London.
- Rodríguez-Cabo, B., Arce, A., dan Soto, A. 2013. Desulfurization of fuels by liquid–liquid extraction with 1-ethyl-3-methylimidazolium ionic liquids. *Fluid Phase Equilibria*. 356:NA: 126–135.
- 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.
- Saha, B., Bhattacharjee, D., Sandilya, P., dan Sengupta, S. 2019. Cryochemical Approach To Develop Catalysts for Intensification of the Hydrodesulfurization Reaction. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 58:16: 6266–6277.
- Saha, B., Sengupta, S., dan Selvin, R. 2020. Comparative studies of extraction ability of organic solvents to extract thiophene from model fuel. *Separation Science and Technology*. 55:6: 1123–1132.
- Saha, B., Vedachalam, S., dan Dalai, A.K. 2021. Review on recent advances in adsorptive desulfurization. *Fuel Processing Technology*. 214: 106685.
- Saleh, T.A., dan Danmaliki, G.I. 2016. Influence of acidic and basic treatments of activated carbon derived from waste rubber tires on adsorptive desulfurization of thiophenes. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 60: 460–468.

- Schrödinger, E. 1926. Quantisierung als Eigenwertproblem. *Annalen der Physik*. 384:4: 361–376.
- 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.
- 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.
- Shafiq, I., Shafique, S., Akhter, P., Yang, W., dan Hussain, M. 2022. Recent developments in alumina supported hydrodesulfurization catalysts for the production of sulfur-free refinery products: A technical review. *Catalysis Reviews*. 64:1: 1–86.
- Shan, J.-H., Chen, L., Sun, L.-B., dan Liu, X.-Q. 2011. Adsorptive Removal of Thiophene by Cu-Modified Mesoporous Silica MCM-48 Derived from Direct Synthesis. *Energy & Fuels*. 25:7: 3093–3099.
- Shang, H., Zhang, H., Du, W., dan Liu, Z. 2013. Development of microwave assisted oxidative desulfurization of petroleum oils: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 19:5: 1426–1432.
- Sharma, M., Sharma, P., dan Kim, J.N. 2013. Solvent extraction of aromatic components from petroleum derived fuels: a perspective review. *RSC Advances*. 3:26: 10103.
- 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.
- Shojaei, A.F., Rezvani, M.A., dan Loghmani, M.H. 2014. Comparative study on oxidation desulphurization of actual gas oil and model sulfur compounds with hydrogen peroxide promoted by formic acid: Synthesis and characterization of vanadium containing polyoxometalate supported on anatase crushed nanoleaf. *Fuel Processing Technology*. 118:NA: 1–6.
- Sikarwar, P., Kumar, U.K.A., Gosu, V., dan Subbaramaiah, V. 2018. Synergetic

- Effect of Cobalt-Incorporated Acid-Activated GAC for Adsorptive Desulfurization of DBT under Mild Conditions. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 63:8: 2975–2985.
- Sliney, D.H. 2016. What is light? The visible spectrum and beyond. *Eye*. 30:2: 222–229.
- Soleimani, M., Bassi, A., dan Margaritis, A. 2007. Biodesulfurization of refractory organic sulfur compounds in fossil fuels. *Biotechnology Advances*. 25:6: 570–596.
- Song, C., dan Ma, X. 2003. New design approaches to ultra-clean diesel fuels by deep desulfurization and deep dearomatization. *Applied Catalysis B: Environmental*. 41:1–2: 207–238.
- Song, H., Cui, X.-H., Song, H.-L., Gao, H.-J., dan Li, F. 2014. Characteristic and Adsorption Desulfurization Performance of Ag–Ce Bimetal Ion-Exchanged Y Zeolite. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 53:37: 14552–14557.
- Song, H., Li, X., Jiang, B., Gong, M., dan Hao, T. 2019. Preparation of Novel and Highly Stable Py/MOF and Its Adsorptive Desulfurization Performance. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 58:42: 19586–19598.
- Song, H., Wan, X., dan Sun, X. 2013. Preparation of Agy zeolites using microwave irradiation and study on their adsorptive desulphurisation performance. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 91:5: 915–923.
- Song, L., Bu, T., Zhu, L., Zhou, Y., Xiang, Y., dan Xia, D. 2014. Synthesis of Organically–Inorganically Functionalized MCM-41 for Adsorptive Desulfurization of C 4 Hydrocarbons. *The Journal of Physical Chemistry C*. 118:18: 9468–9476.
- Speight, J.G. 2016. *Environmental organic chemistry for engineers*. Butterworth-Heinemann.
- Srivastava, V.C. 2012. An evaluation of desulfurization technologies for sulfur removal from liquid fuels. *RSC Adv*. 2:3: 759–783.
- State, R.N., Volceanov, A., Muley, P., dan Boldor, D. 2019. A review of catalysts used in microwave assisted pyrolysis and gasification. *Bioresource Technology*. 277:NA: 179–194.

- Stylianou, M., Vyrides, I., dan Agapiou, A. 2021. Oil biodesulfurization: A review of applied analytical techniques. *Journal of Chromatography B*. 1171: 122602.
- Subhan, F., Aslam, S., Yan, Z., Ahmad, A., Etim, U.J., Naeem, M., Zhen, L., Ikram, M., dan Yaseen, M. 2020. Highly dispersive lanthanum oxide fabricated in confined space of SBA-15 for adsorptive desulfurization. *Chemical Engineering Journal*. 384: 123271.
- Subhan, F., Aslam, S., Yan, Z., Ikram, M., dan Rehman, S. 2014A. Enhanced desulfurization characteristics of Cu-KIT-6 for thiophene. *Microporous and Mesoporous Materials*. 199: 108–116.
- Subhan, F., Aslam, S., Yan, Z., Naeem, M., Ullah, R., dan Etim, U.J. 2018A. Size regulation and dispersion of ceria using confined spaces for adsorptive desulfurization. *Chemical Engineering Journal*. 348: 319–326.
- Subhan, F., Aslam, S., Yan, Z., Zhen, L., Ikram, M., Ullah, R., Etim, U.J., dan Ahmad, A. 2018B. Ammonia assisted functionalization of cuprous oxide within confined spaces of SBA-15 for adsorptive desulfurization. *Chemical Engineering Journal*. 339: 557–565.
- Subhan, F., Yan, Z., Peng, P., Ikram, M., dan Rehman, S. 2014B. The enhanced adsorption of sulfur compounds onto mesoporous Ni-ALKIT-6 sorbent, equilibrium and kinetic analysis. *Journal of Hazardous Materials*. 270: 82–91.
- Sun, X., Hussain, A.H.M.S., Chi, M., Cheng, X., dan Tatarchuk, B.J. 2017. Persistent adsorptive desulfurization enhancement of TiO₂ after one-time ex-situ UV-treatment. *Fuel*. 193: 95–100.
- Sun, Y., Wang, H., dan Prins, R. 2010. Hydrodesulfurization with classic Co–MoS₂ and Ni–MoS₂/γ-Al₂O₃ and new Pt–Pd on mesoporous zeolite catalysts. *Catalysis Today*. 150:3–4: 213–217.
- Tan, P., Xie, X.-Y., Liu, X.-Q., Pan, T., Gu, C., Chen, P.-F., Zhou, J.-Y., Pan, Y., dan Sun, L.-B. 2017. Fabrication of magnetically responsive HKUST-1/Fe₃O₄ composites by dry gel conversion for deep desulfurization and denitrogenation. *Journal of Hazardous Materials*. 321: 344–352.
- Tang, Q., Lin, S., Cheng, Y., Liu, S.-J., dan Xiong, J.-R. 2013. Enhanced biodesulfurization of bunker oil by ultrasound pre-treatment with native

- microbial seeds. *Biochemical Engineering Journal*. 77: 58–65.
- Tang, X., Hu, T., Li, J., Wang, F., dan Qing, D. 2015. Desulfurization of Kerosene by the Electrochemical Oxidation and Extraction Process. *Energy & Fuels*. 29:4: 2097–2103.
- Tanimu, A., Tanimu, G., Ganiyu, S.A., Gambo, Y., Alasiri, H., dan Alhooshani, K. 2022. Metal-Free Catalytic Oxidative Desulfurization of Fuels—A Review. *Energy & Fuels*. 36:7: 3394–3419.
- 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.
- Tian, F., Fu, Z., Zhang, H., Zhang, J., Chen, Y., dan Jia, C. 2015. Thiophene adsorption onto metal–organic framework HKUST-1 in the presence of toluene and cyclohexene. *Fuel*. 158: 200–206.
- To, J.W.F., He, J., Mei, J., Haghpanah, R., Chen, Z., Kurosawa, T., Chen, S., Bae, W.-G., Pan, L., Tok, J.B.-H., Wilcox, J., dan Bao, Z. 2016. Hierarchical N-Doped Carbon as CO₂ Adsorbent with High CO₂ Selectivity from Rationally Designed Polypyrrole Precursor. *Journal of the American Chemical Society*. 138:3: 1001–1009.
- Tomlinson, G.H. 1983. Air pollutants and forest decline. *Environmental Science & Technology*. 17:6: 246A-256A.
- Tran, D.T., Palomino, J.M., dan Oliver, S.R.J. 2018. Desulfurization of JP-8 jet fuel: challenges and adsorptive materials. *RSC Advances*. 8:13: 7301–7314.
- 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.
- Velu, S., Ma, X., dan Song, C. 2022. ZEOLITE-BASED ADSORBENTS FOR DESULFURIZATION OF JET FUEL BY SELECTIVE ADSORPTION. *Fuel Chemistry Division Preprints*. 47:2: 447.
- Wang, T., Li, X., Dai, W., Fang, Y., dan Huang, H. 2015. Enhanced adsorption of

- dibenzothiophene with zinc/copper-based metal–organic frameworks. *Journal of Materials Chemistry A*. 3:42: 21044–21050.
- Wang, W., Qi, R., Shan, W., Wang, X., Jia, Q., Zhao, J., Zhang, C., dan Ru, H. 2014. Synthesis of KIT-6 type mesoporous silicas with tunable pore sizes, wall thickness and particle sizes via the partitioned cooperative self-assembly process. *Microporous and Mesoporous Materials*. 194: 167–173.
- Watanabe, S., Ma, X., dan Song, C. 2021. Adsorptive desulfurization of jet fuels over TiO₂-CeO₂ mixed oxides: Role of surface Ti and Ce cations. *Catalysis Today*. 371: 265–275.
- Wei, K., Ni, J., Cui, Y., Han, H., Xie, Y., dan Liu, Y. 2019. Desulfurization by liquid phase adsorption: Role of exposed metal sites in metal-organic frameworks. *Journal of Molecular Structure*. 1184: 163–167.
- World Health Organization. 2016. *A Report on ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. WHO.
- Wu, Z., dan Ondruschka, B. 2010. Ultrasound-assisted oxidative desulfurization of liquid fuels and its industrial application. *Ultrasonics Sonochemistry*. 17:6: 1027–1032.
- Xi, Y., Yi, H., dan Lei, A. 2013. Synthetic applications of photoredox catalysis with visible light. *Organic & Biomolecular Chemistry*. 11:15: 2387.
- Xing, X.-X., He, M.-Y., Guo, H.-L., Song, Y.-J., Zhu, W.-S., Pang, J.-Y., Bai, Y., dan Dang, D.-B. 2025. The design of molecularly dispersed tungstovanadate catalyst via ionic liquid linkers for oxidative desulfurization. *Separation and Purification Technology*. 354: 129475.
- Xiong, J., Luo, J., Di, J., Li, X., Chao, Y., Zhang, M., Zhu, W., dan Li, H. 2020. Macroscopic 3D boron nitride monolith for efficient adsorptive desulfurization. *Fuel*. 261: 116448.
- Xu, W., Li, G., Li, W., dan Zhang, H. 2016. Facile room temperature synthesis of metal–organic frameworks from newly synthesized copper/zinc hydroxide and their application in adsorptive desulfurization. *RSC Advances*. 6:44: 37530–37534.
- 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.
- YAN, H., SUN, X., XU, Q., MA, Z., XIAO, C., dan Jun, N. 2008. Effects of nicotinamide and riboflavin on the biodesulfurization activity of dibenzothiophene by *Rhodococcus erythropolis* USTB-03. *Journal of Environmental Sciences*. 20:5: 613–618.
- Ye, F., Miao, G., Wu, L., Wu, Y., Li, Z., Song, C., dan Xiao, J. 2017. [O]-induced reactive adsorptive desulfurization of liquid fuel over Ag X O@SBA-15 under ambient conditions. *Chemical Engineering Science*. 168: 225–234.
- Ye, Zhang, P., Zhang, G., Wang, S., Nabi, M., Zhang, Q., dan Zhang, H. 2018. Biodesulfurization of high sulfur fat coal with indigenous and exotic microorganisms. *Journal of Cleaner Production*. 197: 562–570.
- Yin, Y., Wen, Z.-H., Liu, X.-Q., Yuan, A.-H., dan Shi, L. 2018. Functionalization of SBA-15 with CeO₂ nanoparticles for adsorptive desulfurization: Matters of template P123. *Adsorption Science & Technology*. 36:3–4: 953–966.
- Yoosuk, B., Silajan, A., dan Prasassarakich, P. 2020. Deep adsorptive desulfurization over ion-exchanged zeolites: Individual and simultaneous effect of aromatic and nitrogen compounds. *Journal of Cleaner Production*. 248: 119291.
- 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. 2018. 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, M., Zhang, N., Fan, L., Zhang, C., He, X., Zheng, M., dan Li, Z. 2015. Removal of organic sulfur compounds from diesel by adsorption on carbon materials. *Reviews in Chemical Engineering*. 31:1.
- Yuan, H., Liu, X., Zhang, S., dan Lu, J. 2019. Pervaporative desulfurization of n-heptane/thiophene model gasoline for modified polyether-block-amide (Pebax) membrane. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 144: 107632.

- Zhang, H., Shan, G., Liu, H., dan Xing, J. 2007. PREPARATION OF (Ni/W)- γ -Al₂O₃ MICROSPHERES AND THEIR APPLICATION IN ADSORPTION DESULFURIZATION FOR MODEL GASOLINE. *Chemical Engineering Communications*. 194:7: 938–945.
- Zhang, M., Zhu, W., Xun, S., Li, H., Gu, Q., Zhao, Z., dan Wang, Q. 2013. Deep oxidative desulfurization of dibenzothiophene with POM-based hybrid materials in ionic liquids. *Chemical Engineering Journal*. 220:NA: 328–336.
- Zhang, X.-F., Wang, Z., Feng, Y., Zhong, Y., Liao, J., Wang, Y., dan Yao, J. 2018. Adsorptive desulfurization from the model fuels by functionalized UiO-66(Zr). *Fuel*. 234: 256–262.
- Zhao, H., Baker, G.A., dan Zhang, Q. 2017. Design rules of ionic liquids tasked for highly efficient fuel desulfurization by mild oxidative extraction. *Fuel*. 189:NA: 334–339.
- Zhao, Z., Zuhra, Z., Qin, L., Zhou, Y., Zhang, L., Tang, F., dan Mu, C. 2018. Confinement of microporous MOF-74(Ni) within mesoporous γ -Al₂O₃ beads for excellent ultra-deep and selective adsorptive desulfurization performance. *Fuel Processing Technology*. 176: 276–282.
- Zhu, L., Jia, X., Bian, H., Huo, T., Duan, Z., Xiang, Y., dan Xia, D. 2018. Structure and adsorptive desulfurization performance of the composite material MOF-5@AC. *New Journal of Chemistry*. 42:5: 3840–3850.
- Zis, T.P.V., dan Cullinane, K. 2020. The desulphurisation of shipping: Past, present and the future under a global cap. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 82:NA: 102316.
- Zu, Y., Guo, Z., Zheng, J., Hui, Y., Wang, S., Qin, Y., Zhang, L., Liu, H., Gao, X., dan Song, L. 2020. Investigation of Cu(I)-Y zeolites with different Cu/Al ratios towards the ultra-deep adsorption desulfurization: Discrimination and role of the specific adsorption active sites. *Chemical Engineering Journal*. 380: 122319.