

DISERTASI

**PENINGKATAN KUALITAS *SYNTHETIC GAS* HASIL
GASIFIKASI KATALITIK TANDAN KOSONG
KELAPA SAWIT DAN CANGKANG SAWIT
MENGUNAKAN KATALIS BENTONIT TERPILAR
LOGAM UNTUK *RENEWABLE FUEL GAS***



RIA KOMALA

20013682227010

PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU LINGKUNGAN

PROGRAM PASCASARJANA

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2025

DISERTASI

**PENINGKATAN KUALITAS *SYNTHETIC GAS* HASIL
GASIFIKASI KATALITIK TANDAN KOSONG
KELAPA SAWIT DAN CANGKANG SAWIT
MENGUNAKAN KATALIS BENTONIT TERPILAR
LOGAM UNTUK *RENEWABLE FUEL GAS***



RIA KOMALA

20013682227010

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU LINGKUNGAN
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

2025

HALAMAN PENGESAHAN

**PENINGKATAN KUALITAS *SYNTHETIC GAS* HASIL GASIFIKASI
KATALITIK TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DAN CANGKANG SAWIT
MENGUNAKAN KATALIS BENTONIT TERPILAR LOGAM UNTUK
*RENEWABLE FUEL GAS***

DISERTASI

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Doktor**

Oleh

**RIA KOMALA
20013682227010**

Palembang, 29 Juli 2025

Promotor



**Prof. Dr. Ir. Muhammad Faizal, D.E.A., Dipl.Expert.
NIP. 195805141984031001**

Co-Promotor I



**Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D.
NIP. 196704191993031001**

Co-Promotor II



**Prof. Dr. Fakhili Gulo
NIP. 196412091991021001**

Mengetahui :

**Direktur Program Pascasarjana
Universitas Sriwijaya**



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

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa Disertasi ini dengan judul “Peningkatan Kualitas *Synthetic Gas* Hasil Gasifikasi Katalitik Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Cangkang Sawit menggunakan Katalis Bentonit Terpillar Logam untuk *Renewable Fuel Gas*” telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Program Pascasarjana Universitas Sriwijaya pada Tanggal 29 Juli 2025.

Palembang, 29 Juli 2025

Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Berupa Disertasi

Ketua :

1. Prof. Dr. Ir. Muhammad Faizal, D.E.A., Dipl.Expert.
NIP. 195805141984031001

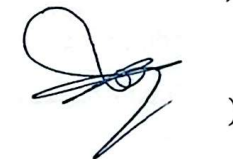
()

Anggota :

2. Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D.
NIP. 196704191993031001

()

3. Prof. Dr. Fakhili Gulo
NIP. 196412091991021001

()

4. Prof. Dr. Ir. Nurhayati, M.Si.
NIP. 196202021991032001

()

5. Prof. Dr. Ir. Irwin Bizzy, M.T.
NIP. 196005281989031002

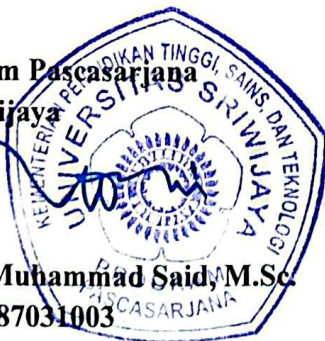
()

6. Prof. Dr. Kgs Ahmad Roni, S.T., M.T., IPM., ASEAN.Eng.
NIDN. 0227077004

()

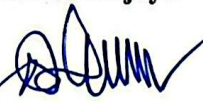
Mengetahui,
Direktur Program Pascasarjana
Universitas Sriwijaya

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



Wakil Direktur Bidang Umum
dan Keuangan Program Pascasarjana
Universitas Sriwijaya

Dr. Mukhtaruddin, S.E., M.Si.
NIP. 196712101994021001

()

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ria Komala
Tempat dan Tanggal Lahir : Palembang, 12 Januari 1983
Program Studi : S3 Ilmu Lingkungan
NIM : 20013682227010
Judul : Peningkatan Kualitas *Synthetic Gas* Hasil Gasifikasi Katalitik Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Cangkang Sawit Menggunakan Katalis Bentonit Terpillar Logam untuk *Renewable Fuel Gas*

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa:

1. Seluruh data, informasi serta pernyataan dalam pembahasan dan kesimpulan yang disajikan dalam karya ilmiah ini, kecuali yang disebutkan sumbernya adalah merupakan hasil pengalaman penelitian, pengelolaan, serta pemikiran saya dengan pengarahan dari pembimbing yang ditetapkan.
2. Karya ilmiah yang saya tulis adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik, baik di Universitas Sriwijaya maupun di perguruan tinggi lainnya.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sebenar-benarnya dan apabila kemudian hari ditemukan bukti ketidakbenaran dalam pernyataan tersebut diatas, maka saya bersedia menerima sanksi akademis berupa pembatalan gelar yang saya peroleh melalui pengajuan karya ilmiah ini.



Palembang, 29 Juli 2025
Yang membuat pernyataan,

Ria Komala
NIM. 20013682227010

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ria Komala

NIM : 20013682227010

Judul Disertasi : Peningkatan Kualitas *Synthetic Gas* Hasil Gasifikasi Katalitik Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Cangkang Sawit Menggunakan Katalis Bentonit Terpillar Logam untuk Renewable Fuel Gas

Memberikan izin kepada Promotor dan Co-Promotor dan Universitas Sriwijaya untuk mempublikasikan hasil penelitian saya untuk kepentingan akademik apabila dalam 1 (satu) tahun tidak mempublikasikan karya penelitian saya. Dalam kasus ini saya setuju untuk menempatkan Promotor dan Co-Promotor sebagai penulis korespondensi (*Corresponding author*).

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

Palembang, 29 Juli 2025
Yang membuat pernyataan,



Ria Komala
NIM. 20013682227010

RIWAYAT HIDUP

Ria Komala, lahir di Palembang pada tanggal 12 Januari 1983, penulis adalah anak kedua dari dua saudara pasangan Alm. Sani Ase dan Nurdiana. Penulis menyelesaikan Pendidikan dasar di SD Negeri 605 Palembang pada tahun 1994, dilanjutkan dengan sekolah menengah pertama di SMP N 46 Palembang pada tahun 1997, dan Pendidikan menengah atas di SMU Muhammadiyah 1 Palembang pada tahun 2000. Setelah itu, penulis menyelesaikan studi lanjut ke jenjang perguruan tinggi pada pendidikan sarjana Teknik Kimia di Universitas Sriwijaya pada tahun 2004, kemudian dilanjutkan studi S2 di Teknik Kimia dengan fokus pada Pengolahan Lingkungan di Universitas Sriwijaya pada tahun 2012. Pada tahun 2025 ini, penulis menyelesaikan studi Doktor Ilmu Lingkungan di Pascasarjana Universitas Sriwijaya dengan bidang konsenstrasi yaitu Agri Industri Energi.

Dalam bidang akademik dan penelitian, penulis memiliki publikasi internasional sebanyak 6 judul, dengan 5 di antaranya terindeks Scopus dan 1 non-Q. Selain itu, saya juga mempublikasikan 16 judul di jurnal nasional yang terindeks Sinta, menulis 5 buku, serta memiliki 5 Hak Kekayaan Intelektual (HKI). Beberapa judul publikasi penulis antara lain: "Proses Fitoremediasi Limbah Cair Tahu Untuk Menurunkan COD dan TSS dengan Memanfaatkan *Kiambang (Salvinamolesta)*," "Karakterisasi Karbon Aktif Pelet Kulit Kacang Tanah dan Aplikasinya pada Limbah Pewarna Sintesis," "Pengaruh Penambahan C-Aktif Kulit Kacang Tanah Terhadap Karakteristik Morfologi dan Unsur-Unsur Penyusun Membran Keramik dan Aplikasinya Terhadap Pengolahan Limbah Pewarna Batik, *The Effect of Combustion Temperature in The Making of Biobriquette from The Skin of Peanut, Synthesis and Characterization of Aluminum/Iron–Pillared Bentonite Catalysts for Empty Fruit Bunches Biomass Gasification*," dan *"Thermogravimetric Analysis of EFB and Palm Shells as Gasification Fuels: Kinetic and Activation Energy Study, dan Comparison of Alum and Poly Aluminum Chloride Coagulant Performance on Turbidity and pH of Lematang Enim PDAM Raw Water.*

Sejak tahun 2014, penulis bekerja sebagai dosen di Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Tamansiswa Palembang. Penulis pernah

menjabat sebagai Sekretaris Lembaga Penelitian Universitas Tamansiswa Palembang, dan saat ini menjabat sebagai Ketua Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Tamansiswa Palembang. Penulis juga pernah mendapatkan Hibah Penelitian Kompetitif Nasional oleh Kemdikbudristek Dikti pada tahun 2018 dan 2021 dalam skema PDP, serta Hibah Penelitian Doktor pada tahun 2023 dan 2024. Dengan pengalaman tersebut, penulis berkomitmen untuk terus berkontribusi dalam dunia pendidikan, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat, khususnya dalam bidang teknik kimia dan ilmu lingkungan.

PRAKATA

Disertasi yang berjudul "Peningkatan Kualitas *Synthetic Gas* Hasil Gasifikasi Katalitik Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Cangkang Sawit Menggunakan Katalis Bentonit Terpillar Logam untuk *Renewable Fuel Gas*" disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Doktor (Dr.) pada Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Sriwijaya. Dalam mewujudkan disertasi ini, penulis telah mendapatkan bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Prof. Dr. Ir. Muhammad Faizal, D.E.A., Dipl. Expert., sebagai Promotor, Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D., dan Prof. Dr. Fakhili Gulo, sebagai Co-Promotor atas segala bimbingan dan arahan yang sangat berarti dalam penulisan disertasi ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. Ir. Nurhayati, M.Si., Prof. Dr. Ir. Irwin Bizzy, M.T., dan Prof. Dr. Ir. Kiagus Ahmad Roni, S.T., M.T., IPM., ASEAN.Eng., anggota penguji yang telah memberikan saran-saran berharga untuk perbaikan disertasi ini. Selanjutnya, penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. Taufik Marwa, SE., M.Si, Rektor Universitas Sriwijaya. Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Said, M.Sc., Direktur Program Pascasarjana Universitas Sriwijaya. Dr. Mukhtarudin, SE., M.Si., Ak,C.A., selaku Wakil Direktur Bidang Umum dan Keuangan Program Pascasarjana Universitas Tamansiswa Palembang. Ketua Badan Penyelenggara Perguruan Tinggi Tamansiswa Palembang beserta seluruh jajaran pengurus. Dr. Sisnayati, ST., MT., Rektor Universitas Taman Siswa beserta jajarannya yang telah memberikan dukungan baik secara moril, materi, dan administratif selama penulisan disertasi ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh rekan-rekan dosen dan civitas akademika Universitas Tamansiswa Palembang atas dukungan dan kerjasama yang sangat berarti dalam perjalanan akademik ini. Terkhusus kepada rekan-rekan Program Studi Teknik Kimia Universitas Tamansiswa Palembang, terima kasih atas kebersamaan dan kontribusinya selama ini. Tidak lupa, penulis mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada kedua orang tua saya Alm. Papa dan Mama tercinta, yang telah memberikan cinta, doa, dan semangat yang tiada henti, serta kepada suami dan

anak-anakku tersayang, dan seluruh keluarga besar yang senantiasa memberikan dukungan moral dan kasih sayang selama proses penyusunan disertasi ini. Terima kasih juga disampaikan kepada sahabat-sahabat yang selalu mendukung dan memberikan semangat sepanjang perjalanan ini.

Akhir kata, semoga disertasi ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang Ilmu Lingkungan, serta dapat memberikan kontribusi positif untuk kemajuan teknologi dan seni.

Palembang, 29 Juli 2025

Penulis,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ria', with a long, sweeping horizontal stroke underneath.

Ria Komala

RINGKASAN

PENINGKATAN KUALITAS *SYNTHETIC GAS* HASIL GASIFIKASI KATALITIK TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DAN CANGKANG SAWIT MENGGUNAKAN KATALIS BENTONIT TERPILAR LOGAM UNTUK *RENEWABLE FUEL GAS*

Karya tulis ilmiah berupa Disertasi, 27 Juli 2025

Ria Komala; Dibimbing oleh Prof. Dr. Ir. Muhammad Faizal, D.E.A, Dipl. Expert. Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D. Prof. Dr. Fakhili Gulo.

Prodi Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana Universitas Sriwijaya

xxv + 209 halaman, 19 tabel, 37 gambar, 1 lampiran

RINGKASAN

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan cangkang sawit merupakan limbah biomassa dari industri kelapa sawit yang jumlahnya melimpah, namun pemanfaatannya masih terbatas. Tanpa pengelolaan yang tepat, limbah ini berpotensi mencemari lingkungan. Salah satu solusi yang menjanjikan untuk mengatasi permasalahan tersebut sekaligus mendukung penyediaan energi alternatif adalah melalui teknologi gasifikasi biomassa. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem gasifikasi katalitik guna meningkatkan kualitas *synthetic gas* (*syngas*) yang dihasilkan dari konversi TKKS dan cangkang sawit. Proses dilakukan dengan menggunakan katalis berbasis bentonit yang telah diaktivasi dan dipilarisasi menggunakan logam aluminium (Al) dan besi (Fe). Selain itu, dilakukan tahap pengkayaan dan pemurnian gas menggunakan media *Char* dan larutan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) untuk memperoleh *syngas* yang bersih, bernilai kalor tinggi, dan berpotensi sebagai sumber *renewable fuel gas* yang ramah lingkungan. Proses gasifikasi dilakukan pada rentang suhu 400–600 °C dengan variasi komposisi TKKS : cangkang sawit, yaitu 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, dan 0:100, untuk menentukan kombinasi kondisi terbaik dalam menghasilkan *syngas* berkualitas. Tahapan penelitian meliputi persiapan dan karakterisasi bahan baku, sintesis dan karakterisasi katalis, perancangan sistem gasifikasi terpadu yang terdiri atas *biomass Gasifier*, *Gasifier Char*, dan *absorber*, serta proses gasifikasi dilakukan secara bertahap, mulai dari nonkatalitik tanpa medium eksternal, dilanjutkan dengan penambahan oksigen dan uap air, hingga tahap katalitik yang disertai peningkatan CO serta H_2 melalui reaksi sekunder menggunakan *Char* serta pemurnian CO_2 . Kinerja gasifikasi dievaluasi melalui pengukuran komposisi gas (H_2 , CO, CH_4 , CO_2), kualitas gas yang dihasilkan (GC, NGC dan rasio GC/NGC), nilai kalor (HHV dan LHV), efisiensi konversi karbon (CCE), serta efisiensi gas dingin (CGE). Hasil menunjukkan bahwa TKKS dan cangkang sawit memiliki karakteristik saling melengkapi. TKKS kaya *volatile matter*, sedangkan cangkang sawit memiliki karbon tetap dan nilai kalor lebih tinggi, sehingga kombinasi

keduanya mendukung efisiensi konversi biomassa. Energi aktivasi keduanya juga hampir setara, yaitu sekitar 4482–4485 J/mol, mendukung reaksi termal yang seimbang dalam proses gasifikasi. Katalis bentonit hasil aktivasi dan pemiliran logam Al dan Fe menunjukkan peningkatan struktur pori, kristalinitas, dan kandungan logam, sehingga lebih stabil dan efektif dalam meningkatkan efisiensi dan kualitas gas pada proses gasifikasi biomassa. Pada proses gasifikasi, 100% cangkang sawit menghasilkan *syngas* terbaik pada suhu 600 °C dengan kandungan H₂ sebesar 18,83%, CH₄ sebesar 17,08%, dan CO₂ hanya 10,22%. Sementara itu, campuran 50% TKKS dan 50% cangkang menunjukkan kualitas *syngas* yang rendah pada awalnya. Namun setelah melalui proses gasifikasi katalitik, pengayaan dengan *Char*, dan pemurnian menggunakan Ca(OH)₂, kualitas *syngas* dari campuran ini meningkat tajam. Kandungan CO₂ turun dari 65,47% menjadi 0,34%, nilai kalor naik menjadi 5,65 MJ/Nm³, dan efisiensi konversi energi mencapai 32,25%. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa TKKS dan cangkang sawit berpotensi besar sebagai bahan baku energi terbarukan. Sistem gasifikasi katalitik yang dikembangkan mampu meningkatkan kualitas *syngas* secara signifikan dan menawarkan solusi yang praktis dan berkelanjutan untuk pengelolaan limbah biomassa serta transisi menuju energi bersih.

Kata Kunci : Gasifikasi, TKKS, Cangkang sawit, Katalis bentonit terpilir, *Syngas*.
Kepustakaan : 228 sumber (2015-2025)

SUMMARY

IMPROVEMENT OF SYNTHETIC GAS QUALITY FROM CATALYTIC GASIFICATION OF EMPTY FRUIT BUNCHES AND PALM SHELLS USING METAL-PILLARED BENTONITE CATALYST FOR RENEWABLE FUEL GAS

Scientific Dissertation, July 27, 2025

Ria Komala; Supervised by Prof. Dr. Ir. Muhammad Faizal, D.E.A, Dipl. Expert.
Prof. Drs. Dedi Rohendi, M.T., Ph.D. Prof. Dr. Fakhili Gulo.

Environmental Science Program, Postgraduate Program, Sriwijaya University

xxv + 209 pages, 19 tables, 37 figures, 1 appendix

SUMMARY

Empty Fruit Bunches (EFB) and Palm Kernel Shells (PKS) are biomass wastes from the palm oil industry, which are abundant but have limited utilization. Without proper management, these wastes have the potential to pollute the environment. One promising solution to address this issue while supporting the provision of alternative energy is through biomass gasification technology. This research aims to develop a catalytic gasification system to improve the quality of synthetic gas (syngas) produced from the conversion of EFB and PKS. The process is carried out using a bentonite-based catalyst that has been activated and pillarized with aluminum (Al) and iron (Fe) metals. Additionally, enrichment and purification stages are performed using *Char* and calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) solution to obtain clean syngas with a high calorific value, which has the potential to serve as an environmentally friendly renewable fuel gas. Gasification is conducted within a temperature range of 400–600°C, with varying EFB:PKS compositions of 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, and 0:100, to determine the optimal combination of conditions for producing high-quality syngas. The research stages include preparation and *Characterization* of feedstock, catalyst synthesis and *Characterization*, design of an integrated gasification system consisting of a biomass *Gasifier*, *Char Gasifier*, and absorber, followed by a staged gasification process starting with non-catalytic gasification without external media, then proceeding with the addition of oxygen and steam, and finally reaching the catalytic stage that includes CO and H₂ enhancement via secondary reactions using *Char*, along with CO₂ purification. The performance of the gasification process is evaluated through measurements of gas composition (H₂, CO, CH₄, CO₂), gas quality (GC, NGC, and GC/NGC ratio), calorific value (HHV and LHV), carbon conversion efficiency (CCE), and cold gas efficiency (CGE). The results show that EFB and PKS have complementary *Characteristics*. EFB is rich in *volatile matter*, while PKS contains fixed carbon and a higher calorific value, so their combination supports biomass conversion efficiency. The activation energy of both is almost identical, around 4482–4485 J/mol, which supports a balanced thermal reaction in the gasification process. The bentonite catalyst, activated and pillarized with Al and Fe metals, showed improved pore structure, crystallinity, and metal content, making it more stable and effective

in enhancing gas efficiency and quality during the biomass gasification process. In the gasification process, 100% PKS produced the best syngas at 600°C, with H₂ content of 18.83%, CH₄ content of 17.08%, and CO₂ content of only 10.22%. Meanwhile, the 50% EFB and 50% PKS mixture initially produced low-quality syngas. However, after undergoing catalytic gasification, enrichment with *Char*, and purification using Ca(OH)₂, the syngas quality from this mixture increased sharply. CO₂ content decreased from 65.47% to 0.34%, the calorific value increased to 5.65 MJ/Nm³, and energy conversion efficiency reached 32.25%. Overall, this study demonstrates that EFB and PKS have significant potential as renewable energy feedstocks. The developed catalytic gasification system significantly improves syngas quality and offers a practical and sustainable solution for biomass waste management and the transition to clean energy.

Keywords : Gasification, EFB, Palm Shells, Pillared Bentonite Catalyst, Syngas.

References : 228 sources (2015-2025)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
PRAKATA	viii
RINGKASAN	xiv
SUMMARY.....	xxii
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR GAMBAR.....	xx
DAFTAR SINGKATAN.....	xxiii
PERSEMBAHAN.....	xxiii
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	10
1.3. Maksud atau Tujuan Penelitian	11
1.4. Manfaat Penelitian.....	11
1.5. Hipotesis Penelitian.....	12
1.6. Penelitian terdahulu	13
1.7. Kebaharuan Penelitian.....	15
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA.....	17
2.1. Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)	17
2.2. Cangkang Sawit.....	21
2.3. Gasifikasi	22
2.4. Katalis.....	26
2.5. Bentonit	29

2.6. Katalis Bentonit Terpilar Logam	31
2.7. Gasifikasi Katalitik.....	33
2.8. Ca-based Absorben/catalyst Gasification.....	34
2.9. Model Kinetika Gasifikasi.....	35

BAB III. METODE PENELITIAN37

3.1. Persiapan dan karakterisasi bahan baku utama berupa limbah TKKS dan cangkang sawit	38
3.1.1. Waktu dan tempat	39
3.1.2. Alat dan Bahan	39
3.1.3. Variabel penelitian.....	39
3.1.4. Parameter penelitian	40
3.1.5. Prosedur penelitian	41
3.1.6. Analisis Data.....	42
3.2. Sintesis dan Karakterisasi Katalis Berbahan Bentonit Terpilar logam Al dan Fe. 43	
3.2.1. Waktu dan tempat	44
3.2.2. Alat dan Bahan Penelitian.....	44
3.2.3. Variabel penelitian	45
3.2.4. Parameter penelitian	45
3.2.5. Prosedur penelitian (Said, Rizki, et al., 2020) (Said, Dian, et al., 2020)(Purwaningrum et al., 2021).....	47
3.2.6. Analisis Data.....	48
3.3. Rancangan Alat Gasifikasi Sistem Terpadu	49
3.3.1. Waktu dan Tempat.....	49
3.3.2. Alat dan Bahan.....	50
3.3.3. Variabel Penelitian.....	52
3.3.4. Parameter Penelitian	52
3.3.5. Prosedur Penelitian	53
3.4. Uji awal proses gasifikasi nonkatalitik tanpa medium eksternal	54
3.4.1. Waktu dan Tempat.....	55
3.4.2. Alat dan Bahan.....	55

3.4.3. Variabel Penelitian.....	56
3.4.4. Parameter Penelitian	56
3.4.5. Prosedur Penelitian	56
3.4.6. Analisis Komposisi Gas.....	58
3.5. Proses gasifikasi nonkatalitik dengan medium eksternal pada berbagai komposisi TKKS dan cangkang sawit.....	60
3.5.1. Waktu dan Tempat.....	60
3.5.2. Alat dan Bahan.....	60
3.5.3. Variabel Penelitian.....	61
3.5.4. Parameter penelitian	62
3.5.5. Prosedur Penelitian	62
3.5.6. Analisis data.....	63
3.6. Proses Gasifikasi Katalitik, Pengayaan, dan Pemurnian <i>Syngas</i>	64
3.6.1. Waktu dan Tempat.....	64
3.6.2. Alat dan bahan	64
3.6.3. Variabel Penelitian.....	66
3.6.4. Parameter Penelitian	66
3.6.5. Prosedur penelitian	67
3.6.6. Analisa Data.....	68
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	72
4.1. Karakterisasi Bahan Baku	72
4.1.1. Analisa Proksimat dan Ultimat	72
4.1.2. Analisis Termogravimetri.	77
4.1.3. Energi aktivasi	84
Energi Aktivasi dan Implikasinya dalam Proses Gasifikasi Biomassa.....	87
4.2. Karakterisasi Katalis Bentonit.....	88
4.2.1. Sintesis Katalis Bentonit Terpillar Logam Al Dan Fe	88
4.2.2. Karakterisasi Katalis Bentonit Pilar Al dan Fe	89
4.3. Rancangan Alat Modifikasi Gasifikasi Dengan System Terpadu	105
4.4. Proses Gasifikasi Non-Katalitik Tanpa Agen Gasifikasi Eksternal	108

4.4.1. Komposisi <i>Syngas</i> Hasil Gasifikasi Non-Katalitik tanpa Agen Gasifikasi pada Berbagai Temperatur.....	110
4.4.2. Gas Combustible (%GC)	112
4.4.3. <i>Non-Gas Combustible</i> (%NGC) dalam Gasifikasi	114
4.4.4. Rasio GC/NGC	116
4.4.5. <i>Lower Heating Value</i> (LHV)	118
4.4.6. <i>Higher Heating Value</i> (HHV).....	120
4.4.7. <i>Carbon Conversion Efficiency</i> (CCE)	122
4.4.8. <i>Cold Gas Efficiency</i> (CGE).....	124
4.4.9. Analisis Komprehensif Proses Gasifikasi Tanpa Agen pada Berbagai Variasi Temperatur	125
4.5. Gasifikasi Non-Katalitik Berbasis Kombinasi Bahan Baku dengan Agen Gasifikasi.....	126
4.5.1. Komposisi <i>Syngas</i>	127
4.5.2. Gas Combustible (%GC)	131
4.5.3. <i>Non-Gas Combustible</i> (%NGC)	133
4.5.4. Rasio Gas Combustible (GC) dan <i>Non-Combustible</i> (NGC)	136
4.5.5. <i>Low Heating Value</i> (LHV)	138
4.5.6. <i>Higher Heating Value</i> (HHV).....	141
4.5.7. <i>Carbon Conversion Efficiency</i> (CCE)	143
4.5.8. <i>Cold Gas Efficiency</i> (CGE).....	145
4.5.9. Analisis Komprehensif Proses Gasifikasi Non Katalitik dengan Agen Gasifikasi pada Berbagai Varian Komposisi Bahan Baku dan Temperatur. .	147
4.6. Proses Gasifikasi Katalitik, Pengkayaan, dan Pemurnian.....	148
4.6.1. Komposisi <i>syngas</i>	149
4.6.2. Gas Combustible (%GC) dan <i>Non-Gas Combustible</i> (%NGC)	150
4.6.3. Rasio GC/NGC	154
4.6.4. <i>Lower Heating Value</i> (LHV) dan <i>Higher Heating Value</i> (HHV)	155
4.6.5. <i>Carbon Conversion Efficiency</i> (%CCE) dan <i>Cold Gas Efficiency</i> (%CGE).....	157

4.6.6. Analisis Komprehensif Peningkatan Kualitas <i>Syngas</i> melalui Proses Gasifikasi Katalitik, Pengkayaan, dan Pemurnian Campuran TKKS–Cangkang Sawit.....	160
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	164
5.1. Kesimpulan.....	164
5.2. Keterkaitan Penelitian Terhadap Ilmu Lingkungan.....	164
5.3. Keterbatasan Penelitian	164
5.4. Saran	168
5.5. Capaian Luaran.....	169
DAFTAR PUSTAKA	170
LAMPIRAN 1. DOKUMENTASI KEGIATAN	193

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Karakteristik tandan kosong kelapa sawit.....	20
Tabel 2. Reaksi pada gasifikasi.....	23
Tabel 3. Hasil analisis kimia bentonit.....	29
Tabel 4. Parameter dan metode uji tandan kosong dan cangkang sawit.....	40
Tabel 5. Matrik Data Penelitian	70
Tabel 6. Hasil analisa proksimat TKKS dan cangkang sawit	73
Tabel 7. Hasil analisa ultimat TKKS dan cangkang sawit.....	75
Tabel 8. Kehilangan berat TKKS dan cangkang sawit terhadap waktu.....	78
Tabel 9. Perubahan temperatur terhadap waktu pemanasan TKKS.....	82
Tabel 10. Temperatur rata-rata TKKS dan cangkang sawit terhadap waktu	85
Tabel 11. Data $1/T$ dan $\ln(T)$ untuk analisis energi aktivasi.....	85
Tabel 12. Karakteristik volume dan porositas bentonit alam, bentonit teraktivasi asam, dan bentonit terpillar logam	98
Tabel 13. Komposisi unsur bentonit alam, bentonit teraktivasi, dan bentonit terpillar logam berdasarkan analisis EDS	100
Tabel 14. Ukuran kristal rata-rata bentonit berdasarkan analisis XRD	103
Tabel 15. Persentase kristalinitas bentonit berdasarkan analisis XRD	104
Tabel 16. Spesifikasi komponen sistem reaktor gasifikasi terpadu.....	104
Tabel 17. Komposisi <i>syngas</i> hasil gasifikasi non-katalitik pada berbagai temperatur	110
Tabel 18. Komposisi <i>syngas</i> hasil gasifikasi non-katalitik pada berbagai perbandingan komposisi bahan baku dan temperatur	128
Tabel 19. Komposisi <i>syngas</i> pada berbagai perlakuan proses gasifikasi.....	149

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Diagram alir neraca massa pengolahan sawit	18
Gambar 2. Penumpukan tandan kosong kelapa sawit di industri CPO.....	19
Gambar 3. Diagram alir penelitian.....	38
Gambar 4. Diagram alir persiapan dan karakterisasi TKKS dan cangkang sawit	42
Gambar 5. Diagram alir sintesis dan karakterisasi bentonit terpliar logam	48
Gambar 6. Rancangan alat gasifikasi system terpadu.....	51
Gambar 7. Diagram alir proses gasifikasi nonkatalitik tanpa medium eksternal..	58
Gambar 8. Diagram alir proses sistem gasifikasi nonkatalitik dengan medium eksternal.....	61
Gambar 9. Diagram alir proses gasifikasi nonkatalitik dengan medium eksternal pada berbagai komposisi TKKS dan cangkang sawit	63
Gambar 10. Diagram alir sistem gasifikasi katalitik terpadu, pengayaan, dan pemurnian <i>syngas</i>	65
Gambar 11. Diagram alir blok gasifikasi system terpadu	68
Gambar 12. Persen kehilangan berat TKKS dan cangkang sawit terhadap waktu pada uji TGA.....	78
Gambar 13. Perubahan temperatur TKKS dan cangkang sawit terhadap waktu pada uji TGA.....	82
Gambar 14. Plot Arrhenius untuk TKKS dan Cangkang Sawit.....	86
Gambar 15. Bahan katalis: (a) bentonit alami, (b) bentonit teraktivasi, dan (c) bentonit terpillar logam.	89
Gambar 16. Spektrum FTIR katalis : bentonit alam, bentonit teraktivasi H ₂ SO ₄ , bentonit terpillar logam Al dan Fe	90
Gambar 17. Citra SEM dari katalis: (a) bentonit alami, (b) bentonit teraktivasi h ₂ so ₄ , (c) bentonit terpillar logam Al dan Fe.....	95
Gambar 18. Citra 3 dimensi katalis (a) bentonit alam, (b) bentonite teraktivasi dan (c) bentonit terpillar logam Al dan Fe	96
Gambar 19. Pola difraksi sinar-X (XRD) untuk bentonit alami, teraktivasi, dan terpillar logam	102

Gambar 20. Persen GC pada gasifikasi nonkatalitik TKKS dan cangkang sawit tanpa medium eksternal.....	113
Gambar 21. Persen NGC pada gasifikasi nonkatalitik TKKS dan cangkang sawit tanpa medium eksternal.....	115
Gambar 22. Rasio GC dan NGC pada gasifikasi nonkatalitik TKKS dan cangkang sawit tanpa medium eksternal	117
Gambar 23. Nilai LHV pada gasifikasi nonkatalitik TKKS dan cangkang sawit tanpa medium eksternal.....	118
Gambar 24. Nilai HHV pada gasifikasi nonkatalitik TKKS dan cangkang sawit tanpa medium eksternal.....	120
Gambar 25. Persen CCE pada gasifikasi nonkatalitik TKKS dan cangkang sawit tanpa medium eksternal.....	122
Gambar 26. Persen CGE pada gasifikasi nonkatalitik TKKS dan cangkang sawit tanpa medium eksternal.....	124
Gambar 27. Persen GC pada berbagai komposisi bahan baku dalam gasifikasi Nonkatalitik dengan agen eksternal	131
Gambar 28. Persen GC pada berbagai komposisi bahan baku dalam gasifikasi nonkatalitik dengan agen eksternal	134
Gambar 29. Rasio GC/NGC pada berbagai komposisi bahan baku dalam gasifikasi nonkatalitik dengan agen eksternal.....	136
Gambar 30. Nilai LHV pada berbagai komposisi bahan baku dalam gasifikasi nonkatalitik dengan agen eksternal	139
Gambar 31. Nilai HHV pada berbagai komposisi bahan baku dalam gasifikasi nonkatalitik dengan agen eksternal	141
Gambar 32. Persen CCE pada berbagai komposisi bahan baku dalam gasifikasi nonkatalitik dengan agen eksternal	143
Gambar 33. Persen CGE pada berbagai komposisi bahan baku dalam gasifikasi nonkatalitik dengan agen eksternal	145
Gambar 34. Persen GC dan NGC pada berbagai perlakuan proses gasifikasi....	151
Gambar 35. Rasio GC/NGC pada berbagai perlakuan proses gasifikasi	154
Gambar 36. Nilai LHV dan HHV pada berbagai perlakuan proses gasifikasi.....	156

Gambar 37. Persen CCE & CGE pada berbagai pelaksanaan proses gasifikasi 158

DAFTAR SINGKATAN

A	:	Faktor pre-eksponensial
ACD	:	Anaerobic Co-Disgetion
ADB	:	Air Dried Basis
AR	:	As Received
Al	:	Aluminium
AR	:	As Received
CaO	:	Kalsium Oksida
CaCO ₃		Kalsium Karbonat
CCE	:	<i>Carbon Conversion Efficiency</i>
CGE	:	Cold Gas Efficiency
CH ₄	:	Metana
CO	:	Karbon Monoksida
CO ₂	:	Karbon Dioksida
CPO	:	Crude Palm Oil
DB	:	Dry Basis
EA	:	Energi Aktivasi
EBT	:	Energi Baru Terbarukan
EDS	:	Analisa X-Ray Dispersi Energi
ER	:	Equivalent Ratio
FC	:	Fixed Carbon
Fe	:	Besi
FT-IR	:	Fourier Transform Infra-Red
FWO	:	Flynn-Wall-Ozawa
GC	:	Gas Combustible
GC/NGC	:	Rasio Gas Combustible terhadap Non-Gas Combustible
GCV	:	Gross Calorific Value
H ₂	:	Hidrogen
H ₂ O	:	Air
H ₂ SO ₄		Asam Sulfat
HHV	:	High Heating Value
KAS	:	Kissinger-Akahira-Sunose
LHV	:	Low Heating Value
MJ/Nm ³	:	Mega Joule per Normal Meter Kubik
MO	:	Moisture
NaOH	:	Natrium Hidroksida
NB	:	Natural Bentonite
NBTA	:	Natural Bentonite Thermal Activated
NGC	:	Non-Gas Combustible
O ₂	:	Oksigen
P	:	Tekanan
PICs	:	Pillared Interlayered Clays
PVC	:	Polyvinyl Chloride
RUEN	:	Rencana Umum Energi Nasional
SCWG	:	Supercritical Water Gasification

SEM	:	Scanning Electron Microscope
SUS316	:	Stainless Steel 316 (bahan alat tahan suhu tinggi)
<i>pSYNGAS</i>	:	Synthetic Gas
T	:	Temperatur
T	:	Waktu
TBS		Tandan Buah Segar
TGA	:	Thermogravimetric Analysis
TKKS	:	Tandan Kosong Kelapa Sawit
VM	:	<i>Volatile matter</i>
XRD	:	X-ray Diffraction

PERSEMBAHAN

Disertasi ini saya persembahkan dengan penuh rasa syukur kepada Alm. Papa Sani Ase dan Mama Nurdiana, yang telah memberikan kasih sayang, doa, dan dukungan tanpa henti sepanjang hidup saya. Kepada suami Haryadi Bungsu dan anak-anak Chalisa Fikratuha, Chila Aprillia, dan M. Chiko Saputra, yang selalu menjadi sumber kekuatan, kebahagiaan, dan inspirasi dalam setiap langkah yang saya ambil. Terima kasih atas kesabaran, pengertian, dan cinta yang tak terhingga. Tak lupa saya persembahkan untuk keluarga besar, yang senantiasa memberikan dukungan moral dan doa, serta menjadi sumber motivasi dalam menghadapi setiap tantangan yang datang. Kepada rekan-rekan sejawat dan sahabat-sahabat, yang telah memberikan semangat, dukungan, dan kebersamaan selama perjalanan panjang ini. Karya ini juga saya persembahkan untuk semua pihak yang telah memberikan kontribusi, baik langsung maupun tidak langsung, dalam penyelesaian disertasi ini. Semoga karya ini dapat memberikan manfaat bagi ilmu pengetahuan dan memberikan kontribusi bagi kemajuan masyarakat dan lingkungan di masa depan.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara penghasil minyak kelapa sawit terbesar di dunia dengan luas perkebunan yang tersebar di berbagai provinsi. Industri kelapa sawit telah menjadi tulang punggung ekonomi negara melalui produksi *Crude Palm Oil* (CPO) yang diekspor ke berbagai negara. Total produksi CPO di Indonesia pada tahun 2022 diperkirakan mencapai 46,82 juta ton dengan luas lahan 15,34 juta hectare (Irjayanti et al., 2023). Data dari Badan Pusat Statistik Indonesia menunjukkan bahwa produksi minyak kelapa sawit di Indonesia terus meningkat, seiring dengan bertambahnya luas lahan. Namun, pertumbuhan industri ini juga menghasilkan limbah padat dalam jumlah besar yang perlu dikelola dengan baik (Irjayanti et al., 2023).

Salah satu limbah utama yang dihasilkan dari industri minyak kelapa sawit adalah biomassa, yang terdiri dari residu senyawa lignoselulosa seperti Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS), serat, dan cangkang sawit. Proses produksi minyak kelapa sawit menghasilkan sekitar 22,5% CPO dari setiap ton Tandan Buah Segar (TBS) yang diproduksi, sementara sisanya berupa limbah biomassa. Setiap hektar perkebunan kelapa sawit dapat menghasilkan rata-rata sekitar 20 hingga 30 ton TBS per tahun, dengan sekitar 23% dari setiap ton TBS diolah menjadi minyak sawit dan sisanya berupa limbah biomassa. Dari limbah tersebut, diperkirakan sebanyak 21% TKKS, 14,4% berupa serat, dan 6,4% berupa cangkang sawit (Papilo et al., 2017). Secara keseluruhan, Indonesia menghasilkan lebih dari 30 juta ton TKKS, 20,9 juta ton serat, dan 9,3 juta ton cangkang sawit setiap tahun, menjadikannya salah satu sumber biomassa terbesar yang belum dimanfaatkan secara optimal. Jika tidak dikelola dengan baik, limbah biomassa kelapa sawit dapat berdampak negatif terhadap lingkungan. Pada umumnya, TKKS yang dihasilkan dari proses pengolahan TBS dibiarkan menumpuk di lahan, yang dapat menyebabkan kebakaran, pembusukan, serta emisi gas rumah kaca seperti metana (CH_4). Selain itu, TKKS yang masih mengandung kadar air tinggi dapat mencemari perairan jika

tidak dikelola dengan baik. Untuk mengurangi limbah ini, industri CPO sering mengembalikan TKKS ke perkebunan sebagai pupuk karena mengandung unsur hara makro dan mikro yang penting bagi pertumbuhan tanaman, seperti 42,8% karbon (C), 2,9% kalium oksida (K_2O), 0,8% nitrogen (N), 0,22% fosfat (P_2O_5), 0,30% magnesium oksida (MgO), 23 ppm tembaga (Cu), dan 51 ppm seng (Zn) (Windiastruti et al., 2022). Selain itu, TKKS juga digunakan sebagai bahan bakar boiler, meskipun pembakaran langsung di boiler berkontribusi terhadap pelepasan gas rumah kaca (Abduh et al., 2016).

Metode pembakaran terbuka limbah biomassa sering digunakan untuk mengurangi volume limbah, namun hal ini menghasilkan emisi karbon dioksida, metana, dan dinitrogen oksida, yang secara signifikan berkontribusi terhadap perubahan iklim dan mencemari kualitas udara, membahayakan kesehatan masyarakat (Pinakana et al., 2024). Oleh karena itu, pengelolaan limbah biomassa kelapa sawit menjadi tantangan yang mendesak untuk diatasi. Dengan strategi yang tepat, biomassa dari limbah kelapa sawit dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan (Kurniawan et al., 2025)

Sebagai respons terhadap tantangan ini, pemerintah Indonesia telah menerapkan berbagai kebijakan untuk mendorong pengembangan Energi Baru dan Terbarukan (EBT) (Azhar et al., 2018). Salah satu inisiatif strategis yang dilakukan Pemerintah adalah pengesahan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), yang memuat target kontribusi energi terbarukan sebesar 23% dari total bauran energi nasional pada tahun 2025 (Budiarto et al., 2021). Selain itu, pemerintah memberikan insentif untuk investasi dalam energi terbarukan, termasuk pengembangan teknologi yang memanfaatkan biomassa sebagai sumber energi. Sesuai Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, pemerintah menargetkan peningkatan porsi EBT dalam bauran energi primer nasional menjadi minimal 23 % pada tahun 2025 dan minimal 31 % pada tahun 2050, sebagai upaya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mendukung ketahanan energi jangka Panjang (Pemerintah Republik Indonesia, 2014). Kebijakan ini mencakup program mandatori biodiesel berbasis sawit,

pengembangan biomassa sebagai energi alternatif, serta penelitian dan inovasi teknologi gasifikasi untuk konversi biomassa menjadi energi.

TKKS dan cangkang sawit memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi, menjadikannya bahan baku potensial untuk berbagai aplikasi bioenergi. TKKS mengandung sekitar 40-50% selulosa, 25-35% hemiselulosa, dan 20-25% lignin, sehingga cocok untuk proses konversi energi seperti gasifikasi yang dapat mengubahnya menjadi *syngas* (Dolah et al., 2021). Di sisi lain, cangkang sawit adalah limbah keras dengan kandungan energi tinggi, memiliki nilai kalori sekitar 17-20 MJ/kg, sehingga sering digunakan sebagai bahan bakar padat dalam berbagai industri. Namun, potensi konversi cangkang sawit menjadi *syngas* melalui proses gasifikasi katalitik masih belum banyak dieksplorasi, meskipun konversi ini dapat memberikan nilai tambah lebih tinggi dibandingkan pembakaran langsung.

Berbagai metode konversi telah dikembangkan untuk memanfaatkan TKKS dan cangkang sawit dari industri CPO antara lain konversi bioethanol, biodiesel, biogas, pirolisis, briket dan gasifikasi. Beberapa penelitian yang memanfaatkan TKKS adalah produksi bioethanol dari TKKS dengan proses hidrolisis dan fermentasi, yang menghasilkan etanol sekitar 50% (Polprasert et al., 2021). Pemanfaatan TKKS sebagai katalis dalam pembuatan biodiesel, hasil penelitian menunjukkan abu dari TKKS berpotensi sebagai katalis heterogen yang ekonomis dan ramah lingkungan, dimana dalam kondisi optimal dapat menghasilkan 50,5% methyl oleat (Wong et al., 2020). Konversi TKKS menjadi Bio-Oil dengan proses *fast pyrolysis* dan liquifaksi (Chang, 2018), Bio-oil dari TKKS dapat menetralkan emisi karbon, sulfur, nitrogen dll, tetapi penerapannya masih dibatasi. TKKS juga dapat dimanfaatkan untuk produksi biogas melalui proses *anaerobic co-digestion* yang di kombinasi dengan *Palm Oil Mill Effluent* (POME), pada rasio TKKS dan POME yang optimal dapat memproduksi metane 2,36 kali lebih baik daripada biogas menggunakan POME saja (Liew et al., 2021). Pada penelitian sebelumnya, TKKS dapat diubah menjadi gas melalui proses gasifikasi. Bahan baku TKKS dan zeolite sebagai katalis di injeksikan kedalam *Gasifier updraft* beserta CO₂ dan *steam*, suhu optimal di dapat pada 550°C dengan komposisi gas 22,64% vol CH₄, 29,22% vol CO dan 3,4 % vol H₂ (Aprianti et al., 2020).

Pemanfaatan cangkang sawit untuk pembangkit listrik tenaga uap, cangkang sawit dikombinasi dengan bahan bakar batubara dengan teknik co-firing didapat efisiensi boiler sebesar 63,92% dan 83,71% (Eteruddin et al., 2021).

Pada penelitian ini, proses gasifikasi dipilih untuk mengonversi limbah biomassa berupa TKKS dan cangkang sawit menjadi *syngas*, karena proses ini mampu menghasilkan gas yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi maupun sebagai bahan baku sintesis senyawa kimia seperti metanol, urea, dan amonia, selain itu juga dapat membantu mensintesis bahan bakar transfortasi dari limbah biomassa yang tidak mengandung dioksin. Gasifikasi dapat menguntungkan secara lingkungan dan ekonomi yaitu menyelesaikan masalah krisis energi, pengolahan limbah biomassa serta mengurangi emisi gas rumah kaca. Selain itu kelebihan konversi biomassa melalui gasifikasi adalah menghasilkan *syngas* yang dapat digunakan sebagai bahan bakar penggerak generator untuk menghasilkan listrik, memproduksi gas CO₂ yang lebih sedikit dimana *syngas* hasil gasifikasi yang baik memiliki kandungan CO dan H₂ yang tinggi dan CO₂ sedikit (Zhang et al., 2019).

Gasifikasi merupakan teknologi yang mengkonversi bahan baku menjadi energi dalam bentuk gas yang disebut sebagai *syngas* (Verdugo et al., 2018). Gasifikasi adalah sebuah proses mengubah padatan karbon menejadi gas yang mudah terbakar berupa campuran gas-gas karbondioksida, karbonmonoksida, metana dan hidrogen yang biasa disebut *syngas* atau *syngas*, dan pada akhirnya *syngas* ini bisa digunakan untuk menghasilkan energi (Tursun et al., 2019). *Syngas* ini dapat dimanfaatkan untuk bahan bakar, pembangkit listrik dan bahan baku untuk proses pembuatan bahan kimia pada industri. Komposisi gas yang dihasilkan dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis bahan baku, kondisi operasi, jenis *Gasifier* dan medium gasifikasi. Keberhasilan proses gasifikasi juga dinilai dari nilai kalor syngas yaitu *Lower Heating Value* (LHV) dan *High Heating Value* (HHV), Efisiensi proses beruba *Carbon Conversion Efficiency* (CCE) dan *Cold Gas Efficiency* (CGE), serta Kualitas komposisi gas berupa *Gas Combustible* (GC) dan *Non-Gas Combustible* (NGC) (Chew et al., 2020a). Umumnya proses gasifikasi bisa terjadi pada temperatur lebih rendah dari proses insinerasi, dalam prosesnya juga gasifikasi ini tidak membutuhkan oksigen yang banyak tetapi hanya membutuhkan

sebagian ataupun kondisi yang terbatas. Gasifikasi menghasilkan gas yang mempunyai nilai kalor yang tinggi.

Tahapan proses pada reaktor gasifikasi adalah sebagai berikut: tahapan pertama pemanasan yaitu naiknya temperatur padatan sebelum terjadi proses pengeringan, tahapan kedua pengeringan yaitu terjadinya pelepasan uap air dari padatan, tahapan ketiga pirolisis yaitu peretakan molekul besar menjadi molekul-molekul kecil akibat pengaruh temperatur tinggi, tahapan keempat adalah oksidasi atau pembakaran yaitu reaksi yang menyuplai panas untuk proses yang ada dalam reaktor gasifikasi (Materazzi et al., 2013). Kinerja gasifikasi menggunakan udara sangat tergantung pada suhu dan *equivalent ratio* (ER). Oksigen sering dipakai sebagai medium gasifikasi karena kemampuannya dalam menghasilkan gas bernilai kalor sedang dibandingkan dengan udara, dimana efisiensi konversi karbon dan kandungan H₂ dan CO yang lebih tinggi (Zheng et al., 2016). Oksigen sering dipadukan dengan *steam* sebagai medium gasifikasi (Ismail et al., 2020).

Nilai kalor TKKS adalah 3979 Kcal/Kg, sedangkan cangkang sawit berkisar 4299 Kcal/Kg, dimana kalori TKKS lebih (Najib et al., 2021). Nilai kalor pada bahan baku biomassa mempengaruhi nilai kalor *syngas* yang dihasilkan. Semakin tinggi nilai kalor maka kalor *syngas* yang dihasilkan akan semakin tinggi pula. Meskipun TKKS memiliki nilai kalor yang kecil daripada biomassa lainnya tetapi tandan kosong kelapa sawit memiliki kandungan *volatile matter* yang tinggi. Sehingga tandan kosong dan cangkang sawit dapat dikonversi menjadi *syngas* melalui metode gasifikasi.

Syngas dari hasil produksi gasifikasi masih mengandung CO₂ meskipun dalam jumlah sedikit sehingga tetap harus dipisahkan. Keberadaan CO₂ dalam *syngas* dapat menurunkan kualitas *syngas* yang diperoleh karena kemampuan bakar gas akan berkurang. Produk samping yang dihasilkan dari proses gasifikasi adalah Tar. Tar adalah cairan berwarna hitam kental yang bisa menurunkan nilai kalor *syngas* dan menyebabkan korosif sehingga merusak peralatan gasifikasi. Bahan baku biomassa lebih banyak menghasilkan senyawa tar dengan berat molekul yang sangat tinggi sehingga diperlukan proses reduksi. Jumlah tar yang dapat diterima tergantung pada penggunaan akhir bahan bakar gas. Tar sejauh ini dibuang ke lingkungan. Tar yang dibuang ke perairan dapat mencemari lingkungan dan

meracuni organisme perairan, sementara teknologi gasifikasi biomassa katalitik dengan penangkapan CO₂ in-situ dapat membantu mengurangi dampak tersebut dengan meningkatkan produksi hydrogen. Tar terdiri dari hidrokarbon berat sehingga apabila dibuang ke tanah akan mencemari tanah

Beberapa penelitian telah melakukan berbagai modifikasi untuk meningkatkan kualitas gas yang dihasilkan melalui proses gasifikasi. Modifikasi tersebut meliputi penambahan katalis dalam proses gasifikasi (Wang et al., 2020) (Zhou et al., 2019), Blending/pencampuran bahan baku lain (Cabuk et al., 2019), pemilihan dan modifikasi alat gasifikasi (Ngamchompoo et al., 2017)(Sazali et al., 2019), pemilihan medium gasifikasi (Shayan et al., 2018) dan pemurnian gas. Peningkatan kualitas *syngas* selain bertujuan untuk meningkatkan H₂ dan CO dalam gas, juga mengurangi produk samping yang terbentuk. Penggunaan katalis dalam proses gasifikasi dapat mempercepat laju reaksi dan menurunkan temperatur operasi, selain itu katalis juga berperan dalam mereaksikan kembali tar. Penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem gasifikasi katalitik untuk meningkatkan kualitas *syngas* yang dihasilkan dari konversi TKKS dan cangkang sawit.

Katalis merupakan zat yang dapat mempercepat laju reaksi kimia dengan tidak mengalami perubahan kimia, dengan cara menurunkan energi aktivasi. Katalis pada proses gasifikasi dapat mempercepat jalannya reaksi dimana laju reaksi dapat ditingkatkan, meningkatkan produksi gas serta volume total gas. Katalis dapat dibagi menjadi 2 golongan yaitu katalis homogen yaitu katalis yang larut dalam reaktan dan atau hasil reaksi contohnya NaOH, KOH, HCl dan H₂SO₄ dan katalis heterogen yaitu yang tidak larut dalam reaktan dan atau hasil reaksi contohnya MgO, SrO, Zeolit, Bentonit, ZNO, TiO₂, CaO.CaCO₃, Al₂O₃. Katalis yang dapat digunakan pada proses gasifikasi berasal dari jenis mineral dan sintetik. Beberapa penelitian yang mengaplikasikan katalis dari mineral yaitu dolomit, dalam beberapa kajian menunjukkan bahwa dolomit dapat mengeliminasi tar dari *syngas* serta dapat memperkaya gas hidrogen yang dihasilkan. (Varjani, 2022), Selain dolomit, olivin juga mineral yang dapat digunakan sebagai katalis. Berdasarkan hasil penelitian Tursun, dkk (2019) bahwa Olivin dapat mengurangi tar sebesar 55% (Tursun et al., 2019). Katalis lain yang mampu mereduksi tar dan meningkatkan kualitas *syngas* adalah golongan logam alkali seperti Na, K, Li dan Logam alkali (State et al., 2019),

selain dapat mereduksi tar juga mampu meningkatkan konversi karbon (Hu et al., 2018) tetapi temperatur operasi yang tinggi dapat menyumbat pipa penyalur gas sehingga dinilai tidak ekonomis (Huang et al., 2017). Katalis berbasis nikel merupakan salah satu katalis yang paling banyak digunakan. Penambahan katalis nikel dapat menyebabkan laju gasifikasi semakin meningkat, sehingga produksi gas juga meningkat (Lyubov et al., 2020). Katalis aluminosilikat yaitu katalis yang berasal dari bahan dasar alumina dan silica seperti bentonit, kaolinit, bauksit dan zeolit berada dalam jumlah yang besar di Indonesia (Murti et al., 2018). Penggunaan zeolit dan bentonit saat ini telah banyak diaplikasikan sebagai adsorben pada pengolahan limbah cair dan sebagai katalis pada berbagai macam konservasi energy yang secara luas digunakan sebagai adsorben pada pengolahan limbah cair (Yohana et al., 2022) dan katalis pada berbagai proses konversi energi. Kelebihan dari zeolit dan bentonit yaitu harganya yang relative murah serta ketersediaannya yang melimpah di Indonesia, bentonit dan zeolite mengandung Al_2O_3 dan SiO_2 (Ro et al., 2019). Al_2O_3 dan SiO_2 dapat meningkatkan yield gas dan dapat menghantarkan panas dengan baik (Kar, 2018). Bentonit digunakan sebagai katalis pada pirolisis dan biodiesel (Rabie et al., 2018).

Penelitian sebelumnya telah dilakukan yaitu proses gasifikasi TKKS pada temperatur 350 °C – 550 °C menggunakan katalis alam bentonit, yang diaktivasi secara termal pada temperatur 400 °C selama 3 jam, menghasilkan *syngas* dengan kadar H_2 27,74% mol, CO 20,43%mol pada temperatur 550 °C. Nilai kalor HHV dan LHV masing-masing 3,38-12,79MJ/Nm³ dan 3,03-12,58MJ/Nm³. Maximum *carbon conversian efficiency* (CCE) dan *coal gas effieciency* (CGE) masing-masing 85,49% dan 82,34% (Aprianti et al., 2021). Penelitian yang dilakukan oleh (M. Inayat et al., 2019), proses gasifikasi pada penelitian ini menggunakan limbah cangkang sawit yang ditambahkan dengan katalis *bottom Ash* dari batubara. Pengaruh variabel proses berupa suhu, katalis dan laju aliran udara. Hasil Analisa menunjukkan bahwa suhu dan katalis merupakan parameter yang dapat mempengaruhi peningkatan produksi H_2 dan CO, suhu optimal didapat pada 850 °C, dengan jumlah katalis 14,5%, laju aliran udara 2,5 l/menit didapat komposisi H_2 sebesar 31,38%, CO sebesar 26,44 %, CH_4 15,67% dan CO_2 sebesar 25,59%.

Capaian dari penelitian-penelitian sebelumnya belum optimal, terutama dalam hal rendahnya efisiensi konversi biomassa menjadi *syngas* berkualitas tinggi, tingginya kandungan tar, serta kurangnya stabilitas dan efektivitas katalis yang digunakan dalam proses gasifikasi. Beberapa studi menunjukkan bahwa penggunaan katalis konvensional, baik berupa zeolit maupun logam oksida biasa, belum mampu secara signifikan meningkatkan rasio H_2/CO serta menekan pembentukan tar dan CO_2 yang tidak diinginkan. Katalis tersebut juga cenderung memiliki umur pakai yang singkat dan mudah terdegradasi pada suhu tinggi.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan sebagai tindak lanjut dari permasalahan tersebut, dengan memfokuskan pada pengembangan katalis berbasis bentonit alam yang telah dimodifikasi melalui aktivasi dan pilarisasi logam, khususnya logam Al dan Fe. Bentonit sendiri merupakan tanah liat aluminosilikat berlapis yang memiliki kemampuan tukar kation tinggi dan sifat kimia yang relatif stabil, namun perlu dimodifikasi agar lebih efektif digunakan sebagai katalis gasifikasi. Proses pilarisasi dilakukan dengan menyisipkan kation logam ke dalam lapisan bentonit melalui proses ion exchange dan kalsinasi, sehingga menghasilkan struktur bentonit terpillar logam (*pillared interlayered clays/PICs*) yang memiliki porositas tinggi, luas permukaan besar, dan stabilitas termal yang baik. Struktur ini sangat ideal untuk meningkatkan reaktivitas katalis dalam memecah tar dan memperkaya kandungan H_2 dan CO dalam *syngas*.

Alasan pemilihan Al dan Fe sebagai agen pilarisasi adalah karena keduanya memiliki peran penting dalam meningkatkan kinerja katalis. Al dipilih karena dapat menambah jumlah situs asam Lewis di permukaan katalis. Situs ini berfungsi membantu memecah senyawa hidrokarbon kompleks, seperti tar, menjadi gas-gas ringan seperti H_2 dan CO. Selain itu, Al juga membantu menjaga kestabilan struktur katalis pada suhu tinggi. Sementara itu, Fe memiliki sifat redoks yang baik, sehingga aktif dalam reaksi *water-gas shift* yang mengubah CO dan H_2O menjadi CO_2 dan H_2 . Hal ini membantu meningkatkan kadar H_2 dalam *syngas*. Fe juga berperan dalam mempercepat penguraian tar dan memperkuat struktur katalis agar tetap stabil selama proses berlangsung.

Penelitian ini memanfaatkan limbah industri kelapa sawit berupa TKKS dan cangkang sawit, yang dikonversi menjadi *syngas* melalui proses gasifikasi katalitik.

Selanjutnya, *syngas* tersebut diperkaya dan dimurnikan untuk meningkatkan kandungan gas pembakar seperti H_2 , CO , dan CH_4 . Salah satu inovasi yang diterapkan dalam penelitian ini adalah penambahan media *Char* (arang karbon aktif) pada tahap pengkayaan. *Char* ini diperoleh dari residu gasifikasi sebelumnya, yang secara alami memiliki luas permukaan tinggi dan aktivitas adsorptif yang kuat. Ketika *syngas* dialirkan melalui reaktor yang berisi *Char*, beberapa reaksi tambahan terjadi, seperti reaksi Boudouard ($CO_2 + C \rightarrow 2CO$) dan reaksi gasifikasi uap ($C + H_2O \rightarrow CO + H_2$). Reaksi-reaksi ini tidak hanya membantu meningkatkan konsentrasi CO dan H_2 dalam *syngas*, tetapi juga berkontribusi terhadap penurunan kandungan tar dan CO_2 melalui mekanisme cracking dan reforming. Dengan demikian, penggunaan *Char* sebagai media pengkayaan berperan penting dalam meningkatkan kualitas *syngas* secara keseluruhan.

Pemanfaatan limbah biomassa kelapa sawit seperti TKKS dan cangkang sawit sebagai bahan baku energi terbarukan menjadi salah satu strategi penting dalam mendukung transisi energi bersih sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari sektor perkebunan. Kedua jenis biomassa ini memiliki karakteristik fisik dan kimia yang berbeda, sehingga penting untuk memahami pengaruh komposisinya terhadap kualitas gas hasil gasifikasi. Dalam pengembangan teknologi gasifikasi, pemanfaatan katalis turut berperan penting dalam meningkatkan efisiensi proses dan kualitas *syngas*. Salah satu pendekatan inovatif yang diusulkan dalam penelitian ini adalah penggunaan katalis berbasis bentonit yang diaktivasi dan dipilarisasi dengan logam Al dan Fe . Katalis ini diharapkan mampu menurunkan kandungan tar, meningkatkan fraksi gas bernilai tinggi seperti H_2 dan CH_4 , serta menurunkan emisi CO_2 . Untuk mengoptimalkan proses konversi biomassa menjadi energi, dirancang pula sistem gasifikasi terpadu yang dilengkapi dengan unit pengkayaan menggunakan penambahan *Char* dan pemurnian dengan larutan $Ca(OH)_2$. Rangkaian proses ini bertujuan menghasilkan *syngas* dengan kualitas lebih tinggi dan lebih bersih. Melalui tahapan yang mencakup karakterisasi bahan baku dan katalis, uji gasifikasi nonkatalitik maupun katalitik, serta integrasi proses pengkayaan dan pemurnian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi ilmiah dan teknologi dalam pengembangan energi terbarukan yang berkelanjutan serta mendukung upaya mitigasi perubahan iklim global.

1.2. Rumusan Masalah

Sumber energi fosil yang tidak dapat diperbarui mendorong pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi alternatif yang lebih berkelanjutan. Industri CPO di Indonesia menghasilkan limbah padat seperti TKKS dan cangkang sawit dalam jumlah besar yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku energi. Teknologi gasifikasi menjadi salah satu solusi untuk mengubah limbah biomassa tersebut menjadi *syngas*, yang selanjutnya dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif. Namun, kualitas *syngas* yang dihasilkan dari gasifikasi konvensional seringkali masih rendah dan mengandung tar dalam jumlah tinggi. Untuk mengatasi hal ini, digunakan katalis berbasis bentonit yang dipilarisasi dengan logam seperti Al dan Fe guna meningkatkan reaktivitas, menurunkan kandungan tar, dan memperbaiki komposisi *syngas*. Selain itu, pengembangan sistem gasifikasi terpadu yang mencakup proses pengkayaan dengan penambahan *Char* dan pemurnian dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ menjadi strategi penting untuk menghasilkan *syngas* berkualitas tinggi dan rendah emisi

Berdasarkan uraian tersebut maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Apa karakteristik bahan baku TKKS dan cangkang sawit?
2. Apa karakteristik katalis berbahan baku bentonit yang diaktivasi dan terpillarisasi?
3. Bagaimana desain alat modifikasi gasifikasi yang dirancang dengan system terpadu untuk proses pengkayaan dan pemurnian *syngas*?
4. Bagaimana performa gasifikasi nonkatalitik tanpa agen eksternal terhadap pembentukan *syngas* dari TKKS dan cangkang sawit pada berbagai temperatur?
5. Bagaimana pengaruh komposisi TKKS dan cangkang sawit terhadap kualitas *syngas* pada gasifikasi nonkatalitik dengan medium eksternal?
6. Bagaimana kualitas *syngas* dari gasifikasi katalitik campuran TKKS dan cangkang sawit, serta pengaruh penambahan *Char* dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pada proses pengkayaan dan pemurniannya?

1.3. Maksud atau Tujuan Penelitian

Secara umum penelitian bertujuan untuk memanfaatkan limbah TKKS dan cangkang sawit menjadi *syngas* melalui proses gasifikasi katalitik, mensintesis dan karakteristik katalis berbahan baku bentonit yang diaktivasi dan terpilarkan oleh logam. Tujuan khusus penelitian sebagai berikut.

1. Mengetahui karakteristik bahan baku TKKS dan cangkang sawit sebagai sumber biomassa.
2. Menganalisis karakteristik katalis berbahan dasar bentonit yang telah diaktivasi dan dipilarisasi logam.
3. Merancang alat gasifikasi dengan sistem terpadu yang mencakup proses pengkayaan dan pemurnian *syngas*.
4. Mengevaluasi kemampuan TKKS dan cangkang sawit dalam menghasilkan *syngas* melalui proses gasifikasi nonkatalitik tanpa agen eksternal.
5. Menganalisis pengaruh variasi komposisi campuran TKKS dan cangkang sawit terhadap kualitas *syngas* pada proses gasifikasi nonkatalitik dengan medium eksternal.
6. Menilai kualitas *syngas* dari proses gasifikasi katalitik campuran TKKS dan cangkang sawit, serta dampak penambahan *Char* dan Ca(OH)_2 pada tahapan pengkayaan dan pemurnian.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menghasilkan upaya terpadu dalam percepatan pengurangan pencemaran lingkungan melalui pemanfaatan limbah TKKS dan cangkang sawit sebagai sumber energi alternatif.
2. Memperoleh perbaikan teknologi gasifikasi katalitik untuk meningkatkan efisiensi konversi TKKS dan cangkang sawit.
3. Menghasilkan *syngas* yang bersih dan berkualitas tinggi dengan kandungan H_2 , CO , dan CH_4 yang optimal serta kandungan CO_2 yang minimal

1.5. Hipotesis Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang telah terurai, maka hipotesis penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Peningkatan produksi *syngas* melalui pencampuran TKKS dan cangkang sawit dalam proses gasifikasi.

Cangkang sawit memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan TKKS. Karena nilai kalor bahan baku berpengaruh terhadap kualitas dan kandungan energi *syngas* yang dihasilkan, maka pencampuran TKKS dan cangkang sawit dalam proses gasifikasi diharapkan dapat meningkatkan volume dan nilai kalor *syngas* secara keseluruhan.

2. Peningkatan komposisi gas pembakar melalui penggunaan katalis bentonit terpillar logam Al dan Fe.

Modifikasi bentonit melalui pilarisasi dengan logam Al dan Fe dapat membentuk struktur pori yang lebih teratur dan stabil. Hal ini diharapkan mampu meningkatkan aktivitas katalitik dalam reaksi gasifikasi, sehingga memperkaya kandungan gas pembakar seperti H_2 , CO, dan CH_4 dalam *syngas*.

3. Peningkatan kadar CO dan H_2 dan penurunan kadar CO_2 dalam *syngas* melalui proses pengayaan menggunakan media *Char*.

Char yang digunakan sebagai media kontak tambahan setelah proses gasifikasi berperan dalam memperkaya *syngas* melalui reaksi sekunder, seperti reaksi Boudouard dan reaksi gasifikasi uap. Reaksi ini dapat meningkatkan kandungan CO dan H_2 , sekaligus menurunkan kadar tar dan CO_2 dalam *syngas*.

4. Penurunan kadar CO_2 dalam *syngas* melalui proses pemurnian menggunakan larutan kapur (CaO).

Larutan kapur yang digunakan sebagai absorbent memiliki kemampuan tinggi dalam menangkap CO_2 melalui reaksi kimia pembentukan kalsium karbonat ($CaCO_3$). Proses ini diharapkan dapat menurunkan kandungan CO_2 dalam *syngas* secara signifikan, sehingga meningkatkan kemurnian dan kualitas gas hasil akhir.

1.6. Penelitian terdahulu

Pada penelitian ini digunakan beberapa penelitian terdahulu sebagai *state of art* dan merupakan panduan penelitian yang dilakukan sehingga menjadi acuan dan perbandingan dalam melakukan penelitian ini. Beberapa penelitian terdahulu yang relevan dalam penelitian antara lain.

Penelitian oleh (Burgos et al., 2021) berjudul “*Hydrogen -rich syngas production from palm kernel shells (PKS) biomass on a downdraft allothermal Gasifier using steam as a gasifying agent*”. Penelitian ini memproduksi syngas melalui proses gasifikasi dengan bahan baku limbah cangkang sawit. Jenis *Gasifier* yang digunakan adalah *downdraft allothermal Gasifier* menggunakan medium uap. Factor -faktor yang mempengaruhi pada penelitian ini adalah karakterisasi bahan baku, rancangan *Gasifier*, medium, kondisi operasi, dan evaluasi metodologi operasi. Proses gasifikasi berjalan pada suhu antara 800 °C dan 950 °C dan rasio massa uap-biomassa antara 0,2 dan 1,2. Hasil analisa didapat temperatur gasifikasi maksimum dicapai pada 850 °C, pada rasio uap/biomassa 0.85 dengan ukuran partikel cangkang sawit adalah 2–3 mm, dan umpan biomassa 57,1 kg/jam didapat persen volume $H_2 + CO$ mencapai 80,4%, dan efisiensi gas dingin (CGE) maksimum sebesar 80% dengan rata-rata nilai kalor sebesar.

Inayat, A., et al (2020) melakukan penelitian berjudul “*Parametric analysis and optimization for the catalytic air gasification of palm kernel shell using coal bottom Ash as catalyst*”. Pada penelitian ini cangkang sawit dikonversi menjadi syngas dalam *fixed bed Gasifier* dengan medium gasifikasi adalah udara. Metode yang digunakan adalah gasifikasi katalitik dimana bottom ash Batubara sebagai katalis. Variabel bebas berupa suhu, katalis dan laju alir udara yang akan mempengaruhi komposisi gas yang dihasilkan. Perancangan percobaan dilakukan menggunakan *Design Expert v11®* dengan pendekatan *Central Composite Design*. Hasil Analisa menunjukkan bahwa suhu merupakan parameter yang paling mempengaruhi produksi H_2 dan CO . Sedangkan laju aliran udara mempengaruhi produksi CH_4 dan CO_2 . Penambahan katalis menunjukkan adanya peningkatan jumlah gas H_2 dan CO serta mengurangi jumlah CO_2 dan CH_4 yang dihasilkan. Parameter optimal didapatkan pada suhu 850 °C dengan Penambahan katalis 14,50 %wt dan laju alir udara 2,50 l/menit dengan komposisi H_2 sebesar 31,38 %vol, CO

sebesar 26,44 %vol, CH₄ sebesar 15,67 %vol, dan CO₂ sebesar 25,59 %vol (A. Inayat et al., 2020).

Penelitian sebelumnya tentang “*Catalytic gasification of oil palm empty fruit bunch by using Indonesian bentonit as the catalyst*”. Penelitian ini mengubah TKKS menjadi *syngas* melalui proses gasifikasi menggunakan bentonit sebagai katalis. Faktor -faktor yang berpengaruh berupa suhu dan katalis yang akan mempengaruhi *syngas* yang dihasilkan. Proses ini menggunakan *Gasifier updraft* pada suhu 350-550 °C dan udara sebagai media gasifikasi (ER 0.2). Kinerja dan efisiensi *syngas* dalam proses gasifikasi ditentukan dengan menentukan nilai kalor (HHV dan LHV), CCE, CGE, dan rasio *GC/NGC*. Hasil analisa menunjukkan bahwa *syngas* dapat dihasilkan oleh *Gasifier updraft*. H₂ dan CO meningkat ketika suhu naik. Kandungan H₂ dan CO tertinggi sebesar 27,74% dan 20,43% diperoleh pada suhu 550°C dengan penambahan katalis bentonit. Nilai kalor HHV dan LHV masing-masing sebesar 3,38~12,79 MJ/Nm³ dan 3,03~11,58 MJ/Nm³. %CCE dan %CGE maksimum mencapai 85,49% dan 82,34%. Penambahan bentonit sebagai katalis mampu meningkatkan %komposisi gas khususnya H₂ dan CO serta nilai kalor *syngas* (Aprianti et al., 2021).

Penelitian tentang “*Integrated adsorption steam gasification for enhanced hydrogen production from palm waste at bench scale plant oleh Inayat*” A., et al (2020). Penelitian ini mengkonversi tandan kosong kelapa sawit menjadi *syngas* melalui proses gasifikasi katalitik dimana *steam* sebagai medium, zeolite sebagai katalis dan CaO sebagai adsorbent. Type *Gasifier* adalah *fluidized bed*. CO₂ yang terbentuk dari proses pembakaran akan ditangkap oleh Ca(OH)₂. Parameter penelitian berupa suhu, uap terhadap biomassa, dan rasio sorbent terhadap biomassa. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan volume H₂ dan CO setelah penambahan adsorbent CaO pada suhu antara 873–973 °K yaitu 60,4 %vol ke 75%vol dan 2.19 ke 4.69 %vol (Inayat et al., 2021). Monir et al (2020) dalam penelitiannya yang berjudul “*Enhanced Hydrogen Generation from Empty Fruit Bunches by Charcoal Addition into a Downdraft Gasifier*”. Penelitian ini memproduksi hydrogen dengan bahan baku utama TKKS yang ditingkatkan dengan penambahan limbah Batubara/*Charcoal*. Proses gasifikasi menggunakan *downdraft Gasifier* dengan skala kecil. Parameter analisa berupa nilai kalor, komposisi gas

yang dihasilkan dan efisiensi exergy. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan kandungan volume H_2 dari 8,55 menjadi 9,33% akibat adanya penambahan *Charcoal* pada rasio TKKS : *Charcoal* adalah 70 : 30% (Monir et al., 2020).

Penelitian tentang “*Analysis of syngas production rate in empty fruit bunch steam gasification with varying control factors*”. Pada penelitian ini tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan baku produksi *syngas* melalui proses gasifikasi dengan medium *steam*. *Gasifier* type fix bed digunakan dalam mengkonversi limbah biomassa. gasifikasi menggunakan bahan baku tandan kosong kelapa sawit dengan medium berupa *steam steam* dan *fixed bed Gasifier*. Variabel bebas berupa temperatur gasifikasi yang berpengaruh terhadap komposisi *syngas* yang dihasilkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa temperatur gasifikasi mempengaruhi komposisi *syngas* yang terbentuk secara signifikan. Rasio H_2/CO meningkat hampir 50% dengan peningkatan temperatur dari 680 ke 780 °C. Rasio H_2/CO yang lebih tinggi pada temperatur yang lebih rendah meningkatkan densitas energi (Liu et al., 2018).

1.7. Kebaharuan Penelitian

Berdasarkan kajian pustaka, penelitian terdahulu umumnya berfokus pada gasifikasi TKKS atau cangkang sawit secara terpisah, serta penggunaan katalis bentonit tanpa modifikasi lanjutan. Selain itu, sistem gasifikasi yang terintegrasi dengan proses pengkayaan dan pemurnian gas belum banyak dikembangkan secara komprehensif, khususnya untuk bahan baku campuran TKKS dan cangkang sawit. Oleh karena itu, kebaruan dalam penelitian ini meliputi:

1. Kombinasi bahan baku TKKS dan cangkang sawit dalam proses gasifikasi nonkatalitik dan katalitik

Penelitian ini mengeksplorasi potensi sinergis dari karakteristik TKKS yang reaktif dan kandungan lignoselulosa tinggi pada cangkang sawit. Kombinasi ini digunakan dalam variasi rasio tertentu untuk mengevaluasi pengaruh komposisi terhadap kualitas *syngas*, termasuk nilai kalor dan kandungan gas pembakar. Pendekatan ini berbeda dari penelitian sebelumnya yang umumnya menggunakan satu jenis biomassa.

2. Inovasi sintesis katalis bentonit melalui aktivasi dan pilarisasi logam Al dan Fe

Pengembangan katalis dilakukan dengan kombinasi aktivasi dan pilarisasi menggunakan logam aluminium (Al) dan besi (Fe). Modifikasi ini ditujukan untuk meningkatkan luas permukaan, kestabilan termal, dan penciptaan pori aktif, sehingga mampu meningkatkan efisiensi dan selektivitas reaksi pembentukan syngas. Berbeda dari penelitian sebelumnya yang hanya menggunakan aktivasi termal atau asam, pendekatan ini diharapkan menghasilkan katalis yang lebih aktif dan tahan lama.

3. Integrasi proses gasifikasi katalitik dengan pengkayaan karbon dan pemurnian CO₂ secara terpadu

Sistem gasifikasi yang dikembangkan dalam penelitian ini mengintegrasikan tiga tahapan utama secara terpadu, yaitu proses gasifikasi biomassa, pengkayaan kandungan karbon monoksida (CO) melalui reaksi Boudouard di unit *Char*, serta pemurnian gas menggunakan larutan kalsium hidroksida (Ca(OH)₂) untuk menurunkan kadar karbon dioksida (CO₂). Integrasi proses ini belum banyak diterapkan secara komprehensif, terutama untuk bahan baku campuran TKKS dan cangkang sawit. Pendekatan ini diharapkan mampu menghasilkan *syngas* berkualitas tinggi dengan kandungan CO dan hidrogen (H₂) yang lebih besar serta kandungan CO₂ yang lebih rendah secara simultan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abduh, P. M., Jahim, J. M., Harun, S., Markom, M., & Lutpi, N. A. (2016). Effects of changes in chemical and structural characteristic of ammonia fibre expansion (AFEX) pretreated oil palm empty fruit bunch fibre on enzymatic saccharification and fermentability for biohydrogen. *Bioresource Technology*.
- Abdul Malek, A. B. M., Hasanuzzaman, M., Rahim, N. A., & Al-Turki, Y. A. (2021). Energy, economic, and environmental analysis of 10-MW biomass gasification based power generation in Malaysia. *Energy and Environment*, 32(2), 295–337. <https://doi.org/10.1177/0958305X20930386>
- Abdullah, M. A., Nazir, M. S., Hussein, H. A., Shah, S. M. U., Azra, N., Iftikhar, R., Iqbal, M. S., Qamar, Z., Ahmad, Z., Afzaal, M., Om, A. D., Shaharah, M. I., Rak, A. E., & Hung, Y. T. (2024). New perspectives on biomass conversion and circular economy based on Integrated Algal-Oil Palm Biorefinery framework for sustainable energy and bioproducts co-generation. In *Industrial Crops and Products* (Vol. 213). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118452>
- Afraz, M., Muhammad, F., Nisar, J., Shah, A., Munir, S., Ali, G., & Ahmad, A. (2024). Production of value added products from biomass waste by pyrolysis: An updated review. *Waste Management Bulletin*, 1(4), 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.08.004>
- Ahmadi, A., Foroutan, R., Esmaeili, H., & Tamjidi, S. (2020). The role of bentonite clay and bentonite clay@MnFe₂O₄ composite and their physico-chemical properties on the removal of Cr(III) and Cr(VI) from aqueous media. *Environmental Science and Pollution Research*, Vi. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07756-x>
- Alexander, J. A., Ahmad Zaini, M. A., Surajudeen, A., Aliyu, E. N. U., & Omeiza, A. U. (2019). Surface modification of low-cost bentonite adsorbents—A review. *Particulate Science and Technology*, 37(5), 534–545. <https://doi.org/10.1080/02726351.2018.1438548>
- Alptekin, F. M., & Celiktaş, M. S. (2022). Review on Catalytic Biomass Gasification for Hydrogen Production as a Sustainable Energy Form and Social, Technological, Economic, Environmental, and Political Analysis of Catalysts. In *ACS Omega* (Vol. 7, Issue 29, pp. 24918–24941). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01538>
- Andican, A., Faizal, M., Said, M., & Aprianti, N. (2022a). Synthetic Gas Production from Fine Coal Gasification Using Low-Cost Catalyst. *Journal of Ecological Engineering*, 23(5), 64–72. <https://doi.org/10.12911/22998993/146766>

- Andican, A., Faizal, M., Said, M., & Aprianti, N. (2022b). Synthetic Gas Production from Fine Coal Gasification Using Low-Cost Catalyst. *Journal of Ecological Engineering*, 23(5), 64–72. <https://doi.org/10.12911/22998993/146766>
- Andreozzi, A., Iasiello, M., & Tucci, C. (2021). Numerical investigation of a phase change material including natural convection effects. *Energies*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/en14020348>
- Andrini, L., Moreira Toja, R., Gauna, M. R., Conconi, M. S., Requejo, F. G., & Rendtorff, N. M. (2017). Extended and local structural characterization of a natural and 800 °C fired Na-montmorillonite–Patagonian bentonite by XRD and Al/Si XANES. *Applied Clay Science*, 137, 233–240. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.12.030>
- Antolini, D., Piazzzi, S., Menin, L., Baratieri, M., & Patuzzi, F. (2022). High hydrogen content syngas for biofuels production from biomass air gasification: Experimental evaluation of a char-catalyzed steam reforming unit. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(64), 27421–27436. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.075>
- Anyaocha, K. E., Sakrabani, R., Patchigolla, K., & Mouazen, A. M. (2018). Critical evaluation of oil palm fresh fruit bunch solid wastes as soil amendments: Prospects and challenges. *Resources Conservation and Recycling*, 136(2).
- Aprianti, N., Faizal, M., Said, M., & Nasir, S. (2020a). Valorization of palm empty fruit bunch waste for syngas production through gasification. *Journal of Ecological Engineering*, 21(7), 17–26. <https://doi.org/10.12911/22998993/125461>
- Aprianti, N., Faizal, M., Said, M., & Nasir, S. (2020b). Valorization of palm empty fruit bunch waste for syngas production through gasification. *Journal of Ecological Engineering*, 21(7), 17–26. <https://doi.org/10.12911/22998993/125461>
- Aprianti, N., Faizal, M., Said, M., & Nasir, S. (2021a). Catalytic Gasification Of Oil Palm Empty Fruit Bunch By Using Indonesian Bentonite As The Catalyst. *Journal of Applied Engineering Science*, 19(2), 334–343. <https://doi.org/10.5937/jaes0-28781>
- Aprianti, N., Faizal, M., Said, M., & Nasir, S. (2021b). Catalytic Gasification Of Oil Palm Empty Fruit Bunch By Using Indonesian Bentonite As The Catalyst. *Journal of Applied Engineering Science*, 19(2), 334–343. <https://doi.org/10.5937/jaes0-28781>
- Attar, K., Bouazza, D., Miloudi, H., Tayeb, A., Boos, A., Sastre, A. M., & Demey, H. (2018). Cadmium removal by a low-cost magadiite-based material: Characterization and sorption applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 5351–5360.

- Azhar, M., & Satriawan, D. A. (2018). Implementasi Kebijakan Energi Baru dan Energi Terbarukan Dalam Rangka Ketahanan Energi Nasional. *Administrative Law and Governance Journal*, 1(4), 398–412. <https://doi.org/10.14710/alj.v1i4.398-412>
- Bakalár, T., Kaňuchová, M., Girová, A., Pavolová, H., Hromada, R., & Hajduová, Z. (2020). Characterization of Fe(III) adsorption onto zeolite and bentonite. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(16), 1–13. <https://doi.org/10.3390/ijerph17165718>
- Barco-Burgos, J., Carles-Bruno, J., Eicker, U., Saldana-Robles, A. L., & Alcantar-Camarena, V. (2021). Hydrogen-rich syngas production from palm kernel shells (PKS) biomass on a downdraft allothermal gasifier using steam as a gasifying agent. *Energy Conversion and Management*, 245.
- Berhe, M. T., Berhe, G. G., Cheru, M. S., & Weldehans, M. G. (2024). Characterization of Acid Activation of Bentonite Clay of Hadar, Afar, Ethiopia. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/6413786>
- Binte Mohamed, D. K., Veksha, A., Ha, Q. L. M., Chan, W. P., Lim, T. T., & Lisak, G. (2022). Advanced Ni tar reforming catalysts resistant to syngas impurities: Current knowledge, research gaps and future prospects. *Fuel*, 318. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123602>
- Budiarto, A. W., & Surjosatyo, A. (2021). Indonesia's Road to Fulfill National Renewable Energy Plan Target in 2025 and 2050: Current Progress, Challenges, and Management Recommendations - A Small Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 940(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/940/1/012032>
- Burdyny, T., & Smith, W. A. (2019). CO₂ reduction on gas-diffusion electrodes and why catalytic performance must be assessed at commercially-relevant conditions. *Energy and Environmental Science*, 12(5), 1442–1453. <https://doi.org/10.1039/c8ee03134g>
- Burgos, J. B., Bruno, J. C., Saldaña-Robles, A., & Alcántar-Camarena, V. (2021). Hydrogen-rich syngas production from palm kernel shells (PKS) biomass on a downdraft allothermal gasifier using steam as a gasifying agent. *Energy Conversion and Management*, 245(October). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114592>
- Cabuk, B., Duman, G., Yanik, J., & Olgun, H. (2019). Article Effect of fuel blend composition on hydrogen yield in co-gasification of coal and non-woody biomass. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(5).
- Caspi, R., Billington, R., Keseler, I. M., Kothari, A., Krummenacker, M., Midford, P. E., Ong, W. K., Paley, S., Subhraveti, P., & Karp, P. D. (2020). The

- MetaCyc database of metabolic pathways and enzymes-a 2019 update. *Nucleic Acids Research*, 48(D1), D455–D453. <https://doi.org/10.1093/nar/gkz862>
- Chang, S. H. (2018). Bio-oil derived from palm empty fruit bunches : fast pyrolysis, liquefaction and future prospects. *Biomass and Bioenergy*, 119, 263–276.
- Chen, W., Zhang, M., & Xu, R. (2022). Thermochemical Conversion of Biomass: Proximate and Ultimate Analyses. *Journal of Cleaner Production*, 345(131045).
- Chew, J. J., Soh, M., Sunarso, J., Yong, S. T., Doshi, V., & Bhattacharya, S. (2020a). Gasification of torrefied oil palm biomass in a fixed-bed reactor: effects of gasifying agents on product characteristics. *Journal of the Energy Institute*, 93(2), 711–722.
- Chew, J. J., Soh, M., Sunarso, J., Yong, S. T., Doshi, V., & Bhattacharya, S. (2020b). Gasification of torrefied oil palm biomass in a fixed-bed reactor: effects of gasifying agents on product characteristics. *Journal of the Energy Institute*, 93(2), 711–722.
- Chuayjumnong, S., Karrila, S., Jumrat, S., & Pianroj, Y. (2020). Activated carbon and palm oil fuel ash as microwave absorbers for microwave-assisted pyrolysis of oil palm shell waste. *RSC Advances*, 10(53), 32058–32068. <https://doi.org/10.1039/d0ra04966b>
- Cortazar, M., Santamaria, L., Lopez, G., Alvarez, J., Zhang, L., Wang, R., Bi, X., & Olazar, M. (2023). A comprehensive review of primary strategies for tar removal in biomass gasification. In *Energy Conversion and Management* (Vol. 276). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116496>
- Crespo, E., Martín, D. A., & Costafreda, J. L. (2024). Bentonite Clays Related to Volcanosedimentary Formations in Southeastern Spain: Mineralogical, Chemical and Pozzolanic Characteristics. *Minerals*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/min14080814>
- Cuevas, J., Cabrera, M. Á., Fernández, C., Mota-Heredia, C., Fernández, R., Torres, E., Turrero, M. J., & Ruiz, A. I. (2022). Bentonite Powder XRD Quantitative Analysis Using Rietveld Refinement: Revisiting and Updating Bulk Semiquantitative Mineralogical Compositions. *Minerals*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/min12060772>
- de Freitas, E. N., Salgado, J. C. S., Alnoch, R. C., Contato, A. G., Habermann, E., Michelin, M., Martínez, C. A., & Polizeli, M. de L. T. M. (2021). Challenges of biomass utilization for bioenergy in a climate change scenario. In *Biology* (Vol. 10, Issue 12). MDPI. <https://doi.org/10.3390/biology10121277>
- de Oliveira, R. L., Claudino, E. de S., Converti, A., & Porto, T. S. (2021). Use of a sequential fermentation method for the production of *aspergillus tamarii*

- urm4634 protease and a kinetic/thermodynamic study of the enzyme. *Catalysts*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/catal11080963>
- Dechapanya, W., Rattanahirun, S., & Khamwichit, A. (2020). Syngas Production From Palm Kernel Shells With Enhanced Tar Removal Using Biochar From Agricultural Residues†. *Frontiers in Energy Research*, 8. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00157>
- Detchusananard, T., Im-orb, K., Ponpesh, P., & Arpornwichanop, A. (2018). Biomass gasification integrated with CO₂ capture processes for high-purity hydrogen production: Process performance and energy analysis. *Energy Conversion and Management*, 171, 1560–1572. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.072>
- Dirgantara, M., Karelius, Cahyana, B. T., Suastika, K. G., & Akbar, A. R. M. (2020). Effect of Temperature and Residence Time Torrefaction Palm Kernel Shell on the Calorific Value and Energy Yield. *Journal of Physics: Conference Series*, 1428(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1428/1/012010>
- Dolah, R., Karnik, R., & Hamdan, H. (2021). A comprehensive review on biofuels from oil palm empty bunch (Efb): Current status, potential, barriers and way forward. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 18). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su131810210>
- Donghoon Ro, Shafaghat, H., Jang, S.-H., Lee, H. W., Jung, S.-C., Jae, J., Cha, J. S., & Park, Y.-K. (2019). Production of an upgraded lignin-derived bio-oil using the clay catalysts of bentonite and olivine and the spent FCC in a bench-scale fixed bed pyrolyzer. *Environmental Research*, 172, 658–664.
- Dub, P. A., & Gordon, J. C. (2018). The role of the metal-bound N–H functionality in Noyori-type molecular catalysts. *Nature Reviews Chemistry*, 2(12), 396–408. <https://doi.org/10.1038/s41570-018-0049-z>
- Elfadly, A. M., Zeid, I. F., Yehia, F. Z., Abouelela, M. M., & Rabie, A. M. (2017). Production of aromatic hydrocarbons from catalytic pyrolysis of lignin over acid-activated bentonite clay. *Fuel Processing Technology*, 163, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.03.033>
- El-Sayed, S. A., Mostafa, M. E., Khass, T. M., Noseir, E. H., & Ismail, M. A. (2024). Combustion and mass loss behavior and characteristics of a single biomass pellet positioning at different orientations in a fixed bed reactor. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(14), 15373–15393. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-03767-z>
- Ereña, J. (2020). Catalysts for syngas production. In *Catalysts* (Vol. 10, Issue 6, pp. 1–3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/catal10060657>

- Eteruddin, H., Ridwan, M., Monice, Zulfahri, Arief, yanuar Z., & Hasanti, F. (2021). Coal Fuel Efficiency with Mixed Palm Shell Biomass for Steam Power Plant. *5th IEEE Conference on Energy Conversion, CENCON 2021*, 148–153.
- Faizal, M., Aprianti, N., Said, M., & Nasir, S. (2021). Syngas Derived From Catalytic Gasification Of Fine Coal Waste Using Indonesian Potential Catalyst. *Journal of Applied Engineering Science*, 19(4), 934–941. <https://doi.org/10.5937/jaes0-30990>
- Faizal, M., Said, M., Nurisman, E., & Aprianti, N. (2021). Purification of Synthetic Gas from Fine Coal Waste Gasification as a Clean Fuel. *Journal of Ecological Engineering*, 22(5), 114–120. <https://doi.org/10.12911/22998993/135862>
- Fajimi, L. I., Oboirien, B. O., & Adams, T. A. (2021). Simulation studies on the co-production of syngas and activated carbon from waste tyre gasification using different reactor configurations. *Energy Conversion and Management: X*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100105>
- Felix, C. B., Chen, W.-H., Ubando, A. T., Park, Y.-K., Lin, K.-Y. A., Nguyen, T.-B., & Dong, C.-D. (2022). A comprehensive review of thermogravimetric analysis (TGA) in lignocellulosic and algal biomass gasification. *Chemical Engineering Journal*, 445, 1367304. <https://ssrn.com/abstract=4042456>
- Fernandes, J. V., Rodrigues, A. M., Menezes, R. R., & de Araújo Neves, G. (2020). Adsorption of anionic dye on the acid-functionalized bentonite. *Materials*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/MA13163600>
- Frilund, C., Tuomi, S., Kurkela, E., & Simell, P. (2021). Small- to medium-scale deep syngas purification: Biomass-to-liquids multi-contaminant removal demonstration. *Biomass and Bioenergy*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106031>
- Gandhi, D., Bandyopadhyay, R., & Soni, B. (2022). Naturally occurring bentonite clay: Structural augmentation, characterization and application as catalyst. *Materials Today: Proceedings*, 57, 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.346>
- Gao, H., Wen, Z., Jin, L., Xiong, X., & Zhu, Y. (2022). Gasification Characteristics of High Moisture Content Lignite under CO₂ and Auto-Generated Steam Atmosphere in a Moving Bed Tubular Reactor. *Energies*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/en15186751>
- Ghafar, H., Zailani, R., Nur Amalina Mohd Halidi, S., Sufian Abdullah, A., Ghafar, H., Zailani, R., HamidPahmi, Maa., Halidi, S., Suffian Abdullah, A., Farhan Mohd Yamin, A., & Alam, S. (2017). *Thermogravimetric analysis of palm shell solid waste*. <https://www.researchgate.net/publication/319335483>

- Glinwong, T., & Wongchang, T. (2017). Syngas production from biomass by linear heart gasifier. *Energy Procedia*, 138, 762–765. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.220>
- Guo, S., Zhang, Y., & Liu, L. (2024). Sorption enhanced steam reforming of biomass-based feedstocks: Towards sustainable hydrogen evolution. *Chemical Engineering Journal*, 485, 149760.
- Halim, N. H. A., Saleh, S., & Samad, N. A. F. A. (2019). Effect of gasification temperature on synthesis gas production and gasification performance for raw and torrefied palm mesocarp fibre. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 19(2), 120–129. <https://doi.org/10.22146/ajche.51873>
- Handaya, Marimin, Indrawan, D., & Susanto, H. (2022). A Comparative Life Cycle Assessment of Palm Kernel Shell in Ceramic Tile Production: Managerial Implications for Renewable Energy Usage. *Sustainability (Switzerland)*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/su141610100>
- Hardianto, T., Wenas, A. A., & Juangsa, F. B. (2023a). Upgrading process of palm empty fruit bunches as alternative solid fuel: a review. In *Clean Energy* (Vol. 7, Issue 6, pp. 1173–1188). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/ce/zkad059>
- Hardianto, T., Wenas, A. A., & Juangsa, F. B. (2023b). Upgrading process of palm empty fruit bunches as alternative solid fuel: a review. In *Clean Energy* (Vol. 7, Issue 6, pp. 1173–1188). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/ce/zkad059>
- Hassan, Q., Hafedh, S. A., Mohammed, H. B., Abdulrahman, I. S., Salman, H. M., & Jaszczur, M. (2024). A review of hydrogen production from bio-energy, technologies and assessments. In *Energy Harvesting and Systems* (Vol. 11, Issue 1). Walter de Gruyter GmbH. <https://doi.org/10.1515/ehs-2022-0117>
- Havilah, P. R., Sharma, A. K., Govindasamy, G., Matsakas, L., & Patel, A. (2022). Biomass Gasification in Downdraft Gasifiers: A Technical Review on Production, Up-Gradation and Application of Synthesis Gas. In *Energies* (Vol. 15, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en15113938>
- Heriyanto, H., Nahudin, A., Amyranti, M., Firdaus, A., Suhendi, E., & Kosimaningrum, W. E. (2020). Syngas Production by the Gasification of Bayah's Coal over Ca(OH)₂ and Na₂CO₃ catalyst ARTICLE HISTORY ABSTRACT. In *World Chemical Engineering Journal* (Vol. 4, Issue 1). <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/WCEJ>
- Hmeid, H. A., Akodad, M., Aalaoul, M., Baghour, M., Moumen, A., Skalli, A., Anjjar, A., Conti, P., Sfalanga, A., Ryazi Khyabani, F., Minucci, S., & Daoudi, L. (2021). Clay mineralogy, chemical and geotechnical characterization of bentonite from beni bou ifrou massif (The eastern rif, Morocco). *Geological*

- Society Special Publication*, 502(1), 31–44. <https://doi.org/10.1144/SP502-2019-25>
- Hu, M., Laghari, M., Cui, B., Xiao, B., Zhang, B., & Guo, D. (2018). Catalytic cracking of biomass tar over char supported nickel catalyst. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.096>
- Huang, J., Lian, X., Wang, L., Zhu, C., Jin, H., & Wang, R. (2017). Hydrogen production from glucose by supercritical water gasification with Ni/Zr(Ce,Y)O_{2-δ} catalysts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(7), 4613–4625.
- Hudayarizka, R., Wulandari, A., Ariani, I. K., & Yorika, R. (2024). Analisis Variasi Ukuran Partikel Biomassa Cangkang Kelapa Sawit dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) terhadap Karakteristik Refuse Derived-Fuel (RDF). *SPECTA Journal of Technology*, 8(3), 210–222. <https://doi.org/10.35718/specta.v8i3.1212>
- Ibgbami, T. B., Adeola, A. O., Olawade, D. B., Ore, O. T., Isaac, B. O., & Sunkanmi, A. A. (2022a). Pristine and activated bentonite for toxic metal removal from wastewater. *Water Practice and Technology*, 17(3), 784–797. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.018>
- Ibgbami, T. B., Adeola, A. O., Olawade, D. B., Ore, O. T., Isaac, B. O., & Sunkanmi, A. A. (2022b). Pristine and activated bentonite for toxic metal removal from wastewater. *Water Practice and Technology*, 17(3), 784–797. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.018>
- Ikubanni, P. P., Oki, M., Adeleke, A. A., Adediran, A. A., & Adesina, O. S. (2020). Influence of temperature on the chemical compositions and microstructural changes of ash formed from palm kernel shell. *Results in Engineering*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100173>
- Inayat, A., Inayat, M., Shahbaz, M., Sulaiman, S. A., Raza, M., & Yusup, S. (2020). Parametric analysis and optimization for the catalytic air gasification of palm kernel shell using coal bottom ash as catalyst. *Renewable Energy*, 145, 671–681.
- Inayat, A., Khan, Z., Aslam, M., Shahbaz, M., Ahmad, M. M., Mutalib, M. I. A., & Yusup, S. (2021). Integrated adsorption steam gasification for enhanced hydrogen production from palm waste at bench scale plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 30581–30591.
- Inayat, M., Sulaiman, S. A., Inayat, A., Shaik, N. B., Gilal, A. R., & Shahbaz, M. (2021). Modeling and parametric optimization of air catalytic co-gasification of wood-oil palm fronds blend for clean syngas (H₂+CO) production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(59), 30559–30580.

- Inayat, M., Sulaiman, S. A., & Kurnia, J. C. (2019). Catalytic co-gasification of coconut shells and oil palm fronds blends in the presence of cement, dolomite, and limestone: Parametric optimization via Box Behnken Design. *Journal of the Energy Institute*, 92(4), 871–882. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.08.002>
- Ingle, N. A., & Lakade, S. S. (2015). Design and Development of Downdraft Gasifier to Generate Producer Gas. *Energy Procedia*, 90(December 2015), 423–431. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.209>
- Irawan, A. (2021). Potential and Opportunity of Co-Firing Power Plant in Indonesia Through Torrefaction of Empty Fruit Bunch (EFB)-A Review ARTICLE HISTORY ABSTRACT. In *World Chemical Engineering Journal* (Vol. 5, Issue 1). <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/WCEJ>
- Irijayanti, A. D., Wibowo, A. S., Stiyaningsih, H., Putri, I. M., Gitaningtyas, O. P., Areka, S. K., Suprapti, W., & Nurfalah, Z. (2023). *Statistik Hortikultura 2022* (H. dan P. Direktorat Statistik Tanaman Pangan, Ed.). BPS RI/BPS-Statistics Indonesia.
- Islam, M. W. (2020a). Effect of different gasifying agents (steam, H₂O₂, oxygen, CO₂, and air) on gasification parameters. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(56), 31760–31774. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.002>
- Islam, M. W. (2020b). Effect of different gasifying agents (steam, H₂O₂, oxygen, CO₂, and air) on gasification parameters. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(56), 31760–31774. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.002>
- Ismail, T. M., Ramos, A., Monteiro, E., El-Salam, M. A., & Rouboa, A. (2020). Parametric studies in the gasification agent and fluidization velocity during oxygen-enriched gasification of biomass in a pilot-scale fluidized bed: Experimental and numerical assessment. *Renewable Energy*, 147, 2429–2439.
- Ismayil, K. M., Varghese, A., & Affiliations, R. A. (2020). Silver-doped polyaniline–polyvinyl chloride nanocomposite films for photocatalytic and antibacterial applications. *Journal of Elastomers & Plastics*, 52(2), 103–116.
- Javed, S. H., Zahir, A., Khan, A., Afzal, S., & Mansha, M. (2018). Adsorption of Mordant Red 73 dye on acid activated bentonite: Kinetics and thermodynamic study. *Journal of Molecular Liquids*, 254, 398–405. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.01.100>
- Jeguirim, M., & Khiari, B. (2023). Chapter 10 - Thermochemical conversion. *Palm Trees and Fruits Residues Recent Advances for Integrated and Sustainable Management*, 391–437.
- Jiang, P., Zhao, G., Liu, L., Zhang, H., Mu, L., Lu, X., & Zhu, J. (2022). A negative-carbon footprint process with mixed 3 biomass feedstock maximizes

- conversion efficiency, 4 product value and CO₂ mitigation. *Bioresource Technology*, 351, 127004. <https://ssrn.com/abstract=4035282>
- Jin, X., Sun, Y., Zhang, W., & Lam, J. C. (2020). *Chemical Synthesis of Adipic Acid from Glucose and Derivatives: Challenges for Nanocatalyst Design*. December. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c04411>
- Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2023). Hydrogen Production and Application in The Energy Transition. *Proceedings of the 3rd Indian International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 449–468.
- Kabli, M. R., Ali, A. M., Inayat, M., Zahrani, A. A., Shahzad, K., Shahbaz, M., & Sulaiman, S. A. (2022). H₂-rich syngas production from air gasification of date palm waste: an experimental and modeling investigation. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02375-7>
- Kakaei, S., Khameneh, E. S., Rezazadeh, F., & Hosseini, M. H. (2020). Heavy metal removing by modified bentonite and study of catalytic activity. *Journal of Molecular Structure*, 1199, 126989. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.126989>
- Kar, Y. (2018). Catalytic cracking of pyrolytic oil by using bentonite clay for green liquid hydrocarbon fuels production. *Biomass and Bioenergy*, 119(September), 473–479. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.10.014>
- Kar, Y., Bozkurt, G., & Yalman, Y. (2019). Liquid fuels from used transformer oil by catalytic cracking using bentonite catalyst. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 38(4), 1–6. <https://doi.org/10.1002/ep.13080>
- Keereerak, A., Sukkhata, N., Lehman, N., Nakaramontri, Y., Sengloyluan, K., Johns, J., & Kalkornsurapranee, E. (2022). Development and Characterization of Unmodified and Modified Natural Rubber Composites Filled with Modified Clay. *Polymers*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/polym14173515>
- Khelifi, S., Pozzobon, V., & Lajili, M. (2024a). A Comprehensive Review of Syngas Production, Fuel Properties, and Operational Parameters for Biomass Conversion. In *Energies* (Vol. 17, Issue 15). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/en17153646>
- Khelifi, S., Pozzobon, V., & Lajili, M. (2024b). A Comprehensive Review of Syngas Production, Fuel Properties, and Operational Parameters for Biomass Conversion. In *Energies* (Vol. 17, Issue 15). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/en17153646>
- Klimek, A., Gawel, A., Górniak, K., Tomczyk-Chmiel, A., Serwicka, E. M., & Bahrnowski, K. (2024a). CO₂ Sorption on Ti-, Zr-, and [Ti,Zr]-Pillared Montmorillonites. *Materials*, 17(16). <https://doi.org/10.3390/ma17164036>

- Klimek, A., Gaweł, A., Górniak, K., Tomczyk-Chmiel, A., Serwicka, E. M., & Bahranowski, K. (2024b). CO₂ Sorption on Ti-, Zr-, and [Ti,Zr]-Pillared Montmorillonites. *Materials*, 17(16). <https://doi.org/10.3390/ma17164036>
- Kocer, A. A., Yuksel, Y. E., Ozturk, M., & Uk, A. (2022). Investigation Of A Biomass Gasification System Based On Energy And Exergy Analysis Core. *The 5 Th International Symposium on Sustainable Development*, 187–196.
- Konkol, M., Wróbel, W., Bicki, R., & Goł Biowski, A. (2016). The influence of the hydrogen pressure on kinetics of the canola oil hydrogenation on industrial nickel catalyst. *Catalysts*, 6(4). <https://doi.org/10.3390/catal6040055>
- Kumar, A., & Lingfa, P. (2020a). Sodium bentonite and kaolin clays: Comparative study on their FT-IR, XRF, and XRD. *Materials Today: Proceedings*, 22, 737–742. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.037>
- Kumar, A., & Lingfa, P. (2020b). Sodium bentonite and kaolin clays: Comparative study on their FT-IR, XRF, and XRD. *Materials Today: Proceedings*, 22, 737–742. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.037>
- Kuo, P. C., & Wu, W. (2015). Design of Co-gasification from Coal and Biomass Combined heat and Power Generation System. *Energy Procedia*, 75, 1120–1125. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.523>
- Kurniawan, T. A., Ali, M., Mohyuddin, A., Haider, A., Othman, M. H. D., Anouzla, A., Goh, H. H., Zhang, D., Dai, W., Aziz, F., Khan, M. I., Ali, I., Mahmoud, M., Alkhadher, S. A. A., & Alsultan, G. A. (2025). Innovative transformation of palm oil biomass waste into sustainable biofuel: Technological breakthroughs and future prospects. In *Process Safety and Environmental Protection* (Vol. 193, pp. 643–664). Institution of Chemical Engineers. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.11.073>
- Kusrini, E., Wu, S., Susanto, B. H., Lukita, M., Gozan, M., Hans, M. D., Rahman, A., Degirmenci, V., & Usman, A. (2019). Simultaneous absorption and adsorption processes for biogas purification using Ca(OH)₂ solution and activated clinoptilolite zeolite/chitosan composites. *International Journal of Technology*, 10(6), 1243–1250. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v10i6.3695>
- Kuswa, F. M., Putra, H. P., Prabowo, Darmawan, A., Aziz, M., & Hariana, H. (2023). Investigation of the combustion and ash deposition characteristics of oil palm waste biomasses. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04418-z>
- Lewandowski, W. M., Ryms, M., & Kosakowski, W. (2020a). Thermal biomass conversion: A review. *Processes*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/PR8050516>
- Lewandowski, W. M., Ryms, M., & Kosakowski, W. (2020b). Thermal biomass conversion: A review. *Processes*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/PR8050516>

- Li, J., Zhang, J., & Yang, J. H. (2022). Research progress and applications of nickel-based catalysts for electrooxidation of urea. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(12), 7693–7712. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.099>
- Li, Y., Yang, Y., Liu, Y. C., Groppo, C., & Rolfo, F. (2020). Muscovite dehydration melting in silica-undersaturated systems: A case study from corundum-bearing anatectic rocks in the dabié orogen. *Minerals*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/min10030213>
- Liew, Z. K., Chan, Y. J., Ho, Z. T., Yip, Y. H., Teng, M. C., Chong, S., Show, P. L., & Chien Lye Chew. (2021). Biogas production enhancement bu co-digestion of empty fruit bunch (EFB) with palm oil mill effluent(POME): Performance and kinetic evaluation. *Renewable Energy*, 179, 766–777.
- Lin, L., Han, X., Han, B., & Yang, S. (2021). Emerging heterogeneous catalysts for biomass conversion: Studies of the reaction mechanism. In *Chemical Society Reviews* (Vol. 50, Issue 20, pp. 11270–11292). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d1cs00039j>
- Liu, C., Wang, W., & Chen, D. (2018). Hydrogen-Rich Syngas Production from Chemical Looping Gasification of Biomass Char with $\text{CaMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$. *Energy & Fuels*, 32(9).
- Liu, W. J., & Yu, H. Q. (2022). Thermochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass into Mass-Producible Fuels: Emerging Technology Progress and Environmental Sustainability Evaluation. In *ACS Environmental Au* (Vol. 2, Issue 2, pp. 98–114). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsenvironau.1c00025>
- Lotfi, S. (2021). Technologies for Tar Removal from Biomass-Derived Syngas. *Petroleum & Petrochemical Engineering Journal*, 5(3), 1–35.
- Lynd, L. R., Beckham, G. T., Guss, A. M., Jayakody, L. N., Karp, E. M., Maranas, C., McCormick, R. L., Amador-Noguez, D., Bomble, Y. J., Davison, B. H., Foster, C., Himmel, M. E., Holwerda, E. K., Laser, M. S., Ng, C. Y., Olson, D. G., Román-Leshkov, Y., Trinh, C. T., Tuskan, G. A., ... Wyman, C. E. (2022). Toward low-cost biological and hybrid biological/catalytic conversion of cellulosic biomass to fuels†. In *Energy and Environmental Science* (Vol. 15, Issue 3, pp. 938–990). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d1ee02540f>
- Lyubov, G., Egor, V., Yu, V., Anna, A., & Vladimirovich, A. (2020). OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse To cite this version : Effect of ultrasound pretreatment on bromination of double-walled carbon nanotubes. 8.
- Ma, Z., Chen, D., Gu, J., Bao, B., & Zhang, Q. (2015). Determination of pyrolysis characteristics and kinetics of palm kernel shell using TGA–FTIR and model-free integral methods. *Energy Conversion and Management*, 89, 251–259.

- Madejová, J., & Pálková, H. (2024). Review of the application of infrared spectroscopy in studies of acid-treated clay minerals. *Clays and Clay Minerals*, 72.
- Mahidin, M., Hamdani, H., Hisbullah, H., Erdiwansyah, E., Muhtadin, M., Faisal, A., Abulyatama, M., Usman, U., Sidik, A., & Che, N. A. (2021). Experimental on the FBC chamber for analysis temperature and combustion efficiency using palm oil biomass fuel. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 1–17.
- Mai, T. D., Koós, T., Sebe, E., Siménfalvi, Z., & Kállay, A. A. (2023). Efficiency Enhancement of the Single Line Multi-Stage Gasification of Hungarian Low-Rank Coal: Effects of Gasification Temperature and Steam/Carbon (S/C) Ratio. *Energies*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/en16114427>
- Maitlo, G., Ali, I., Mangi, K. H., Ali, S., Maitlo, H. A., Unar, I. N., & Pirzada, A. M. (2022a). Thermochemical Conversion of Biomass for Syngas Production: Current Status and Future Trends. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su14052596>
- Maitlo, G., Ali, I., Mangi, K. H., Ali, S., Maitlo, H. A., Unar, I. N., & Pirzada, A. M. (2022b). Thermochemical Conversion of Biomass for Syngas Production: Current Status and Future Trends. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su14052596>
- Makaryan, I. A., Salgansky, E. A., Arutyunov, V. S., & Sedov, I. V. (2023). Non-Catalytic Partial Oxidation of Hydrocarbon Gases to Syngas and Hydrogen: A Systematic Review. In *Energies* (Vol. 16, Issue 6). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16062916>
- Mane, P. V., Rego, R. M., Yap, P. L., Losic, D., & Kurkuri, M. D. (2024). Unveiling cutting-edge advances in high surface area porous materials for the efficient removal of toxic metal ions from water. In *Progress in Materials Science* (Vol. 146). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101314>
- Mardawati, E., Putri, A. V., Yuliana, T., Rahimah, S., Nurjanah, S., & Hanidah, I. (2019). Effects of substrate concentration on bioethanol production from oil palm empty fruit bunches with simultaneous saccharification and fermentation (SSF). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 230(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/230/1/012079>
- Materazzi, M., Lettieri, P., Mazzei, L., Taylor, R., & Chapman, C. (2013). Thermodynamic modelling and evaluation of a two-stage thermal process for waste gasification. *Fuel*, 108, 356–369. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.02.037>
- Meng, F., Ma, Q., Wang, H., Liu, Y., & Wang, D. (2019). Effect of gasifying agents on sawdust gasification in a novel pilot scale bubbling fluidized bed system. *Fuel*, 249(March), 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.107>

- Mingaleeva, G., Ermolaev, D., & Galkeeva, A. (2016). Physico-chemical foundations of produced syngas during gasification process of various hydrocarbon fuels. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(1), 297–304. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-0988-8>
- Mohamed, B. A., Ellis, N., Kim, C. S., & Bi, X. (2019). Understanding catalytic effects of bentonite/clinoptilolite on biomass pyrolysis. *Renewable Energy*, 142, 304–315. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.117>
- Mohamed, B. A., Ellis, N., Kim, C. S., & Bi, X. (2020). Synergistic Effects of Catalyst Mixtures on Biomass Catalytic Pyrolysis. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.615134>
- Molino, A., Larocca, V., Chianese, S., & Musmarra, D. (2018). Biofuels production by biomass gasification: A review. *Energies*, 11(4), 1–31. <https://doi.org/10.3390/en11040811>
- Monir, in, Aziz, A. A., Kaykobad Md., Karim, R., Khatun, F., Tarek, M., Yousuf, A., & Dai-Viet N. Vo. (2022). Catalytic Gasification of Empty Palm Fruit Bunches Using Charcoal and Bismuth Oxide for Syngas Production. *Topics in Catalysis*, 66, 64–74.
- Monir, M. U., Abd Aziz, A., Kristanti, R. A., & Yousuf, A. (2018). Co-gasification of empty fruit bunch in a downdraft reactor: A pilot scale approach. *Bioresource Technology Reports*, 1, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.02.001>
- Monir, M. U., Aziz, A. A., Vo, D. V. N., & Khatun, F. (2020). Enhanced Hydrogen Generation from Empty Fruit Bunches by Charcoal Addition into a Downdraft Gasifier. *Chemical Engineering and Technology*, 43(4), 762–769. <https://doi.org/10.1002/ceat.201900547>
- Moreira, R., Fernando, B., Lalaguna, N. G., Sánchez, J. L., & Portugal, A. (2021). Clean syngas production by gasification of lignocellulosic char: state of the art and. *Journal of Industrial and Engineering*, 101, 1–20. <https://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>
- Mosai, A. K., Chimuka, L., Cukrowska, E. M., Kotzé, I. A., & Tutu, H. (2020). Removal of platinum (IV) from aqueous solutions with yeast-functionalised bentonite. *Chemosphere*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124768>
- Muñoz, D. F., Gutiérrez, J., & Pérez, J. F. (2023). Effect of the air flows ratio on energy behavior and NOx emissions from a top-lit updraft biomass cookstove. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(11). <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04473-7>

- Murti, S. D. S., Sudo, Y., Yan, S., Adiarso, & Noda, R. (2018). Investigation of biomass gasification using Indonesian clay as catalyst. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 105(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/105/1/012105>
- Muslim, M. B., Saleh, S., & Abdul Samad, N. A. F. (2017). Torrefied Biomass Gasification: A Simulation Study by Using Empty Fruit Bunch. *MATEC Web of Conferences*, 131. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713103008>
- Najib, S. S. A. M., Ganesan, M. A., Rashid, N. M., Sokri, M. N. M., Zaini, N., & Nasri, N. (2021). Effect of Temperature on Calorific Value of Pyrolyzed Empty Fruit Bunch (Efb) Derived Biochar. *Journal of Earth and Environmental Sciences Research*, 1–6. [https://doi.org/10.47363/JEESR/2021\(3\)138](https://doi.org/10.47363/JEESR/2021(3)138)
- Ngamchompoo, W., & Triratanasirichai, K. (2017). Experimental Investigation of High temperature air and steam biomass gasification in a fixed-bed downdraft gasifier. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 39(8), 733–740.
- Nganda, A., Srivastava, P., Lamba, B. Y., Pandey, A., & Kumar, M. (2023). Advances in the fabrication, modification, and performance of biochar, red mud, calcium oxide, and bentonite catalysts in waste-to-fuel conversion. *Environmental Research*, 232(116284).
- Noah, A. S. (2022). Oil Palm Empty Fruit Bunches (OPEFB) – Alternative Fibre Source for Papermaking. In *Elaeis guineensis* (edited by H. Kamyab, p. 5). IntechOpen. <https://doi.org/https://doi.org/10.5772/intechopen.98256>
- Nugroho, F. G., Ansari, A. S., Rochman, N. T., Khadtare, S. S., Sree, V. G., Shrestha, N. K., Hafiyyan, A. F., Im, H., & Ahmed, A. T. A. (2025). Utilizing Indonesian Empty Palm Fruit Bunches: Biochar Synthesis via Temperatures Dependent Pyrolysis. *Nanomaterials*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/nano15010050>
- Nyakuma, B. B., Ahmad, A., Johari, A., Abdullah, T. A. T., Oladokun, O., & Aminu, D. Y. (2015). Non-isothermal kinetic analysis of oil palm empty fruit bunch pellets by thermogravimetric analysis. *Chemical Engineering Transactions*, 45, 1327–1332. <https://doi.org/10.3303/CET1545222>
- Panda, A. K. (2018a). Thermo-catalytic degradation of different plastics to drop in liquid fuel using calcium bentonite catalyst. *International Journal of Industrial Chemistry*, 9(2), 167–176. <https://doi.org/10.1007/s40090-018-0147-2>
- Panda, A. K. (2018b). Thermo-catalytic degradation of different plastics to drop in liquid fuel using calcium bentonite catalyst. *International Journal of Industrial Chemistry*, 9(2), 167–176. <https://doi.org/10.1007/s40090-018-0147-2>

- Papilo, P., Kusumanto, I., & Kunaifi, K. (2017). Assessment of agricultural biomass potential to electricity generation in Riau Province. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 65(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/65/1/012006>
- Parvulescu, V. I., Epron, F., Garcia, H., & Granger, P. (2022). Recent Progress and Prospects in Catalytic Water Treatment. *Chemical Reviews*, 122(3), 2981–3121. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00527>
- Peng, W. X., Wang, L. S., Mirzaee, M., Ahmadi, H., Esfahani, M. J., & Fremaux, S. (2017). Hydrogen and syngas production by catalytic biomass gasification. *Energy Conversion and Management*, 135, 270–273. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.056>
- Pinakana, S. D., Raysoni, A. U., Sayeed, A., Gonzalez, J. L., Temby, O., Wladyka, D., Sepielak, K., & Gupta, P. (2024). Review of agricultural biomass burning and its impact on air quality in the continental United States of America. In *Environmental Advances* (Vol. 16). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100546>
- Pinto, F., André, R., Miranda, M., Neves, D., Varela, F., & Santos, J. (2016). Effect of gasification agent on co-gasification of rice production wastes mixtures. *Fuel*, 180, 407–416. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.048>
- Polprasert, S., Choopakar, O., & Elefsinotis, P. (2021). Bioethanol production from pretreated palm empty fruit bunch(PEFB) using sequential enzymatic hydrolysis and yeast fermentation. *Biomass and Bioenergy*, 149.
- Processes, L. (2018). *Zeolites as Catalysts for Fuels Refining after Indirect*. 1–17. <https://doi.org/10.3390/molecules23010115>
- Promraksa, A., & Rakmak, N. (2020). Biochar production from palm oil mill residues and application of the biochar to adsorb carbon dioxide. *Heliyon*, 6(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04019>
- Purwaningrum, W., Vilantina, & Said, M. (2021). Cr (III)-Doped Bentonite: Synthesis, Characterization and Application for Phenol Removal Makara. *Journal of Science*. 25 (2): 69-78, 25(2), 69–78.
- Rabie, A. M., Mohammed, E. A., & Negm, N. A. (2018). Feasibility of modified bentonite as acidic heterogeneous catalyst in low temperature catalytic cracking process of biofuel production from nonedible vegetable oils. *Journal of Molecular Liquids*, 254(2018), 260–266. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.01.110>
- Reddy, T. R., S, K., T, E., & Reddy S, L. (2017). Spectroscopic Characterization of Bentonite. *Journal of Lasers, Optics & Photonics*, 04(03). <https://doi.org/10.4172/2469-410x.1000171>

- Rego, F., Xiang, H., Yang, Y., Ordovás, J. L., Chong, K., Wang, J., & Bridgwater, A. (2022). Investigation of the role of feedstock properties and process conditions on the slow pyrolysis of biomass in a continuous auger reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 161, 105378.
- Ren, X. Y., Feng, X. B., Cao, J. P., Tang, W., Wang, Z. H., Yang, Z., Zhao, J. P., Zhang, L. Y., Wang, Y. J., & Zhao, X. Y. (2020). Catalytic Conversion of Coal and Biomass Volatiles: A Review. In *Energy and Fuels* (Vol. 34, Issue 9, pp. 10307–10363). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c01432>
- Riaza, J., Mason, P. E., Jones, J. M., Williams, A., Gibbins, J., & Chalmers, H. (2020). Shape and size transformations of biomass particles during combustion. *Fuel*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116334>
- Ro, D., Shafaghat, H., Jang, S. H., Lee, H. W., Jung, S. C., Jae, J., Cha, J. S., & Park, Y. K. (2019). Production of an upgraded lignin-derived bio-oil using the clay catalysts of bentonite and olivine and the spent FCC in a bench-scale fixed bed pyrolyzer. *Environmental Research*, 172(February), 658–664. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.03.014>
- Romero, R. (2025a). Application of Pillared Clays for Water Recovery. In *Catalysts* (Vol. 15, Issue 2). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/catal15020159>
- Romero, R. (2025b). Application of Pillared Clays for Water Recovery. In *Catalysts* (Vol. 15, Issue 2). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/catal15020159>
- Said, M., Dian, A. R., Mohadi, R., & Lesbani, A. (2020). Cr/Al Pillared Bentonite and Its Application on Congo Red and Direct Blue Removal. *Molekul*, 15(3), 140–148.
- Said, M., Rizki, W. T., Purwaningrum, W., Rachmat, A., & Ferlinahayati, Hariani, P. L. (2020). Modification Bentonite Using Fe(III) and Its Application as Adsorbent for Phenol. *Mediterranean Journal of Chemistry*, 9(6), 422–431.
- Saleh, S., & Samad, N. A. F. A. (2021). Effects of Gasification Temperature and Equivalence Ratio on Gasification Performance and Tar Generation of Air Fluidized Bed Gasification Using Raw and Torrefied Empty Fruit Bunch. *Chemical Engineering Transactions*, 88, 1309–1314. <https://doi.org/10.3303/CET2188218>
- Salem, A. M., & Paul, M. C. (2018). An integrated kinetic model for downdraft gasifier based on a novel approach that optimises the reduction zone of gasifier. *Biomass and Bioenergy*, 109, 171–181.

- Sapalina, F., Noviandi Ginting, E., & Hidayat, F. (2022). Bakteri Penambat Nitrogen Sebagai Agen Biofertilizer. *WARTA Pusat Penelitian Kelapa Sawit*, 27(1), 41–50. <https://doi.org/10.22302/iopri.war.warta.v27i1.80>
- Sassykova, L. R., Aubakirov, Y. A., Sendilvelan, S., Tashmukhambetova, Zh. Kh., Faizullaeva, M. F., Bhaskar, K., Batyrbayeva, A. A., Ryskaliyeva, R. G., Tyussyupova, B. B., Zhakupova, A. A., & Sarybayev, M. A. (2019). The Main Components of Vehicle Exhaust Gases and Their Effective Catalytic Neutralization. *Oriental Journal of Chemistry*, 35(1), 110–127. <https://doi.org/10.13005/ojc/350112>
- Sazali, S. N., Al-attab, K. A., & Zainal, Z. A. (2019). Gasification enhancement and tar reduction using air fogging system in a double walled downdraft biomass gasifier. *Energy*, 186, 115901. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115901>
- Serafin, J., Dziejarski, B., Fonseca-Bermúdez, Ó. J., Giraldo, L., Sierra-Ramírez, R., Bonillo, M. G., Farid, G., & Moreno-Piraján, J. C. (2024). Bioorganic activated carbon from cashew nut shells for H₂ adsorption and H₂/CO₂, H₂/CH₄, CO₂/CH₄, H₂/CO₂/CH₄ selectivity in industrial applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 86, 662–676. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.417>
- Sewu, D. D., Lee, D. S., Tran, H. N., & Woo, S. H. (2019). Effect of bentonite-mineral co-pyrolysis with macroalgae on physicochemical property and dye uptake capacity of bentonite/biochar composite. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 104, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2019.08.017>
- Shahbaz, M., Yusup, O. S., Inayat, A., Patrick, D. O., Ammar, M., & Pratama, A. (2017a). Cleaner Production of Hydrogen and Syngas from Catalytic Steam Palm Kernel Shell Gasification Using CaO Sorbent and Coal Bottom Ash as a Catalyst. *Energy&Fuels*, 31(12).
- Shahbaz, M., Yusup, S., Inayat, A., Patrick, D. O., Ammar, M., & Pratama, A. (2017b). Cleaner Production of Hydrogen and Syngas from Catalytic Steam Palm Kernel Shell Gasification Using CaO Sorbent and Coal Bottom Ash as a Catalyst. *Energy and Fuels*, 31(12), 13824–13833. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03237>
- Shahbaz, M., Yusup, S., Inayat, A., Patrick, D. O., Ammar, M., & Pratama, A. (2017c). Cleaner Production of Hydrogen and Syngas from Catalytic Steam Palm Kernel Shell Gasification Using CaO Sorbent and Coal Bottom Ash as a Catalyst. *Energy and Fuels*, 31(12), 13824–13833. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03237>
- Shahlan, S. S., Kidam, K., Medic-Pejic, L., Abdullah, T. A. T., Ali, M. W., & Zakaria, Z. Y. (2018). Process development of oil palm empty fruit bunch gasification by using fluidised bed reactor for hydrogen gas production.

- Chemical Engineering Transactions*, 63, 559–564.
<https://doi.org/10.3303/CET1863094>
- Shahlan, S. S., Kidam, K., Tuan Abdullah, T. A., Ali, M. W., Pejic, L. M., & Kamarden, H. (2019). Hydrogen Gas Production from Gasification of Oil Palm Empty Fruit Bunch (EFB) in a Fluidized Bed Reactor. *Journal of Energy and Safety Technology (JEST)*, 2(1). <https://doi.org/10.11113/jest.v2n1.42>
- Shayan, E., Zare, V., & Mirzaee, I. (2018). Hydrogen production from biomass gasification; a theoretical comparison of using different gasification agents. *Energy Conversion and Management*, 159(August 2017), 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.096>
- Shi, K., Yan, J., Menéndez, J. A., Luo, X., Yang, G., Chen, Y., Lester, E., & Wu, T. (2020). Production of H₂-Rich Syngas From Lignocellulosic Biomass Using Microwave-Assisted Pyrolysis Coupled With Activated Carbon Enabled Reforming. *Frontiers in Chemistry*, 8. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00003>
- Sidek, F. N., Abdul Samad, N. A. F., & Saleh, S. (2020a). Review on effects of gasifying agents, temperature and equivalence ratio in biomass gasification process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 863(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/863/1/012028>
- Sidek, F. N., Abdul Samad, N. A. F., & Saleh, S. (2020b). Review on effects of gasifying agents, temperature and equivalence ratio in biomass gasification process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 863(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/863/1/012028>
- Sikarwar, V. S., Zhao, M., Clough, P., Yao, J., Zhong, X., Memon, M. Z., Shah, N., Anthony, E. J., & Fennell, P. s. (2016). An overview of advances in biomass gasification. *Energy and Environment*, 9(10). <https://doi.org/10.1039/c6ee00935b>
- Staničić, I., Brorsson, J., Hellman, A., Mattisson, T., & Backman, R. (2022). Thermodynamic Analysis on the Fate of Ash Elements in Chemical Looping Combustion of Solid Fuels—Iron-Based Oxygen Carriers. *Energy and Fuels*, 36(17), 9648–9659. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c01578>
- State, R. N., Volceanov, A., Muley, P., & Boldor, D. (2019). A review of catalysts used in microwave assisted pyrolysis and gasification. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.036>
- Sun, Z., Xiang, W., & Chen, S. (2016). Sorption enhanced coal gasification for hydrogen production using a synthesized CaO-MgO-molecular sieve sorbent. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(39), 17323–17333. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.145>

- Suparmin, P., Nurhasanah, R., Hendri, H., & Ridwan, M. (2023). Biomass for dual-fuel syngas diesel power plants. Part I: The effect of preheating on characteristics of the syngas gasification of municipal solid waste and wood pellets. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*, 30(1), 378–392. <https://doi.org/10.1080/25765299.2023.2223027>
- Surahmanto, F., Saptoadi, H., Sulisty, H., & Rohmat, T. A. (2020). Investigation of the pyrolysis characteristics and kinetics of oil-palm solid waste by using coats–redfern method. *Energy Exploration and Exploitation*, 38(1), 298–309. <https://doi.org/10.1177/0144598719877759>
- Thushari, P. G. I., & Babel, S. (2018). Biodiesel production from waste palm oil using palm empty fruit bunch-derived novel carbon acid catalyst. *Journal of Energy Resources Technology*, 140(3), 1–10. <https://doi.org/10.1115/1.4038380>
- Trubetskaya, A. (2022). Reactivity Effects of Inorganic Content in Biomass Gasification: A Review. In *Energies* (Vol. 15, Issue 9). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en15093137>
- Tsai, W. T. (2019). Benefit analysis and regulatory actions for imported palm kernel shell as an environment-friendly energy source in Taiwan. *Resources*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/resources8010008>
- Tursun, X. Y., Shaoping, Abulikemu, A., & Dilinuer, T. (2019). Biomass gasification for hydrogen rich gas in a decoupled triple bed gasifier with olivine and NiO/olivine. *Bioresource Technology*, 272, 241–248.
- Tursun, Y., Xu, S., Abulikemu, A., & Dilinuer, T. (2019). Biomass gasification for hydrogen rich gas in a decoupled triple bed gasifier with olivine and NiO/olivine. *Bioresource Technology*, 272, 241–248.
- Twigg, M. V. (2018). *Catalyst Handbook*. CRC Press.
- Uchegbulam, I., Momoh, E. O., & Agan, S. A. (2022). Potentials of palm kernel shell derivatives: a critical review on waste recovery for environmental sustainability. In *Cleaner Materials* (Vol. 6). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100154>
- Umar, H. A., Sulaiman, S. A., Said, M. A. B. M., & Ahmad, R. K. (2020). Palm kernel shell as potential fuel for syngas production. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 263–273. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5753-8_25
- Vallejo, C. A., Galeano, L. A., Trujillano, R., Vicente, M. Á., & Gil, A. (2020a). Preparation of Al/Fe-PILC clay catalysts from concentrated precursors: Enhanced hydrolysis of pillaring metals and intercalation. *RSC Advances*, 10(66), 40450–40460. <https://doi.org/10.1039/d0ra08948f>

- Vallejo, C. A., Galeano, L. A., Trujillano, R., Vicente, M. Á., & Gil, A. (2020b). Preparation of Al/Fe-PILC clay catalysts from concentrated precursors: Enhanced hydrolysis of pillaring metals and intercalation. *RSC Advances*, 10(66), 40450–40460. <https://doi.org/10.1039/d0ra08948f>
- Varjani, S. (2022). Efficient Removal of Tar Employing Dolomite Catalyst in Gasification: Challenges and Opportunities. *Science of The Total Environment*, 836, 155721.
- Verdugo, A. S., Berg, L. Von, Serrano, D., Hochenauer, C., Scharler, R., & Couce, A. A. (2018). Effect of bed material density on the performance of steam gasification of biomass in bubbling fluidized beds. *Fuel*, 257, 1–49.
- Wang, B., Gupta, R., Bei, L., Wan, Q., & Sun, L. (2023). A review on gasification of municipal solid waste (MSW): Syngas production, tar formation, mineral transformation and industrial challenges. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 48, Issue 69, pp. 26676–26706). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.086>
- Wang, J., Kang, D., Shen, B., Sun, H., & Wu, C. (2020). Enhanced hydrogen production from catalytic biomass gasification with in-situ CO₂ capture. *Environmental Pollution*, 267, 115487. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115487>
- Wang, S., Lu, A., & Zhong, C. J. (2021). Hydrogen production from water electrolysis: role of catalysts. *Nano Convergence*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40580-021-00254-x>
- Wang, Y., Cao, G., Ba, Z., Cheng, H., Hu, D., Baltrusaitis, J., Li, C., Zhao, J., & Fang, Y. (2025). Experiment and Simulation of the Non-Catalytic Reforming of Biomass Gasification Producer Gas for Syngas Production. *Energies*, 18(11). <https://doi.org/10.3390/en18112945>
- Wang, Z., Zhang, Y., Neyts, E. C., Cao, X., Zhang, X., Jang, B. W.-L., & Liu, C. (2018). Catalyst Preparation with Plasmas: How Does It Work? *ACS Publications*, 2093–2110.
- Watson, J., Zhang, Y., Si, B., Chen, W., & Souza, R. De. (2018). Gasification of biowaste : A critical review and outlooks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 83(August 2017), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.003>
- Weng, Z., Kanchanatip, E., Hantoko, D., Yan, M., Su, H., Zhang, S., & Wang, G. (2020). Improving supercritical water gasification of sludge by oil palm empty fruit bunch addition: Promotion of syngas production and heavy metal stabilization. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 28(1), 293–298. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.08.004>
- Widyarko, W., Susanto, D., & Nugroho, N. (2021). Natural Fiber Waste from Palm Oil Tree: An Overview of Potential Usage for Indonesia's Affordable House

- Building Materials. *Journal of Architectural Research and Design Studies*, 5(1). <https://doi.org/10.20885/jars.vol5.iss1.art3>
- Windiastruti, E., Suprihatin, Bindar, Y., & Hasanudin, U. (2022). Identification of potential application of oil palm empty fruit bunches (EFB): A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1063(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1063/1/012024>
- Wong, W. Y., Lim, S., Pang, Y. L., Shuit, S. H., Chen, W., & Lee, K. T. (2020). Synthesis of renewable heterogeneous acid catalyst from oil palm empty fruit bunch for glycerol-free biodiesel production. *Science of The Total Environment*, 727.
- Yerga, R. M. N. (2021). Catalysts for production and conversion of syngas. In *Catalysts* (Vol. 11, Issue 6). MDPI. <https://doi.org/10.3390/catal11060752>
- Yi, Q., Zhang, J., Zhang, X., Feng, J., & Li, W. (2015). Synthesis of SO₄²⁻/Zr-SBA-15 catalyst for the transesterification of waste cooking oil as a bio-flotation agent in coal flotation. *Fuel*, 143, 390–398.
- Yohana, E., Syafrudin, S., Budihardjo, M. A., Ramadan, B. S., Lantasi, A. I. D., Muhammad, F. I., & Humaira, N. G. (2022). Study of Desiccation Crack Behavior of Fly Ash - Bentonite (FAB) Composite in Landfill Liner System. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi Dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 19(1), 68–77. <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v19i1.68-77>
- Yoo, H., Park, S., Seo, Y., & Kim, K. (2019). Applicability assessment of empty fruit bunches from palm oil mills for use as bio-solid refuse fuels. *Journal of Environmental Management*, 234(November 2018), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.035>
- You, S., Ok, Y. S., Tsang, D. C. W., Kwon, E. E., & Wang, C. H. (2018). Towards practical application of gasification: a critical review from syngas and biochar perspectives. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 48(22–24), 1165–1213. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1518860>
- Yue, Y., Jin, X., & Deng, L. (2023). Experimental Study on Properties of Syngas, Tar, and Biochar Derived from Different Gasification Methods. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(20). <https://doi.org/10.3390/app132011490>
- Zakaria, M. R., Abdillah, M., Farid, A., Andou, Y., Ramli, I., & Hassan, M. A. (2023). Production of biochar and activated carbon from oil palm biomass: Current status, prospects, and challenges. *Industrial Crops and Products*, 199, 116767.
- Zhang, S., Wang, J., Ye, L., Li, S., Su, Y., & Zhang, H. (2023). Investigation into biochar supported Fe-Mo carbides catalysts for efficient biomass gasification tar cracking. *Chemical Engineering Journal*, 454(1), 140072.

- Zhang, W., Huang, S., Wu, S., Wu, Y., & Gao, J. (2019a). Study on the structure characteristics and gasification activity of residual carbon in biomass ashes obtained from different gasification technologies. *Fuel*, 254, 115699.
- Zhang, W., Huang, S., Wu, S., Wu, Y., & Gao, J. (2019b). Study on the structure characteristics and gasification activity of residual carbon in biomass ashes obtained from different gasification technologies. *Fuel*, 254(November 2018), 115699. *Fuel*, 254, 115699.
- Zhang, Y. (2020). A Review on Biomass Gasification: Effect of Main Parameters on Char Generation and Reaction. *Energy & Fuels*, 34(11), 13438–13455.
- Zhang, Y., Yao, S., Hu, J., Xia, J., Xie, T., Zhang, Z., & Li, H. (2023). Numerical Modeling of Biomass Gasification Using Cow Dung as Feedstock. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 10(3), 458–467. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2023500>
- Zhao, X., Sun, S., Wang, Y., Zhang, Y., Zhu, Y., Zong, B., Hu, J., Williams, P., & Wu, C. (2024). The role of reverse Boudouard reaction during integrated CO₂ capture and utilisation via dry reforming of methane. *Chemical Engineering Journal*, 491. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151668>
- Zheng, J. L., Zhu, M. Q., Wen, J. L., & Sun, R. (2016). Gasification of bio-oil: Effects of equivalence ratio and gasifying agents on product distribution and gasification efficiency. *Bioresource Technology*, 211, 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.088>
- Zhou, L., Yang, Z., Tang, A., Huang, H., Wei, D., Yu, E., & Lu, W. (2019). Steam-gasification of biomass with CaO as catalyst for hydrogen-rich syngas production. *Journal of the Energy Institute*, 92(6), 1641–1646. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.01.010>
- Zimmermann, T., Soorholtz, M., Bilk, M., & Schüth, F. (2016). Selective Methane Oxidation Catalyzed by Platinum Salts in Oleum at Turnover Frequencies of Large-Scale Industrial Processes. *ACS Publications*, 12395–12400.
- Zsinka, V., Tarcsay, B. L., & Miskolczi, N. (2024). Determination of Kinetic and Thermodynamic Parameters of Biomass Gasification with TG-FTIR and Regression Model Fitting. *Energies*, 17(8). <https://doi.org/10.3390/en17081875>