

PENGARUH VARIASI DAYA GELOMBANG MIKRO TERHADAP PRODUKSI PIROLISIS BIOMASSA TEMPURUNG KELAPA DENGAN KATALIS ZEOLIT

Mochammad Firdaus Abadi¹, Ena Marlina², Artono Raharjo³.

^{1, 2, 3}) Universitas Islam Malang

email: firdausabadi294@gmail.com; enamarlina@unisma.ac.id; artonor@unisma.ac.id

ABSTRAK

Kehidupan masyarakat Indonesia sangat bergantung pada konsumsi bahan bakar fosil untuk transportasi dan industri, sementara cadangan bahan bakar fosil semakin menipis dan berpotensi habis. Sebagai alternatif, biomassa, seperti tempurung kelapa, dapat dimanfaatkan sebagai sumber bahan bakar yang berkelanjutan. Salah satu cara untuk mengubah biomassa menjadi bahan bakar terbarukan adalah melalui proses pirolisis dengan bantuan gelombang mikro. Pirolisis adalah proses dekomposisi termal biomassa tanpa adanya gas O_2 dalam reaktor, menghasilkan produk berupa minyak, arang, dan gas yang tidak terkondensasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi daya gelombang mikro terhadap hasil produksi pirolisis. Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan campuran tempurung kelapa dan zeolit dengan berat 50gram. Variasi daya gelombang mikro yang digunakan adalah 400, 600, dan 800watt, dengan waktu pirolisis 30 menit. Proses pirolisis dilakukan dengan bantuan pompa vakum untuk menghilangkan kandungan gas O_2 . Hasil penelitian menunjukkan bahwa produksi minyak dan gas meningkat seiring dengan naiknya variasi daya, sementara produksi arang menurun. Daya gelombang mikro yang paling efektif untuk menghasilkan minyak adalah 800watt, dengan rendemen minyak sebesar 29,54%. Hal ini disebabkan semakin besar daya, yang menghasilkan frekuensi gelombang mikro yang lebih tinggi. Getaran ini memengaruhi kecepatan pergerakan molekul dalam biomassa, menghasilkan panas yang lebih intensif, dan mempercepat ekstraksi minyak.

Kata kunci: Pirolisis gelombang mikro; tempurung kelapa; zeolit; produksi pirolisis; biomassa, energi terbarukan.

ABSTRACT

The life of Indonesian society is highly dependent on the consumption of fossil fuels for transportation and industry, while fossil fuel reserves are increasingly depleting and have the potential to run out. As an alternative, biomass, such as coconut shell, can be utilized as a sustainable fuel source. One method to convert biomass into renewable fuel is through by microwave assisted pyrolysis. Pyrolysis is a thermal decomposition process of biomass in the absence of O_2 gas in the reactor, producing products such as oil, charcoal, and non-condensable gas. This study aims to analyze the effect of varying microwave power on the pyrolysis production yield. The research was conducted experimentally using a mixture of coconut shell and zeolite weighing 50 grams. The microwave power variations used were 400, 600, and 800watt, with a pyrolysis duration of 30 minutes. The pyrolysis process was carried out with the assistance of a vacuum pump to eliminate O_2 gas. The results of this study show that the production of oil and gas increases as the microwave power increases, while the production of charcoal decreases. The most effective microwave power for producing oil is 800 watt, with an oil yield of 29.54%. This is because the higher the power, the higher the frequency of the microwave waves. This vibration affects the movement speed of molecules in the biomass, generating more intense heat, thus accelerating the oil extraction process.

Keyword: Microwave assisted pyrolysis; coconut shell; zeolit; pyrolysis production; biomass, renewable energy.

PENDAHULUAN

Pemenuhan kebutuhan bahan bakar minyak di Indonesia tidak lepas dari konsumsi bahan bakar fosil yang digunakan untuk transportasi maupun industri manufaktur sebagai bahan bakar utama, sedangkan persediaan energi fosil sudah mulai menipis bahkan berpotensi habis. Selain itu, konsumsi energi bahan bakar fosil yang berkelanjutan dapat menimbulkan efek gas rumah kaca [1][2].

Pemerintah Indonesia berkomitmen untuk menurunkan emisi gas rumah kaca dengan memanfaatkan bahan baku hasil perkebunan guna mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, sehingga dapat mengurangi dampak emisi gas buang yang tinggi [3][4][5]. *Bio-oil* adalah sumber energi alternatif yang ramah lingkungan sebagai pengganti energi fosil. *Bio-oil* berperan dalam mendukung ketersediaan energi terbarukan [6].

Biomassa dihasilkan dari limbah perkebunan dari tanaman budidaya, seperti tempurung kelapa, sekam, jerami maupun dedaunan. Indonesia merupakan negara tropis yang banyak ditanami pohon kelapa oleh petani maupun masyarakat umum untuk dimanfaatkan buahnya [7]. Pemanfaatan limbah dari buah kelapa belum optimal khususnya tempurung kelapa yang jarang diolah untuk bahan bakar minyak [8][9]. Kandungan kimia yang terkandung dalam tempurung kelapa yakni lignin 30-40%, hemiselulosa 25-30%, dan selulosa 25-30% [10]. Kandungan kimia tersebut digunakan sebagai bahan alternatif untuk mengubah biomassa menjadi *bio-oil* melalui metode pirolisis. Untuk mempercepat laju reaksi termal dan menurunkan energi aktivasi, digunakan katalis zeolit [11].

Pirolisis adalah proses dekomposisi termal biomassa tanpa adanya gas O_2 di reaktor dengan menggunakan temperatur yang sudah ditentukan [12]. Proses ini menyebabkan penguraian dan penguapan biomassa, menghasilkan produk berupa *liquid*, *char*, dan *gas*[13]. Teknologi pirolisis dengan bantuan gelombang mikro adalah teknologi pirolisis modern yang

sedang berkembang saat ini dikarenakan efisiensi perpindahan panas yang efektif dan merata.

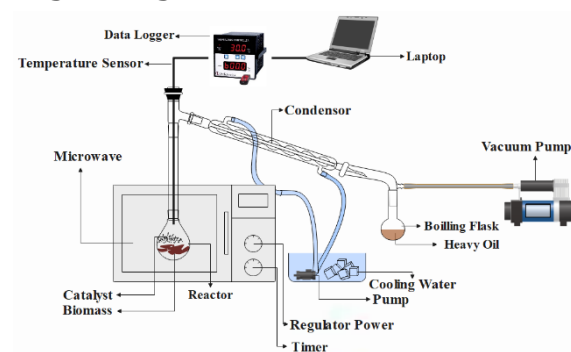
Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, penelitian ini akan mengkaji hasil produksi proses pirolisis biomassa tempurung kelapa dan katalis zeolit, dengan bantuan pemanasan gelombang mikro. Tempurung kelapa dipilih sebagai bahan baku karena memiliki potensi tinggi untuk diolah menjadi bahan bakar terbarukan. Proses pirolisis berbantuan gelombang mikro merupakan salah satu alternatif yang berkembang saat ini untuk mengubah biomassa menjadi energi terbarukan.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang diterapkan dalam studi ini adalah metode eksperimen (*experimental research*). Penelitian ini menggunakan campuran tempurung kelapa sebanyak 90% dan katalis zeolit 10% dari 50gram, dengan ukuran 18 mesh. Variasi daya microwave yang digunakan adalah 400watt, 600watt, dan 800watt. Proses pirolisis dilakukan selama 30 menit. Pompa vakum dengan tekanan 0,08 MPa digunakan selama proses pirolisis untuk menghilangkan kandungan gas O_2 .

Variabel penelitian yang diamati adalah rendemen produk, temperatur akhir pirolisis, kesetimbangan energi produksi pirolisis dan visualisasi *heavy oil*.

INSTALASI PENELITIAN



Gambar 1. Instalasi Microwave Assisted Pyrolysis

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil penelitian *microwave assisted pyrolysis* maka di dapatkan data sebagai berikut:

1. Hasil Produksi Pirolisis

Data yang ditampilkan meliputi rendemen *liquid*, *char*, dan gas untuk setiap kondisi daya yang diuji. Hasil persentase produksi pirolisis pada penelitian ini menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Liquid\%} = \frac{\text{massa liquid}}{\text{massa bahan baku}} \times 100 \dots \dots \dots (1)[14]$$

$$\text{Char\%} = \frac{\text{massa char}}{\text{massa bahan baku}} \times 100 \dots \dots \dots (2)[14]$$

$$\text{Gas\%} = 100 - (\% \text{ liquid} + \% \text{ char}) \dots \dots \dots (3)[14]$$

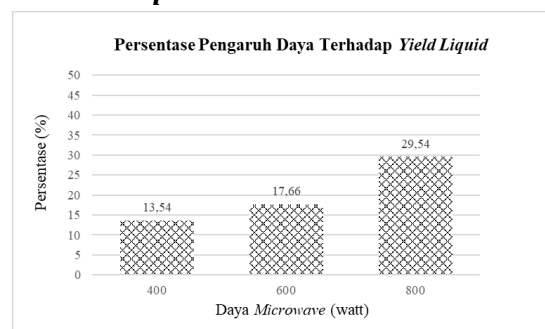
Tabel 1. Hasil produksi pirolisis

Daya (watt)	Liquid (gr)	Char (gr)	Liquid (%)	Char (%)	Gas (%)
400	6,77	38,87	13,54	77,74	8,72
600	8,83	36,47	17,66	72,92	9,42
800	14,77	30,12	29,54	60,24	10,22

Pada tabel 1 menunjukkan rendemen produk pirolisis *liquid*, *char*, dan gas pada masing-masing variasi daya *microwave*. *Liquid* tertinggi di dapatkan pada daya 800 watt dan *liquid* terendah pada daya 400 watt. Hal ini dikarenakan semakin tingginya daya *microwave* laju pemanasan akan semakin tinggi dan berpengaruh terhadap hasil produk *liquid*, tetapi berbanding terbalik pada hasil produk *char*. Ketika laju pemanasan dinaikkan maka hasil padatan pada proses pirolisis akan menurun dapat dilihat pada tabel 1. Hasil *char* terendah pada daya 800 watt, sedangkan hasil *char* tertinggi didapatkan pada 400 watt. Hal ini disebabkan semakin tinggi daya *microwave* maka semakin tinggi pula temperatur pirolisis, yang mengakibatkan semakin banyak biomassa yang terurai menjadi uap. Uap hasil pembakaran akan terkondensi menjadi *liquid*. Di sisi lain, kapasitas *boiling flask* dan instalasi pipa pirolisator tidak mampu menampung kenaikan hasil uap/gas pada daya tinggi, hal ini menyebabkan kenaikan jumlah produk gas yang tidak terkondensasi di setiap kenaikan variabel daya *microwave*.

Penambahan katalis zeolit memengaruhi hasil produk pirolisis. Hal ini terjadi karena katalis menurunkan energi aktivasi, yang mempercepat laju reaksi dan meningkatkan pembentukan produk.

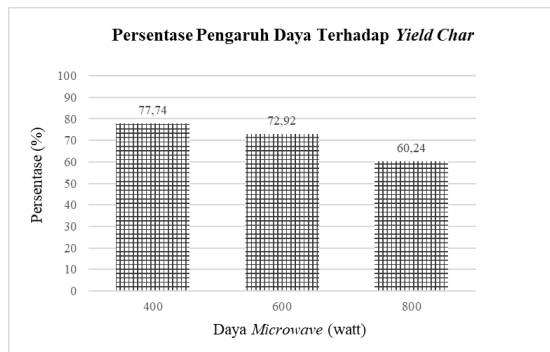
a. Persentase Pengaruh Daya Terhadap Yield Liquid



Gambar 2. Grafik Persentase pengaruh daya terhadap *yield liquid*

Pada gambar 2 menunjukkan bahwa pada proses pirolisis menghasilkan jumlah produk *liquid* dalam persentase yang terus mengalami kenaikan di masing-masing variasi daya yang digunakan. Hal ini disebabkan oleh semakin tingginya variasi daya, yang menghasilkan efek getaran gelombang mikro yang lebih kuat pada komponen biomassa. Kecepatan gesekan atau getaran antar molekul biomassa ini yang kemudian menyebabkan kenaikan temperatur biomassa di dalam reaktor, sehingga berpengaruh pada proses keluarnya uap dari biomassa. Pemanasan berlangsung semakin cepat karena gelombang yang dipancarkan dapat langsung diserap oleh biomassa, sehingga laju penguraian dan penguapan senyawa-senyawa organik pada biomassa meningkat.

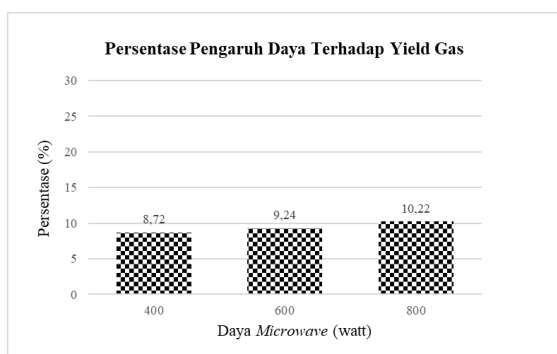
b. Persentase Pengaruh Daya Terhadap Yield Char



Gambar 3. Persentase Pengaruh Daya Terhadap Yield Char

Gambar 3 menunjukkan bahwa parameter utama yang memengaruhi persentase produk *char* hasil pirolisis adalah daya *microwave*. Daya *microwave* berkaitan erat dengan temperatur, karena daya yang lebih tinggi akan meningkatkan temperatur. Semakin tinggi daya *microwave* yang digunakan, semakin banyak biomassa yang terdekomposisi, sehingga produk akhir berupa *char* menurun akibat meningkatnya pelepasan gas dari biomassa. Ketika daya meningkat, molekul biomassa memperoleh energi yang lebih tinggi. Hal ini menyebabkan massa *char* yang terbentuk semakin menurun karena biomassa kehilangan massanya selama proses pirolisis.

c. Persentase Pengaruh Daya Terhadap Yield Gas

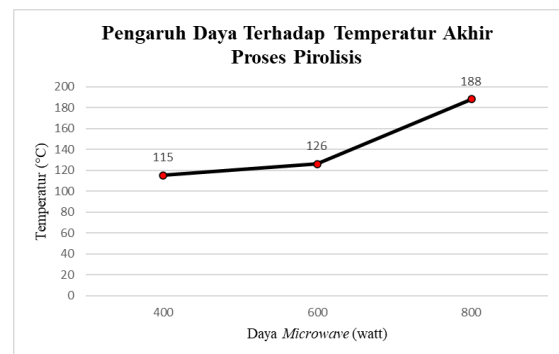


Gambar 4. Persentase Pengaruh Daya Terhadap Yield Gas

Dapat dilihat pada Gambar 4 bahwa persentase hasil produksi gas pada proses pirolisis berbasis gelombang mikro meningkat seiring dengan kenaikan daya. Pada proses pirolisis menggunakan

gelombang mikro, gas dihasilkan ketika energi panas dari gelombang mikro dipancarkan ke biomassa. Daya yang lebih tinggi akan memicu reaksi kimia yang lebih intensif, sehingga meningkatkan konversi biomassa menjadi gas. Gas yang dihasilkan merupakan hasil proses dekomposisi termal dari biomassa dan akan terkondensasi menjadi *liquid* pada kondensor dengan temperatur yang rendah, sedangkan gas yang tidak terkondensasi akan tetap menjadi gas [15]. Peningkatan hasil gas juga dapat disebabkan oleh efisiensi pendingin kondensor yang kurang optimal, sehingga uap gas tidak dapat terkondensasi secara maksimal.

2. Pengaruh Daya Terhadap Temperatur Akhir Proses Pirolisis



Gambar 5. Pengaruh Daya Terhadap Temperatur Akhir Proses Pirolisis

Dapat di lihat pada Gambar 5. Perbedaan temperatur ditunjukkan pada akhir proses pirolisis, grafik tersebut menggambarkan hubungan antara daya *microwave* yang digunakan dalam proses pirolisis dan temperatur akhir yang dicapai di akhir proses. Laju pemanasan akan cenderung naik seiring dengan naiknya variasi daya *microwave* [16]. kenaikan temperatur pada proses pirolisis akibat dari kemampuan biomassa untuk menyerap energi dari gelombang mikro. Semakin besar daya maka semakin besar energi yang diterima biomassa didalam reaktor untuk dirubah menjadi panas. Kondisi kekeringan biomassa juga akan berpengaruh pada temperatur pirolisis, semakin kering biomassa maka semakin cepat pula proses pemanasan pada saat proses pirolisis

berlangsung sehingga temperatur akan cepat naik.

Temperatur pada proses pirolisis diukur menggunakan *thermocouple* yang tersambung pada *data logger*. Problem yang timbul pada pengukuran temperatur ini ketika terjadi penembakan gelombang mikro di dalam *microwave*, *thermocouple* yang berbahan logam yang di masukkan dalam reaktor (*boiling flask*) yang ada di dalam *microwave* akan menangkap gelombang sebagaimana layaknya sebuah antena. Hal ini tidak diinginkan karena dapat menyebabkan percikan energi listrik dari pemancar gelombang mikro. Energi gelombang mikro yang terfokus pada logam tersebut dapat memicu panas berlebih di dalam *boiling flask*, yang berpotensi menyebabkan *boiling flask* pecah atau retak. Untuk mengatasi masalah ini, pengukuran temperatur dapat dilakukan pada akhir proses pirolisis, setelah *microwave* dimatikan. Proses pengukuran dimulai dengan *data logger* mencatat hasil temperatur akhir di dalam *boiling flask*.

3. Analisis Kesenimbangan Energi

Keseimbangan energi dalam proses *microwave* pirolisis adalah konsep penting yang menghubungkan energi daya *microwave* yang masuk ke sistem dengan energi yang dihasilkan oleh produksi dan yang hilang selama proses pirolisis [17]. Keseimbangan energi dapat di hitung dengan rumus berikut:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \dots\dots\dots(4) [18]$$

Tabel 2. Specific Heat Capacity

Sampel	Specific Heat Capacity (kJ/kg K)	Sumber
Tempurung Kelapa	1,7	[19]
Liquid	3,0	[20]
Char	1,3	[20]
Gas	0,8	[21]

Pada penelitian yang sudah dilakukan, terdapat *lost energy* pada saat proses pirolisis. Sehingga, diperoleh data hasil perhitungan sebagai berikut:

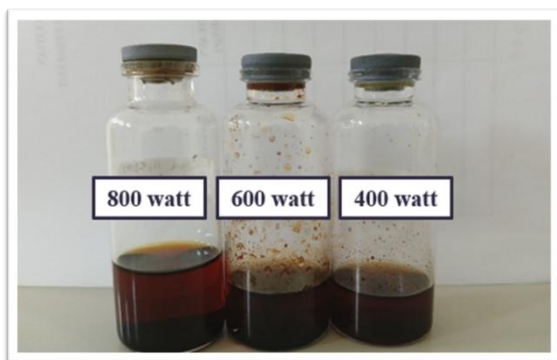
Tabel 3. Hasil Perhitungan Keseimbangan Energi

Daya (watt)	E_{in} (kJ)	E_{out}			E_{total} (kJ)	Energy Losses (kJ)
		Liquid (kJ)	Char (kJ)	Gas (kJ)		
400	720	172,03	428,02	29,54	629,59	90,41
600	1080	317,51	602,39	47,77	967,67	112,33
800	1440	669,83	663,34	69,25	1402,42	37,58

Pada proses *microwave assisted pyrolysis*, sebagian energi yang disuplai dari gelombang mikro tidak sepenuhnya terkonversi menjadi energi dalam produk pirolisis. Salah satu sumber kehilangan energi (*energy lost*) dalam proses pirolisis dengan jenis kondensor spiral adalah *liquid* hasil pirolisis yang tertinggal di dalam kondensor spiral. Hal ini terjadi karena desain kondensor yang memungkinkan *liquid* menempel di permukaan dalam kondensor, sehingga tidak dapat terkumpul sepenuhnya dan ditimbang secara akurat. *liquid* yang tidak terhitung massanya tersebut masih mengandung energi, tetapi tidak tercatat sebagai bagian dari hasil energi yang dihitung karena sedikitpun *liquid* yang tertinggal, pada penelitian berbasis laboratorium ini sangat berpengaruh ke hasil nilai akhir produk, sehingga meningkatkan estimasi *energy lost* secara keseluruhan.

Selain itu, penyebab *energy lost* dalam proses pirolisis dengan bantuan vakum adalah gas atau hasil penguapan biomassa pada proses pirolisis yang tersedot ke sistem vakum sebelum sempat terkondensasi menjadi *liquid*. Yang kemungkinan gas keluar dari sistem kondensasi sebelum berubah menjadi fase *liquid*. Akibatnya, jumlah *liquid* yang dihasilkan berkurang, dan sebagian besar energi yang terkandung dalam gas tersebut hilang tanpa tercatat sebagai produk. Kejadian ini tidak hanya memengaruhi efisiensi hasil *liquid*, tetapi juga menurunkan akurasi perhitungan keseimbangan energi.

4. Visualisasi Heavy Oil



Gambar 6. Visualisasi Heavy Oil

Gambar 6. menunjukkan visualisasi *heavy oil* hasil *microwave assisted pyrolysis* pada daya 800watt dapat dilihat warna *heavy oil* terlihat berwarna coklat bening sedangkan pada daya 600watt dan 400watt secara fisik dari warna *heavy oil* sekilas memiliki kesamaan dan tanpa perbedaan warna yang signifikan, terlihat berwarna hitam pekat. Hal ini dikarenakan masih terdapat banyak ampas atau residu hasil pirolisis yang tercampur pada *liquid* yang dihasilkan. Hasil analisa visualisasi produk *heavy oil* terlihat dari visualisasi warna ketiga tampilan hampir tidak ada perbedaan yang signifikan, perbedaan yang terlihat jelas adalah dari segi kuantitas. Visualisasi membantu dalam mengamati struktur fisik *heavy oil*, karena *heavy oil* lebih kental dibanding minyak ringan, laju penguapannya rendah dan tingkat reaktivitas rantai hidrokarbon tak jenuhnya tinggi [22], sehingga sulit diekstraksi dan diproses. Memahami karakteristik *heavy oil* dapat membantu dalam memilih metode penanganan dan pemrosesan yang tepat untuk pengolahan atau pemurniannya. Proses kimia untuk mengubah menjadi *biofuel* diperlukan untuk meningkatkan kinerja bahan bakar seperti menambahkan aditif kimia [23].

KESIMPULAN

1. Pengaruh daya terhadap produksi hasil pirolisis dengan pemanas gelombang mikro yaitu *yield liquid* dan *yield gas* semakin meningkat seiring naiknya variasi daya, dan

yield char semakin menurun seiring naiknya variasi daya.

2. Daya *microwave* dan temperatur memiliki hubungan yang saling berkaitan. Semakin besar daya yang digunakan, maka semakin tinggi pula temperatur yang dihasilkan.
3. Daya 800watt menghasilkan *energy lost* paling kecil, menunjukkan proses pirolisis yang lebih efisien dibandingkan daya lainnya.
4. Visualisasi *heavy oil* sekilas memiliki kesamaan. hal ini dikarenakan masih terdapat banyak residu atau ampas hasil pirolisis yang dihasilkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada keluarga tercinta atas dukungan dan motivasinya, serta kepada Ibu Dr. Ena Marlina, S.T., M.T., Bapak Artono Raharjo, S.T., M.T., dan Bapak Akhmad Faruq Alhikami, S.T., M.Sc. atas bantuan materi dan teori. Tidak lupa, penulis juga berterima kasih kepada teman-teman penelitian yang selalu memberikan dukungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Marlina, S. Wahyudi, and L. Yulianti, "Produksi Brown's Gas Hasil Elektrolisis H₂O Dengan Katalis NaHCO₃," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 4, no. 1, pp. 53–58, 2013.
- [2] A. E. Setyono and B. F. T. Kiono, "Dari Energi Fosil Menuju Energi Terbarukan: Potret Kondisi Minyak dan Gas Bumi Indonesia Tahun 2020 – 2050," *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 2, no. 3, pp. 154–162, Oct. 2021, doi: 10.14710/jebt.2021.11157.
- [3] Kementerian ESDM, "Berkat Biodiesel, Emisi Turun 27,8 Juta CO₂e Sepanjang 2022," Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral.

- [4] X. Zou, P. Debiagi, M. A. Amjed, M. Zhai, and T. Faravelli, "Impact of high-temperature biomass pyrolysis on biochar formation and composition," *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 179, May 2024, doi: 10.1016/j.jaap.2024.106463.
- [5] A. J. Chapman, B. C. McLellan, and T. Tezuka, "Prioritizing mitigation efforts considering co-benefits, equity and energy justice: Fossil fuel to renewable energy transition pathways," *Appl Energy*, vol. 219, pp. 187–198, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.054.
- [6] E. Marlina, W. Wijayanti, L. Yulianti, and I. N. G. Wardana, "The role of 1.8-cineole addition on the change in triglyceride geometry and combustion characteristics of vegetable oils droplets," *Fuel*, vol. 314, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.122721.
- [7] I. Marwanza, M. A. Azizi, C. Nas, S. Patian, W. Dahani, and R. Kurniawati, "Pemanfaatan Briket Arang Tempurung Kelapa Sebagai Bahan Bakar Alternatif Di Desa Banjar Wangi, Pandeglang, Provinsi Banten," *Jurnal Abdimas dan Kearifan Lokal*, vol. 02, no. 01, 2021.
- [8] K. K. Kuok, P. C. Chiu, Md. R. Rahman, M. Y. Chin, and M. K. Bin Bakri, "Sustainable bamboo and coconut shell activated carbon for purifying river water on Borneo Island," *Waste Management Bulletin*, vol. 2, no. 1, pp. 39–48, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.wmb.2023.12.008.
- [9] F. Imansyah, "Pemanfaatan Asap Cair Limbah Serabut Dan Tempurung Kelapa Sebagai Pestisida Organik Di Dusun Makmur Desa Sungai Kupah," *Jurnal Abdi Insani*, vol. 11, no. 1, pp. 934–945, Mar. 2024, doi: 10.29303/abdiinsani.v11i1.1470.
- [10] P. L. W. Kanga *et al.*, "Physical and energetic characteristics of pellets produced from Movingui sawdust, corn spathes, and coconut shells," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 1291–1301, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.01.006.
- [11] M. Jahiding, I. Usman, Ratih Samsusih Rizki, Haryani, and Mashuni, "Pengaruh Kosentrasi Zeolit Terhadap Kualitas Bio-Oil Yang Diproduksi dari Limbah Sabut Kelapa Muda (*Cocos nucifera*) Menggunakan Metode Pirokatalitik," *Gravitasi*, vol. 19, no. 2, pp. 29–35, Dec. 2020, doi: 10.22487/gravitasi.v19i2.15359.
- [12] W. Xie *et al.*, "Fast pyrolysis of biomass with diverse properties to produce liquid hydrogen storage molecules," *Carbon Capture Science and Technology*, vol. 12, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.ccst.2024.100230.
- [13] A. Mlonka-Mędrala, P. Evangelopoulos, M. Sieradzka, M. Zajemska, and A. Magdziarz, "Pyrolysis of agricultural waste biomass towards production of gas fuel and high-quality char: Experimental and numerical investigations," *Fuel*, vol. 296, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.120611.
- [14] V. Aswie, L. Qadariyah, and M. Mahfud, "Kinetics and Characterization of Microalgae Biofuel by Microwave-assisted Pyrolysis Using Activated Carbon," *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 54, no. 2, Mar. 2022, doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.2.7.

- [15] K. Azizi, M. Keshavarz Moraveji, and H. Abedini Najafabadi, "A review on bio-fuel production from microalgal biomass by using pyrolysis method," Feb. 01, 2018, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2017.10.033.
- [16] N. Kartika Erliyanti and E. Rosyidah, "Pengaruh Daya Microwave Terhadap Yield Pada Ekstraksi Minyak Atsiri Dari Bunga Kamboja (Plumeria Alba) Menggunakan Metode Microwave Hydrodistillation," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 8, no. 3, pp. 175–178, 2017.
- [17] B. Qu *et al.*, "Fast pyrolysis kinetics of waste tires and its products studied by a wireless-powered thermo-balance," *J Hazard Mater*, vol. 460, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.132494.
- [18] T. Arfandi, B. tulus Sitorus, H. Ambarita, H. F. Napitupulu, and D. Nasution, "Pengujian Kemampuan Adsorpsi Dari Adsorber Karbon Aktif Dan Alumina Aktif Yang Digunakan Untuk Mesin Pendingin Tenaga Surya," *Jurnal Dinamis*, vol. 5, no. 3, pp. 82–90, 2017.
- [19] J. Dirisu *et al.*, "Characterization of Selected Biomass Materials as Potential Additives for Developing an Eco-friendly Ceiling Composite," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 13, no. 8, pp. 2023–2029, 2020, [Online]. Available: <http://www.irphouse.com>
- [20] L. Björnsson, M. Pettersson, P. Börjesson, P. Ottosson, and C. Gustavsson, "Integrating bio-oil production from wood fuels to an existing heat and power plant - evaluation of energy and greenhouse gas performance in a Swedish case study," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 48, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101648.
- [21] B. G. Kyle, "Chemical and Proces Thermodynamics," *Tables of thermal properties of gases*, 1983.
- [22] E. Marlina, W. Wijayanti, L. Yuliaty, and I. N. G. Wardana, "The role of pole and molecular geometry of fatty acids in vegetable oils droplet on ignition and boiling characteristics," *Renew Energy*, vol. 145, pp. 596–603, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.06.064.
- [23] E. Marlina, A. F. Alhikami, B. Waluyo, S. Rahima Sahwahita, and I. N. G. Wardana, "A study of blending carbon nanoparticles made of coconut shell (fullerene C60) in vegetable oils on the droplet evaporation characteristics," *Fuel*, vol. 346, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2023.128319.