

PENGARUH VARIASI DAYA GELOMBANG MIKRO TERHADAP PRODUKSI PIROLISIS BIOMASSA BUAH PINUS DENGAN KATALIS ZEOLIT

Muhammad Fatikh Aswad¹, Ena Marlina², Nur Robbi³.

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

email: mhmmdfatikh@gmail.com; enamarlina@unisma.ac.id; nurrobby@unisma.ac.id

ABSTRAK

Kebutuhan energi yang terus meningkat berbanding terbalik dengan cadangannya yang kian menipis, disisi lain banyaknya sumber energi yang belum dioptimalkan khususnya dalam segi energi biomassa. Biomassa limbah buah pinus, merupakan potensi besar sebagai sumber energi alternatif. Tujuan penelitian ini, untuk mengetahui pengaruh variasi daya gelombang mikro pada proses pirolisis buah pinus menggunakan katalis zeolit untuk menghasilkan heavy oil. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan persentase biomassa 90% dan katalis 10%, serta variasi daya microwave 400, 600, dan 800 watt selama 30 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan daya berbanding lurus dengan produksi yield liquid, dimana pada daya 800 watt, yield liquid mencapai 19,74%. Sebaliknya, yield char menurun seiring dengan peningkatan daya, yield char tertinggi tercatat sebesar 73,50% pada daya 400 watt. Temperatur akhir pirolisis juga meningkat seiring dengan peningkatan daya, mencapai 136,48°C pada daya 800 watt. Proses pirolisis ini menghasilkan produk liquid dengan warna yang lebih jernih pada daya rendah dibandingkan dengan daya tinggi. Kesetimbangan energi menunjukkan adanya kehilangan energi yang cukup besar dikarenakan beberapa faktor. Temuan ini menegaskan bahwa penggunaan teknologi microwave dalam pirolisis tidak hanya meningkatkan efisiensi produksi heavy oil tetapi juga memberikan alternatif untuk mengurangi limbah organik dari buah pinus. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi metode pembelajaran serta referensi dalam pengembangan teknologi pirolisis biomassa sebagai solusi energi berkelanjutan di Indonesia.

Kata Kunci: Pirolisis, Biomassa, Buah Pinus, Microwave Assisted Pyrolysis, Energi Terbarukan

ABSTRACT

The increasing energy demand is inversely proportional to the depleting reserves, while on the other hand, many energy sources, particularly biomass energy, have not been fully optimized. Pine fruit biomass waste presents a significant potential as an alternative energy source. The aim of this study is to investigate the effect of microwave power variations in the pyrolysis process of pine fruit using zeolite catalyst to produce heavy oil. The method used is experimental, with a biomass percentage of 90% and catalyst of 10%, and microwave power variations of 400, 600, and 800 watts for 30 minutes. The results show that increasing power is directly proportional to the liquid yield production, with 800 watts resulting in a liquid yield of 19.74%. In contrast, the char yield decreases as power increases, with the highest char yield recorded at 73.50% at 400 watts. The final pyrolysis temperature also increases with the power increase, reaching 136.48°C at 800 watts. This pyrolysis process produces liquid products with clearer color at lower power compared to higher power. The energy balance indicates significant energy loss due to several factors. These findings highlight that the use of microwave technology in pyrolysis not only increases heavy oil production efficiency but also provides an alternative for reducing organic waste from pine fruit. This study is expected to serve as a learning method and reference in the development of biomass pyrolysis technology as a sustainable energy solution in Indonesia.

Keyword: Pyrolysis, Biomass, Pine Fruit, Microwave-Assisted Pyrolysis, Renewable Energy

PENDAHULUAN

Kebutuhan dan konsumsi energi terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan populasi dan pertumbuhan perekonomian masyarakat. Di Indonesia, konsumsi energi terfokus kepada penggunaan bahan bakar minyak, yang cadangannya kian menipis. Sementara itu, terdapat potensi besar energi biomassa yang cukup melimpah, namun belum dapat dimanfaatkan secara optimal [1].

Biomassa sangat mudah ditemukan diantaranya dari limbah hasil pertanian, perkebunan, peternakan, serta macam-macam limbah organik lainnya. Salah satu contoh pemanfaatan energi biomassa yang berasal dari limbah kehutanan adalah limbah buah pinus [2]. Sampah organik, seperti buah pinus, merupakan limbah hutan yang mudah dimanfaatkan. Buah pinus dapat diharapkan menjadi solusi untuk mengurangi limbah organik dengan mengolahnya menjadi bahan bakar cair sebagai sumber energi alternatif [3]. Buah pinus memiliki kandungan kandungan lignin sekitar 44-53%, selulosa sekitar 25-26%, serta hemiselulosa sekitar 18-19% [4].

Pirolisis biomassa merupakan sumber energi terbarukan yang dapat menghasilkan bahan bakar dan pengganti petrokimia secara berkelanjutan. Proses pirolisis berpotensi mengurangi ketergantungan pada cadangan bahan bakar fosil [5]. Pirolisis adalah salah satu teknologi alternatif yang digunakan untuk menghasilkan sumber energi hidrokarbon. Teknologi ini merupakan proses pembakaran yang dilakukan tanpa melibatkan O₂ [6]. Produk hasil dari proses pembakaran pirolisis berupa bio-arang dan asap cair [7]. Asap cair adalah cairan berwarna kehitaman yang dihasilkan dari biomassa melalui proses pirolisis. Asap cair mengandung karbon, hidrogen, serta oksigen [8]. Pemanfaatan produk *liquid* dari proses pirolisis salah satunya untuk campuran bahan bakar biodiesel. Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif dan ramah lingkungan yang akan turut serta

meningkatkan penyediaan energi terbarukan [9].

Microwave assisted pyrolysis (MAP), yaitu ditandai dengan panas yang dihasilkan di dalam material dan dipindahkan ke luar. Hal ini membuat pemanasan lebih seragam dan meningkatkan kualitas produk. Selain itu iradiasi gelombang mikro tidak dilakukan dengan menggunakan sumber panas eksternal. Pemanasan melalui iridiasi gelombang mikro memiliki keunggulan dibandingkan metode pemanasan konvensional, seperti pemanasan internal yang seragam dan lebih cepat, kemudahan pengoperasian dan pemeliharaan, tidak membutuhkan penggilingan bahan baku, dan biaya energi yang lebih rendah [10].

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, peneliti melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi daya gelombang mikro pada proses *microwave assisted pyrolysis* terhadap hasil produk *heavy oil* yang dihasilkan, pemilihan bahan baku buah pinus dikarenakan kandungan hemiselulosa serta lignin yang cukup tinggi sebagai bahan dasar produksi *heavy oil*. Penggunaan *microwave* terhadap proses pirolisis juga mendukung keefektifan penelitian serta menghasilkan produk yang lebih berkualitas, penggunaan gelombang mikro pada proses pemanasan mengakibatkan pemanasan yang lebih merata dan produksi semakin meningkat.

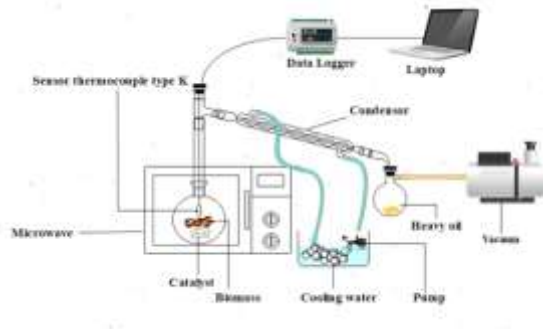
METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental (*experimental research*). Penelitian ini menggunakan persentase biomassa buah pinus 90% dan katalis zeolit 10% dari total berat bahan baku 50 gram, dengan ukuran 18 mesh. Variasi daya *microwave* yang digunakan sebesar 400 watt, 600 watt dan 800 watt, dengan waktu pirolisis selama 30 menit. Penggunaan alat vakum dengan tekanan 0,08 Mpa yang bertujuan untuk

menghilangkan kadar gas O₂ serta menunjang keefektifan laju asap cair.

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

INSTALASI PENELITIAN



Gambar 1 Instalasi Alat *Microwave Assisted Pyrolysis*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil penelitian *microwave assisted pyrolysis* didapatkan data sebagai berikut:

1. Data Hasil Produksi Pirolisis

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

$$\text{Liquid\%} = \frac{\text{massa liquid}}{\text{massa bahan baku}} \times 100 \dots \dots \dots (1) [11]$$

$$\text{Char\%} = \frac{\text{massa char}}{\text{massa bahan baku}} \times 100 \dots \dots \dots (2) [11]$$

$$\text{Gas\%} = 100 - (\% \text{ liquid} + \% \text{ char}) \dots \dots \dots (3) [11]$$

Tabel 1 Data Hasil Produksi Pirolisis

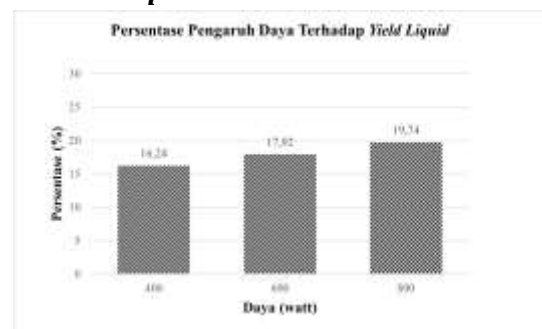
Daya (watt)	Liquid (gr)	Char (gr)	Liquid (%)	Char (%)	Gas (%)
400	8,12	36,75	16,24	73,50	10,26
600	8,96	35,16	17,92	70,32	11,76
800	9,87	33,41	19,74	66,82	13,44

Pada tabel 1 data hasil *Microwave Assisted Pyrolysis* biomassa buah pinus menunjukan tingkat produksi *liquid* tertinggi terjadi pada proses pirolisis variasi daya 800 watt, didapatkan persentase 19,74% dengan berat sebesar 9,87 gram. Hal ini disebabkan karena laju pemanasan

sangat berpengaruh terhadap produksi *liquid* dan berbanding terbalik dengan produksi *char* yang paling rendah dengan persentase 66,82% seberat 33,41 gram. Hasil yang didapatkan dari proses pirolisis 800 watt berbanding terbalik dengan proses pirolisis 400 watt yang mendapatkan hasil paling rendah, dengan perolehan persentase *liquid* 16,24% dengan berat sebesar 8,12 gram.

Hasil pirolisis melibatkan banyak parameter yang perlu dipertimbangkan, diantaranya adalah jenis komposisi biomassa, *pretreatment* biomassa, ukuran partikel bahan, kadar air, temperatur, laju pemanasan (*heating rate*), laju aliran gas (*flowrate*), waktu tinggal (*residence time*), jenis proses pirolisis, serta tipe reaktor [12]. Kenaikan suhu menunjukkan kemampuan bahan dan pelarut dalam menyerap energi dari gelombang mikro. Kemampuan ini diukur dengan konstanta dielektrik, yang menunjukkan seberapa baik bahan dapat menyerap gelombang mikro. Semakin besar daya yang diterapkan, semakin besar energi yang diserap oleh bahan untuk dirubah menjadi panas, sehingga *yield* minyak semakin besar [13].

a. Persentase Pengaruh Daya terhadap Yield Liquid

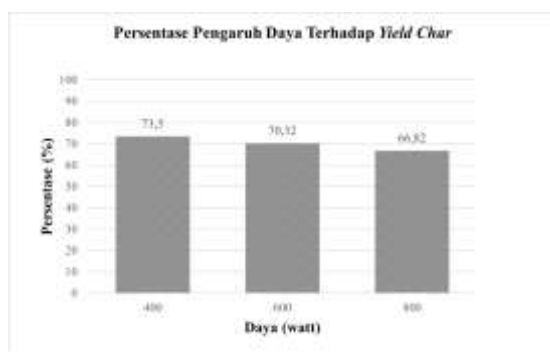


Gambar 2 Persentase Pengaruh Daya terhadap Yield Liquid

Gambar 2, menunjukan bahwa proses pirolisis yang berlangsung dengan waktu selama 30 menit, menghasilkan produk *liquid* dalam persentase yang terus mengalami peningkatan disetiap daya yang meningkat. Berdasarkan pada diagram diatas, hasil produksi *liquid* tertinggi terdapat pada variasi daya 800 watt dengan

persentase *liquid* sebesar 19,74%. Pada proses pirolisis dengan variasi daya yang tinggi, akan mengakibatkan frekuensi gelombang mikro yang tinggi juga, hal itu memicu pemanasan pada biomassa akan semakin cepat. Dengan pemanasan yang cepat, biomassa akan cepat terbakar dan mengalami penguapan yang menghasilkan *liquid smoke*. *Liquid smoke* yang dihasilkan dari pembakaran biomassa akan terkondensasi yang menghasilkan produk *liquid*. Kenaikan suhu dan waktu akan meningkatkan rendemen asap cair hingga mencapai titik dimana produksi gas yang sulit terkondensasi semakin besar, sehingga menurunkan rendemen asap cair [14]. Hasil yang diperoleh dari variasi daya 400 watt berbanding terbalik dengan hasil persentase terendah hanya 16,24%, begitu juga dengan variasi daya 600 watt dengan persentase 17,92%. Hal ini disebabkan karena proses pembakaran yang lambat mengakibatkan kurang maksimal dalam penguraian biomassa organik, sehingga *liquid* yang dihasilkan sedikit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya optimal untuk produksi *liquid* pada proses pirolisis buah pinus terdapat pada daya 800 watt dengan persentase produk sebesar 29,54%.

b. Persentase Pengaruh Daya terhadap Yield Char

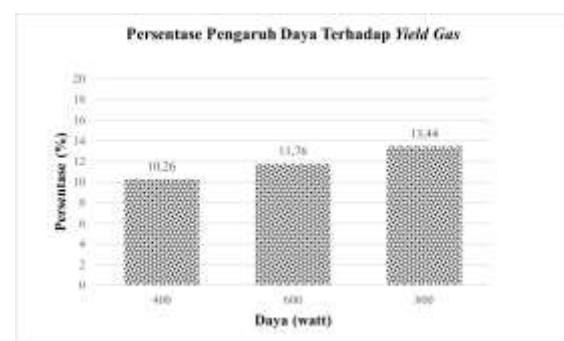


Gambar 3 Persentase Pengaruh Daya terhadap Yield Char

Berdasarkan diagram diatas, menunjukkan hasil produksi *char* terendah berada pada proses pirolisis variasi daya 800 watt, dengan persentase sebesar 66,82%. Hal itu disebabkan karena pada daya 800 watt, mengalami kenaikan

temperatur yang tinggi, yang dengan cepat dapat menguraikan bahan organik biomassa. Hasil produksi pada variasi daya 400 watt, *char* yang dihasilkan mendapatkan persentase tertinggi yaitu 73,5% dan variasi daya 600 watt mendapatkan persentase sebesar 70,32%. Parameter produksi *char* yang dihasilkan berpengaruh pada variasi daya yang ditetapkan, dikarenakan semakin tinggi daya maka semakin tinggi pula temperatur yang dihasilkan. Semakin tinggi temperatur pada proses pirolisis, akan mengakibatkan molekul pada bahan organik semakin cepat terurai. Dengan meningkatnya daya, maka produk *char* yang dihasilkan akan semakin menurun.

c. Persentase Pengaruh Daya terhadap Yield Gas



Gambar 4 Persentase Pengaruh Daya terhadap Yield Gas

Diagram diatas, menunjukkan persentase pengaruh variasi daya terhadap *yield gas*. Hasil produksi gas tertinggi terdapat pada variasi daya 800 watt dengan nilai persentase sebesar 13,44%. Hal ini berbanding lurus dengan produksi *yield liquid*. Proses pirolisis dengan daya tinggi akan memicu reaksi yang mengkonversi biomassa menjadi gas. Gas yang dihasilkan merupakan hasil dekomposisi termal dari biomassa. Biomassa yang terdekomposisi akan berupa menjadi gas dan akan terkondensasi menjadi *liquid*, sedangkan gas yang tidak terkondensasi akan tetap menjadi gas. Hasil dari gas yang didapatkan dapat dipengaruhi dari efisiensi kondensor yang kurang optimal yang menyebabkan gas tidak terkondensasi dengan maksimal.

Pada variasi daya 400 watt, gas yang dihasilkan hanya 10,26%. Daya yang rendah pada proses pirolisis menghasilkan penguapan yang rendah juga, maka dari itu *yield* gas yang diperoleh pada proses pirolisis juga semakin rendah.

2. Pengaruh Daya terhadap Temperatur Akhir Proses Pirolisis



Gambar 5 Grafik Pengaruh Daya terhadap Temperatur Akhir Proses Pirolisis

Grafik pada gambar 5 menunjukkan perbedaan hasil temperatur akhir pada proses pirolisis dengan waktu selama 30 menit. Grafik temperatur pada proses pirolisis mengalami kenaikan secara konsisten pada setiap variasi daya. Pada daya 400 watt temperatur yang dihasilkan sebesar 119,34°C, kemudian pada variasi daya 600 watt mengalami kenaikan sebesar 121,67°C, dan mengalami kenaikan yang signifikan pada variasi daya 800 watt sebesar 136,48°C. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi daya yang digunakan, semakin tinggi juga suhu yang dihasilkan [15]. Suhu dalam proses pirolisis mempengaruhi produk yang dihasilkan sesuai dengan persamaan Arrhenius. Semakin tinggi suhu, semakin tinggi juga nilai konstanta dekomposisi termal, sehingga menyebabkan laju pirolisis meningkat dan nilai konversi semakin tinggi [16].

Temperatur pada proses pirolisis diukur menggunakan *thermocouple type K* yang tersambung pada *data logger* dengan sensor berbahan dasar logam. Hal itu mengakibatkan munculnya percikan karena bergesekan dengan gelombang mikro. Dengan adanya percikan pada *switch*

menghasilkan panas yang berlebih sehingga reaktor kaca (*boiling flask*) mudah retak bahkan sampai pecah. Maka dari itu, peneliti hanya mengukur temperatur akhir pada saat proses pirolisis selesai atau *microwave* sudah mati untuk menghindari kerusakan pada alat pirolisis.

3. Analisis Kesetimbangan Energi

Kesetimbangan energi merupakan salah satu parameter penting untuk menilai kinerja seluruh sistem pembakaran. Prinsip kesetimbangan energi digunakan untuk mengetahui seberapa jauh energi dalam bentuk panas digunakan secara efektif dalam suatu sistem [17].

Kesetimbangan energi pada proses pirolisis dapat diukur melalui perpindahan kalor yang disebabkan oleh perbedaan suhu material. Ilmu perpindahan panas digunakan untuk menghitung laju perpindahan panas yang terjadi pada suatu kondisi tertentu [18].

Tabel 2 *Specific Heat Capacity* Buah Pinus

Nama Sampel	<i>Specific Heat Capacity</i> (C_p) (kJ/kg.K)	Sumber
Buah Pinus	3,4	[19]
<i>Liquid</i>	3	[20]
<i>Char</i>	1,3	
Gas	0,8	[21]

Dari tabel 4.2 didapatkan data *specific heat capacity* dari setiap biomassa serta hasil produk pirolisis, maka kesetimbangan energi dapat dihitung dengan hasil pada tabel sebagai berikut:

Tabel 3 Kesetimbangan Energi

Daya (watt)	Q_{in} (kJ)	Q_{out}			Q_{total} (kJ)	Energy Losses (kJ)
		<i>Liquid</i> (kJ)	<i>Char</i> (kJ)	Gas (kJ)		
400	720	103,17	202,33	17,39	322,89	397,11
600	1.080	170,77	290,40	29,89	491,06	588,94
800	1.440	250,80	367,88	45,53	664,21	775,79

Kesetimbangan energi dihitung berdasarkan hasil produk pirolisis dengan persamaan diatas. Di dalam kesetimbangan energi, tidak dapat dipungkiri adanya energi yang hilang (*energy losses*). Energi yang hilang merupakan energi yang tidak dapat dimanfaatkan secara langsung dalam suatu sistem karena diubah menjadi bentuk energi yang tidak terpakai. Dapat dilihat pada tabel diatas terdapat banyaknya energi hilang pada proses pirolisis. Hal itu dapat disebabkan karena beberapa faktor seperti desain alat instalasi, kondisi material, maupun faktor lingkungan.

4. Visualisasi Produk Heavy Oil



Gambar 6 Visualisasi Produk Heavy Oil

Gambar 6 menunjukkan visualisasi produk *heavy oil* pada proses *Microwave Assisted Pyrolysis*. Dapat dilihat pada variasi daya 400 watt, 600 watt, serta 800 watt secara fisik dari warna sekilas tidak memiliki perbedaan dengan hasil warna yang didapat berupa kecoklatan. Hal ini dikarenakan masih terdapat banyak residu padatan atau tar yang masih tercampur pada produk *heavy oil*. Adapun perbedaan visualisasi produk seperti warna dapat disebabkan dari bahan baku yang digunakan serta pengaruh suhu pada proses pirolisis [22]. Hasil analisa visualisasi produk diatas hanya dilakukan dengan analisa optik dengan hasil variasi daya terkecil mendapatkan warna yang lebih jernih dibandingkan dengan variasi daya yang lainnya. Jika dilihat dari struktur fisik *heavy oil* memiliki struktur yang lebih kental dibandingkan dengan minyak ringan. *Heavy oil* yang didapatkan dapat

dilakukan pemrosesan lebih lanjut untuk dapat dimanfaatkan sebagai bahan alternatif.

KESIMPULAN

1. Pengaruh daya terhadap produksi hasil pirolisis *yield liquid* berbanding lurus, semakin meningkatnya daya maka semakin meningkat pula produksi *yield liquid* begitupun dengan pengaruh daya terhadap *yield gas*, sedangkan pengaruh daya terhadap produksi *yield char* berbanding terbalik, semakin tinggi daya maka semakin rendah *yield char* yang dihasilkan.
2. Visualisasi produk yang didapatkan berpengaruh terhadap daya dan temperatur, dengan analisa optik dapat dilihat jika variasi daya yang rendah menghasilkan *heavy oil* dengan warna yang lebih jernih dibandingkan dengan daya yang lainnya.
3. Daya *microwave* dan temperatur memiliki hubungan yang saling berkaitan; semakin besar daya yang digunakan, maka semakin tinggi pula temperatur yang dihasilkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang mendalam, atas dukungan dan bantuan materil maupun teori pada saat penelitian kepada Ibu Dr. Ena Marlina, S.T., M.T., Bapak Nur Robbi, S.T., M.T., dan Bapak Akhmad Faruq Alhikami, S.T., M.Sc., serta keluarga dan teman-teman penelitian yang selalu *support* dalam bentuk doa maupun tindakan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Gazali, "KARAKTERISTIK ARANG BRIKET BUAH PINUS/TUSAM (P. Merkusii Jungh.at de Vriese)," *Universitas Bosowa*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] S. Suluh, P. Sampelawang, and K. Borotoding, "Studi Eksperimen Limbah Buah Pinus Sebagai Sumber

- Energi Alternatif Ditinjau Dari Variasi Butiran,” *Studi Eksperimen Limbah Buah Pinus Sebagai Sumber Energi Alternatif Ditinjau Dari Variasi Butiran*, vol. 1, Oct. 2020.
- [3] T. J. Saputra, R. P. Dewi, F. Teknik, U. Tidar, and M. J. Tengah, “Terhadap Sampah Plastik Hdpe Melalui Proses Pirolisis,” *Prosiding Seminar Nasional Riset Teknologi Terapan*, vol. 4, no. 1, 2023.
- [4] U. Şen *et al.*, “Pine Nutshells and Their Biochars as Sources of Chemicals, Fuels, Activated Carbons, and Electrode Materials,” *Processes*, vol. 12, no. 8, Aug. 2024, doi: 10.3390/pr12081603.
- [5] T. Y. A. Fahmy, Y. Fahmy, F. Mobarak, M. El-Sakhawy, and R. E. Abou-Zeid, “Biomass pyrolysis: past, present, and future,” Jan. 01, 2020, *Springer*. doi: 10.1007/s10668-018-0200-5.
- [6] S. Rahmawati and Y. Widayanti, “... Biomassa Limbah Pohon Sengon Dan Bonggol Jagung Dalam Inovasi Senggol-Char (Biochar Limbah Pohon Sengon Dan Bonggol Jagung) Melalui Proses Pirolisis,” *Prosiding: Konferensi Nasional ...*, 2022.
- [7] K. Ridhuan, D. Irawan, Y. Zanaria, and F. Firmansyah, “Pengaruh Jenis Biomassa Pada Pembakaran Pirolisis Terhadap Karakteristik Dan Efisiensi bioarang - Asap Cair Yang Dihasilkan,” *Media Mesin: Majalah Teknik Mesin*, vol. 20, no. 1, pp. 18–27, 2019, doi: 10.23917/mesin.v20i1.7976.
- [8] I. Handayani, K. Sa’diyah Jurusan, T. Kimia, N. Malang, J. Soekarno, and H. No, “PENGARUH WAKTU PIROLISIS SERBUK GERGAJI KAYU TERHADAP HASIL ASAP CAIR,” vol. 2022, no. 1, pp. 28–35, [Online]. Available: <http://distilat.polinema.ac.id>
- [9] 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.
- [10] D. Y. Oh, D. Kim, and K. Y. Park, “A comprehensive comparative study on microwave-assisted pyrolysis products derived from raw and digested organic waste, with emphasis on sewage sludge, food waste, and livestock manure,” *Heliyon*, vol. 10, no. 8, p. e29618, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e29618.
- [11] 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.
- [12] S. A. Novita, S. Santosa, N. Nofialdi, A. Andasuryani, and A. Fudholi, “Artikel Review: Parameter Operasional Pirolisis Biomassa,” *Agroteknika*, vol. 4, no. 1, pp. 53–67, Jun. 2021, doi: 10.32530/agroteknika.v4i1.105.
- [13] N. Kartika Erliyanti, E. A. Saputro, R. R. Yogaswara, and E. Rosyidah, “JURNAL IPTEK MEDIA KOMUNIKASI TEKNOLOGI Aplikasi Metode Microwave Hydrodistillation pada Ekstraksi Minyak Atsiri dari Bunga Kamboja (*Plumeria alba*)”, doi: 10.31284/j.iptek.2020.v24i1.

- [14] S. Maulina and F. Sari Putri, "PENGARUH SUHU, WAKTU, DAN KADAR AIR BAHAN BAKU TERHADAP PIROLISIS SERBUK PELEPAH KELAPA SAWIT EFFECT OF TEMPERATURE, TIME, AND WATER CONTENT OF RAW MATERIAL ON THE PYROLYSIS OF PALM MIDRIB POWDER," 2017.
- [15] Y. Purwanti, "Pengaruh Daya dan Waktu MAE terhadap Suhu Ekstraksi, Rendemen, dan Aktivitas Antioksidan," vol. 3, 2024.
- [16] J. A. Riandis, A. R. Setyawati, and A. S. Sanjaya, "PENGOLAHAN SAMPAH PLASTIK DENGAN METODE PIROLISIS MENJADI BAHAN BAKAR MINYAK PLASTIC WASTE PROCESSING USING PYROLYSIS METHOD INTO FUEL OIL," *Jurnal Chemurgy*, vol. 05, no. 1, pp. 8–14, 2021, [Online]. Available: <http://e-journals.unmul.ac.id/index.php/TK>
- [17] M. Fadila Rania, I. Gede Eka Lesmana, E. Maulana, J. Sawah, and J. Jakarta Selatan, "ANALISIS POTENSI REFUSE DERIVED FUEL (RDF) DARI SAMPAH PADA TEMPAT PEMBUANGAN AKHIR (TPA) DI KABUPATEN TEGAL SEBAGAI BAHAN BAKAR INCINERATOR PIROLISIS," vol. 13, no. 1, 2019, [Online]. Available: <http://jurnal.umj.ac.id/index.php/sintek>
- [18] R. Sirait *et al.*, "Seminar Nasional Penelitian LPPM UMJ Website: <http://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnaslit> E-Analisis Keseimbangan Energi pada Reaktor Pirolisis Kapasitas 75 Kg/Jam," 2020. [Online]. Available: <http://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnaslit>
- [19] Y. M. Subasinghe Achchige, L. Volkova, A. I. Filkov, and C. J. Weston, "Effect of bark properties on the cambium cell viability of Eucalyptus species under low radiative heat exposure," *For Ecol Manage*, vol. 521, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.foreco.2022.120443.
- [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] Kyle, "Table A-2_Ideal-gas specific heats of various common gases," 1984.
- [22] S. Amrullah and C. Octaviananda, "KARAKTERISASI ALAT PIROLISIS ASAP CAIR MENGGUNAKAN VARIASI PERSENTASE LIMBAH TONGKOL JAGUNG DAN AMPAS TEBU," vol. 12, 2023.