

Analisis Karakteristik Asam Pirolignat Produk Hasil Proses Pirolisis dari Cangkang Kemiri

Amelia Sri Rezki^{1*}, Yeni Ria Wulandari², Shintawati³, Nita Pita Sari⁴, Jovita Dwi Ilfayeni⁵
^{1,2,3,4,5} Program Studi Teknologi Rekayasa Kimia Industri, Politeknik Negeri Lampung
ameliasrirezki@polinela.ac.id
*corresponding author

INFORMASI ARTIKEL	ABSTRAK
Diterima 15 November 2024 Direvisi 15 Desember 2024 Diterbitkan 3 Februari 2025	Asam pirolignat adalah cairan hasil proses pirolisis berupa kombinasi dari asam pirolignat dan fase minyak (<i>pyrolytic oil</i>). Asam pirolignat juga dikenal sebagai asap cair, diperoleh melalui proses degradasi biomassa melalui proses pirolisis. Sumber biomassa banyak diperoleh dari limbah biomassa kayu, biomassa agraris, biomassa air, lumpur limbah, dan limbah dari industri kertas. Salah satunya adalah cangkang kemiri yang memiliki kandungan hemiselulosa, selulosa, dan lignin sebagai sumber terbentuknya asam pirolignat. Tujuan studi ini adalah karakterisasi asam pirolignat yang dihasilkan dari limbah cangkang kemiri dengan memperhatikan pengaruh suhu operasi pirolisis dengan variasi 300°C, 350°C, dan 400°C pada reaktor pirolisis. Hasil penelitian menunjukkan karakteristik asam pirolignat yang dihasilkan dari pirolisis cangkang kemiri terbaik adalah pada suhu 400°C meliputi karakteristik densitas 1,260 gr/ml , viskositas 1,030 cP , laju pemanasan 8,35°C/menit , uji kualitatif fenol berwarna merah, dan yield 33,33%, sedangkan kadar asam asetat 4,171% terbaik diperoleh pada suhu 300°C. Semakin tinggi suhu operasi pirolisis karakteristik asam pirolignat yang diperoleh semakin baik. Studi karakteristik asam pirolignat ini diharapkan dapat menjadi referensi untuk pengembangan lebih lanjut khususnya aplikasi dalam beberapa sektor yang membutuhkan asam pirolignat ini.

Analysis of the Characteristics of Pyroligneous Acid from the Pyrolysis Process of Candlenut Shells

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received November 15, 2024 Revised eDesember 15, 2024 Published February 3, 2025	Pyroligneous acid is a liquid resulting from the pyrolysis process, consisting of a combination of pyroligneous acid and the oil phase (<i>pyrolytic oil</i>). Pyroligneous acid, also known as liquid smoke, is obtained through the degradation of biomass via the pyrolysis process. Biomass sources are largely obtained from wood biomass waste, agricultural biomass, aquatic biomass, waste sludge, and waste from the paper industry. One of them is candlenut shells, which contain hemicellulose, cellulose, and lignin as sources for the formation of pyroligneous acid. The objective of this study is to characterize the pyroligneous acid produced from candlenut shell waste by considering the effect of pyrolysis operating temperatures with variations of 300°C, 350°C, and 400°C in the pyrolysis reactor. The research results show that the best characteristics of the pyroligneous acid produced from the pyrolysis of candlenut shells are at 400°C, including a density of 1.260 gr/ml, viscosity of 1.030 cP, heating rate of 8.35°C/min, a qualitative phenol test showing a red color, and a yield of 33.33%. Meanwhile, the best acetic acid content of 4.171% was obtained at 300°C. The higher the pyrolysis operating temperature, the better the characteristics of the obtained pyroligneous acid. The study of the characteristics of pyroligneous acid is expected to serve as a reference for further development, particularly in applications in several sectors that require this pyroligneous acid.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0](#)



1. PENDAHULUAN

Biomassa saat ini menjadi salah satu sumber karbon yang dapat digunakan sebagai bahan kimia atau material dan juga berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan. Ikatan karbon yang kompleks dipecah dalam proses termokimia pada degradasi biomassa [1]. Biomassa terdiri dari lignin, selulosa, dan hemiselulosa, yang masing-masing memiliki karakteristik yang berbeda dalam hal degradasi termal [2], dimana proses pirolisis pada suhu tinggi dapat memecah lignin dan selulosa menjadi senyawa yang lebih kecil, termasuk senyawa volatil seperti fenol dan hidrokarbon. Biomassa dapat meliputi limbah terbiodegradasi yang dapat dibakar sebagai bahan bakar seperti jerami, sekam, batok kelapa, tandan kosong dan cangkang sawit, dan limbah kayu [3]. Selain itu biomassa juga terdapat pada limbah biomassa kayu (dahan, serpihan, serutan, kulit kayu, dan batang tanaman berkayu), biomassa agraris (alfalfa, *miscanthus* raksasa, millet, jerami sereal, sisa buah, cangkang biji, bagasse, limbah makanan), biomassa air (alga, biomassa hewan (misalnya, limbah pengolahan unggas)), lumpur limbah, dan limbah dari industri kertas [4],[5].

Cangkang kemiri, yang berasal dari biji kemiri (*Aleurites moluccana*), merupakan limbah biomassa yang memiliki berbagai potensi pemanfaatan. Cangkang kemiri memiliki kulit keras dengan ketebalan sekitar 3-5 mm dan berwarna coklat atau kehitaman. Cangkang kemiri mengandung komponen seperti holoselulosa (49,22%), lignin (54,46%), dan abu (8,73%), dimana kandungan lignin yang tinggi menjadikannya potensial untuk digunakan dalam pembuatan briket [6] sebagai bahan bakar alternatif, karena kandungan kalori yang tinggi dari lignin [7].

Transformasi biomassa menjadi produk padat, cair, dan gas dapat dengan mudah dicapai melalui teknologi pirolisis. Pada Proses pirolisis yang melibatkan pemanasan biomassa tanpa kehadiran oksigen, menghasilkan produk cair melalui proses kondensasi asap. Cairan hasil proses pirolisis adalah kombinasi dari asam pirolignat dan fase minyak (*pyrolytic oil*). Asam pirolignat juga dikenal sebagai asap cair sedangkan fase minyak (*pyrolytic oil*) dikenal sebagai bio-oil. Asam pirolignat yang biasa dikenal sebagai cuka kayu atau asam kayu, adalah cairan gelap dan berair yang dihasilkan melalui distilasi destruktif kayu dan bahan tanaman lainnya. Komposisi asam pirolignat terdiri dari asam asetat, metanol, dan berbagai senyawa organik, menjadikannya campuran kompleks yang kaya akan zat bioaktif [8]. Asam pirolignat biasanya mengandung 80-90% air, 10% asam asetat, dan komponen lainnya termasuk fenol, alkohol, serta berbagai asam organik seperti asam propionat dan asam malat [9]. Komposisi ini dapat bervariasi secara signifikan berdasarkan faktor-faktor seperti jenis biomassa yang digunakan, suhu pirolisis, dan durasi pemanasan [10]. Cairan ini dicirikan oleh warnanya yang coklat kemerahan dan bau asap yang khas karena adanya senyawa fenolik seperti *guaiacol* dan *syringol* [8]. Frist Silia & Seri Maulina, (2017) menyatakan, kadar asam asetat dalam asap cair dipengaruhi oleh kandungan selulosa bahan baku dimana semakin tinggi kandungan selulosa bahan baku, maka kandungan asam asetat yang terdapat di dalam asap cair akan semakin tinggi [11].

Aplikasi asam pirolignat pada bidang pertanian, bertindak sebagai biostimulan, meningkatkan perkecambahan biji, pertumbuhan tanaman, dan hasil panen. Studi yang dilakukan oleh Ofoe, (2022) telah menunjukkan bahwa asam pirolignat dapat meningkatkan kualitas nutrisi tanaman seperti tomat dengan meningkatnya kandungan karotenoid dan fenolik [12]. Kemudian pada bidang industri makanan, digunakan untuk memberi rasa dan mengawetkan produk makanan karena sifat antimikrobanya [1],[8]. Serta pada penelitian menunjukkan potensinya dalam mengendalikan penyakit tanaman dan meningkatkan kesehatan tanah dengan meningkatkan aktivitas mikroba [9],[13]. Oleh karena itu studi ini berfokus pada pengaruh suhu operasi proses pirolisis terhadap analisis karakteristik asam pirolignat sebagai produk cair proses pirolisis cangkang kemiri. Analisis karakteristik ini untuk melihat potensi aplikasi asam pirolignat dalam berbagai kebutuhan, serta penanganan limbah biomassa cangkang kemiri yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan produk yang lebih bermanfaat.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Proses pirolisis menggunakan bahan baku cangkang kemiri dari Kabupaten Pringsewu, Provinsi Lampung. Cangkang kemiri sebanyak 300 g dimasukkan kedalam reaktor pirolisis yang sumber pemanas menggunakan listrik dan dilengkapi pengendali suhu, kemudian terdapat satu set kondensor yang berfungsi untuk mengondensasikan asap yang keluar dari reaktor ketika proses pirolisis sedang berjalan [14]. Penelitian ini menggunakan variabel suhu dengan variasi suhu 300°C, 350°C, dan 400°C selama ± 2 jam. Proses pirolisis menghasilkan produk berupa cairan yang terdiri dari asam pirolignat dan *pyrolytic oil*, gas, dan arang. Produk cairan proses pirolisis dipisahkan menggunakan corong pisah dan kemudian dilakukan analisa karakteristik

fisika dan kimia yaitu densitas, viskositas, uji kualitatif fenol, dan uji kadar asam asetat. Kemudian dilakukan juga perhitungan yield dari produk pirolisis.

Uji kualitatif senyawa fenol dilakukan dengan cara menambahkan FeCl_3 1%, yang ditandai dengan terbentuknya warna hijau, merah, ungu, biru atau hitam pekat, yang terjadi ketika FeCl_3 bereaksi dengan gugus hidroksil yang ada pada senyawa fenol [15]. Kadar asam asetat (metode titrasi AOAC, 1990) diperoleh dari perhitungan persentase asam asetat berdasarkan metode titrasi, yaitu dengan melarutkan 10 gram sampel kedalam 100 mL aquades. Lalu diambil dari larutan induk, diambil 10 mL dan diberi indikator phenoftalein 2 tetes untuk kemudian dititrasi menggunakan larutan NaOH 0,1 sampai larutan berada pada titik akhir titrasi yang ditunjukkan dengan perubahan warna menjadi merah keunguan. Perhitungan persentase asam asetat mengikuti persamaan berikut [16]:

$$\text{Nilai Asam (\%)} = \frac{(V_{\text{NaOH}} \times N_{\text{NaOH}} \times \text{BM})}{(\text{Berat Sampel})} \times 100\% \quad (1)$$

Produk pirolisis dapat dihitung dengan menggunakan prinsip neraca massa dengan menghitung yield atau randemen. Randemen atau *yield* yang merupakan persentase perbandingan antara massa bagian produk (*liquid*, gas, dan *bio-char*) terhadap massa bahan baku yang digunakan.

$$\text{yield (\%)} = \frac{\text{Massa Produk}}{\text{Massa Bahan Baku}} \times 100\% \quad (2)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik Asam Pirolignat Produk Cair Pirolisis

Karakteristik asam pirolignat produk cair pirolisis yang dihasilkan dari proses pirolisis cangkang kemiri dengan variasi suhu 300°C, 350°C, dan 400°C disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil Uji Produk Pirolisis

Parameter	Suhu (°C)		
	300	350	400
Densitas (gr/ml)			
Asam Pirolignat (Asap Cair)	1,004	0,956	1,260
Viskositas (cP)			
Asam Pirolignat (Asap Cair)	0,662	0,570	1,030
Heating Rate (°C/menit)	7,57	6,80	8,35
Uji Kualitatif Fenol	Coklat	Kuning	Merah
Asam Asetat (%)	4,171	3,570	1,468

Densitas merupakan perbandingan massa dengan volume asap cair yang diperoleh, artinya massa bahan dalam setiap volumenya mempengaruhi nilai densitas yang diperoleh dari suatu bahan. Densitas juga dapat menggambarkan kerapatan molekul yang terkandung dalam asap cair. Densitas asam pirolignat pada penelitian ini yaitu antara 0,956-1,260 g/ml di berbagai variasi suhu operasi. Berdasarkan mutu asap cair Jepang, berat jenis asap cair bernilai >1,005 gr/ml [17], dimana asap cair pada penelitian ini yang memenuhi standar adalah pada suhu operasi 400°C, sedangkan suhu lainnya bernilai lebih rendah sehingga belum memenuhi kelas mutu berat jenis asap cair standar Jepang. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan Jazilah (2023) yang membuat asap cair dari sekam padi pada suhu yang sama dengan penelitian ini yaitu 400°C mendapatkan densitas yang memenuhi standar [18]. Kandungan senyawa-senyawa yang ada didalam asam pirolignat mempengaruhi nilai densitas, terlihat pada Tabel 1 terdapat senyawa fenol dan asetat. Semakin banyak senyawa yang terlarut dalam suatu volume asap cair, maka semakin besar pula massanya, sehingga densitasnya akan meningkat. Fenol dan asam asetat memiliki massa molekul yang lebih besar dibandingkan dengan komponen lain dalam asap cair, seperti air. Oleh karena itu, peningkatan konsentrasi fenol dan asam asetat akan berkontribusi pada peningkatan densitas. Densitas juga mempengaruhi nilai viskositas asam pirolignat dengan variasi suhu operasi yang digunakan. Pada Tabel 1 nilai viskositas asam pirolignat mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan suhu operasi pirolisis cangkang kemiri yaitu antara 0,570-1,030 cP. Nilai viskositas ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Mogdaham (2009) bahwa nilai viskositas berbanding lurus dengan densitas, sehingga semakin rendah viskositas maka densitas juga akan semakin menurun [19].

Laju pemanasan (*heating rate*) dari Tabel 1 diperoleh laju pemanasan dengan variasi 3 suhu antara 6,8-8,35°C/menit. Laju pemanasan yang cepat akan menyebabkan reaksi pirolisis terjadi dengan cepat dan tidak

sempurna. Akibatnya, sebagian besar senyawa organik akan terurai menjadi gas, sehingga rendemen arang akan rendah dan rendemen produk volatil akan tinggi, sedangkan laju pemanasan yang lambat memungkinkan reaksi pirolisis berlangsung lebih sempurna, sehingga menghasilkan lebih banyak arang [20]. Pada penelitian ini semakin tinggi suhu semakin cepat laju pemanasan proses pirolisis cangkang kemiri sehingga meningkatkan produk volatil (asap cair dan gas) serta mengurangi randemen arang.

Uji fenol pada penelitian ini dilakukan secara kualitatif, dimana untuk mengetahui keberadaan senyawa fenol didalam asam pirolignat cangkang kemiri ditandai dengan terbentuknya warna hijau, merah, ungu, biru atau hitam pekat, yang terjadi ketika FeCl_3 bereaksi dengan gugus hidroksil yang ada pada senyawa fenol. Dari hasil uji diperoleh, senyawa fenol terdapat pada asap pirolignat dengan kondisi operasi suhu 400°C . Sedangkan pada suhu 300°C dan 350°C tidak teridentifikasi adanya fenol ditandai dengan warna coklat dan kuning. Warna coklat dan kuning ini muncul diakibatkan hasil reaksi dari senyawa asam asetat yang merupakan senyawa dominan di dalam asap cair. Senyawa yang memiliki gugus fungsi karboksilat ($\text{R}-\text{COOH}$) apabila bereaksi dengan FeCl_3 akan membuat warna larutan menjadi kuning kecokelatan.

Karakteristik selanjutnya adalah kadar asam asetat yang terdapat didalam asam pirolignat (asap cair) cangkang kemiri. Hasil penelitian menunjukkan kandungan asam asetat antara 1,468-4,171% pada variasi suhu proses pirolisis. Kandungan asam asetat terbanyak terdapat pada suhu 300°C sebesar 4,171% sedangkan terendah pada suhu 400°C sebesar 1,468%. Menurut Igliński, (2023) ketika suhu kayu naik dari 105°C menjadi 120°C , air yang tidak terikat secara kimia pada bahan organik kayu (air terabsorpsi) dilepaskan, dengan peningkatan suhu lebih lanjut dari 245°C hingga 265°C ; sedangkan air yang terikat secara kimia dalam struktur selulosa melepaskan CO_2 , CO , serta sejumlah kecil asam asetat dan uap metanol yang mengembun dan mulai mengeluarkan sejumlah kecil tar kayu. Namun pada suhu di atas 265°C hingga 275°C , proses menjadi eksotermik, dengan pelepasan kuat metanol, asam asetat, asetona, hidrokarbon ringan, tar kayu, sedangkan hidrogen, CO_2 dan CO yang dilepaskan berkurang. Pada suhu di atas 400°C , sisa bahan organik diromatisasi, menghasilkan pembentukan lapisan quasi-grafit, dan transformasi kayu menjadi *biochar* hampir selesai [21]. Berdasarkan standar SNI 8985:2021 syarat mutu asap cair pada kandungan asam asetat terbagi atas grade 1 yaitu 8,00-15,00 dan grade 2 yaitu 1,10-7,99%. Penelitian ini menghasilkan asap cair dalam kategori grade 2 berdasarkan kandungan asam asetat.

3.2. Yield Produk Pirolisis

Proses analisis produk asap cair meliputi analisis yield, dimana yield memberikan gambaran tentang jumlah kuantitas produk asap cair yang dihasilkan. Cara menghitung rendemen terlihat pada Persamaan 2. Produk pirolisis yang terbentuk dan karakteristiknya sangat dipengaruhi oleh jenis biomassa, proses pre-treatment, proses pirolisis, dan kondisi operasi yang digunakan seperti temperatur, waktu tinggal, dan penambahan katalis. Hasil yield produk proses pirolisis cangkang kemiri berupa bio-oil, asam pirolignat, arang dan gas dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Hasil Yield Produk Pirolisis

Parameter	Suhu ($^\circ\text{C}$)		
	300	350	400
Bio-oil	5,52%	4,58%	5,00%
Asam Pirolignat (Asap cair)	29,01%	31,87%	33,33%
Arang	48,00%	45,33%	42,24%
Gas	17,47%	18,22%	19,43%

Variasi suhu digunakan untuk melihat randemen produk hasil proses pirolisis cangkang kemiri. Nilai yield tertinggi dari keseluruhan produk hasil pirolisis cangkang kemiri adalah pada arang dan asam pirolignat. Sedangkan yield terendah terdapat pada produk bio-oil. Nilai yield arang yang diperoleh menunjukkan pengaruh dari suhu pirolisis yang dioperasikan, dimana semakin tinggi suhu, arang yang diperoleh semakin sedikit. Hal ini menunjukkan bahwa cangkang kemiri terdekomposisi lebih banyak seiring dengan meningkatnya suhu, sehingga menghasilkan gas yang lebih banyak namun menurunkan jumlah produk arang [22],[14],[23]. Dapat dilihat pada Tabel 2 nilai yield terendah arang disuhu tertinggi yaitu 400°C namun menghasilkan gas yang paling tinggi diantara suhu tersebut yaitu 19,43%.

Selanjutnya pada Gambar 1 diperoleh pengaruh variasi suhu terhadap asam pirolignat yang diperoleh, dimana semakin tinggi suhu yang dioperasikan yield asam pirolignat semakin meningkat. Artinya dengan

peningkatan suhu ini banyak senyawa organik dalam cangkang kemiri yang terurai menjadi komponen yang lebih sederhana yang akan meningkatkan rendemen produk volatil (asap cair dan gas) dan mengurangi rendemen arang. Kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin dalam bahan baku akan mempengaruhi jenis dan jumlah produk yang dihasilkan. Cangkang kemiri memiliki kandungan hemiselulosa dan selulosa yang cukup tinggi, karena hemiselulosa terurai pada temperatur 200°C-315°C, sedangkan selulosa terurai pada temperatur 315°C-400°C [24].

4. KESIMPULAN

Karakteristik asam pirolignat (asap cair) yang dihasilkan dari pirolisis cangkang kemiri dengan variasi suhu operasi 300°C, 350°C, dan 400°C terbaik adalah pada suhu 400°C jika dilihat dari hasil analisis karakteristik densitas, viskositas, laju pemanasan, uji kualitatif fenol, yield. Namun untuk kandungan asam asetat terbaik diperoleh pada suhu 300°C. Kualitas asap cair yang dihasilkan telah ditetapkan dalam bentuk Standar Nasional Indonesia (SNI) Nomer SNI 8985:2021 yang dibedakan menjadi beberapa kelas atau mutu, yaitu mutu 1 dan 2. Berdasarkan SNI 8985:2021, indikator yang digunakan sebagai kualitas dari asap cair mutu 1 dan mutu 2 adalah warna asap cair, bahan terapung yang ada pada produk, pH asap cair, densitas, kandungan asam asetat, dan kandungan fenol. Pada penelitian ini asap cair yang diperoleh dikategorikan kedalam asap cair grade 2.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Wulandari, F. Silmi, A. Rezki, and H. Wu, "TGA Study on Catalytic Thermal Degradation of Brown Solid (Fermented Product from Rice Straw) and Ash from Brown Solid as Catalyst," *Journal3.Uad.Ac.Id*, vol. 11, no. 1, pp. 10–16, 2024, [Online]. Available: <https://journal3.uad.ac.id/index.php/chemica/article/view/221>
- [2] T. Wang, D. Meng, J. Zhu, and X. Chen, "Effects of pelletizing conditions on the structure of rice straw-pellet pyrolysis char," *Fuel*, vol. 264, p. 116909, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116909.
- [3] L. Parinduri and T. Parinduri, "Konversi Biomassa Sebagai Sumber Energi Terbarukan," *J. Electr. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 88–92, 2020, [Online]. Available: <https://www.dosenpendidikan>.
- [4] H. Stančin *et al.*, "Thermogravimetric and kinetic analysis of biomass and polyurethane foam mixtures Co-Pyrolysis," *Energy*, vol. 237, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121592.
- [5] P. Lv *et al.*, "Investigation into the interaction of biomass waste with industrial solid waste during co-pyrolysis and the synergetic effect of its char gasification," *Biomass and Bioenergy*, vol. 159, 2022, doi: 10.1016/j.biombioe.2022.106414.
- [6] A. S. Rezki, Y. R. Wulandari, and M. Arif, "PELATIHAN TEKNIS PEMBUATAN BRIKET LIMBAH CANGKANG KEMIRI PADA GAPOKTAN MAKMUR LESTARI KABUPATEN PRINGSEWU," *GERVASI J. Pengabd. Kpd. Masy.*, vol. 08, no. 02, pp. 559–570, 2024.
- [7] B. Mody Lempang, W. Syafii, and G. Pari, "Structure and Components of Charcoal and Activated Charcoal from Candlenut Shell," *Agritech*, vol. 2, no. 1, pp. 278–294, 2018.
- [8] S. Mathew and Z. A. Zakaria, "Pyroligneous acid—the smoky acidic liquid from plant biomass," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 99, no. 2, pp. 611–622, 2015, doi: 10.1007/s00253-014-6242-1.
- [9] R. Ofoe, S. M. N. Mousavi, R. H. Thomas, and Lord Abbey, "Foliar application of pyroligneous acid acts synergistically with fertilizer to improve the productivity and phytochemical properties of greenhouse-grown tomato," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–16, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-52026-2.
- [10] I. Handayani and K. Sa'diyah, "Pengaruh Waktu Pirolisis Serbuk Gergaji Kayu Terhadap Hasil Asap Cair," *DISTILAT J. Teknol. Separasi*, vol. 8, no. 1, pp. 28–35, 2023, doi: 10.33795/distilat.v8i1.227.
- [11] Seri Maulina and Feni Sari Putri, "Pengaruh Suhu, Waktu, Dan Kadar Air Bahan Baku Terhadap Pirolisis Serbuk Pelepah Kelapa Sawit," *J. Tek. Kim. USU*, vol. 6, no. 2, pp. 35–40, 2017, doi: 10.32734/jtk.v6i2.1581.
- [12] R. Ofoe, D. Qin, L. R. Gunupuru, R. H. Thomas, and Lord Abbey, "Effect of Pyroligneous Acid on the Productivity and Nutritional Quality of Greenhouse Tomato," *Plants*, vol. 11, no. 13, pp. 1–15, 2022, doi: 10.3390/plants11131650.
- [13] N. R. Cândido, V. M. D. Pasa, A. de O. Vilela, Â. D. Campos, Â. de Fátima, and L. V. Modolo, "Understanding the multifunctionality of pyroligneous acid from waste biomass and the potential applications in agriculture," *Sci. Total Environ.*, vol. 881, 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163519.
- [14] A. S. Rezki, Y. R. Wulandari, L. R. Alvita, and N. P. Sari, "Potential of Empty Fruit Bunches (EFB) Waste as Bioenergy to Produce Bio-Oil using Pyrolysis Method: Temperature Effects," *Rekayasa Bahan Alam dan Energi Berkelanjutan*, vol. 7, no. 1, pp. 22–29, 2023, [Online]. Available: <https://rbaet.ub.ac.id/index.php/rbaet/article/view/2930>
- [15] H. D. Putri, S. Sumpono, and N. Nurhamidah, "UJI AKTIVITAS ASAP CAIR CANGKANG BUAH KARET (Hevea brasiliensis) DAN APLIKASINYA DALAM PENGHAMBATAN KETENGIKAN DAGING SAPI," *Alotrop*, vol. 2, no. 2, pp. 97–105, 2019, doi: 10.33369/atp.v2i2.7474.
- [16] S. Komarayati, G. Gusmailina, and L. Efiyanti, "Karakteristik Dan Potensi Pemanfaatan Asap Cair Kayu Trema, Nani, Merbau, Matoa, Dan Kayu Malas," *J. Penelit. Has. Hutan*, vol. 36, no. 3, pp. 219–238, 2018, doi: 10.20886/jphh.2018.36.3.219-238.

- [17] M. Yatagai, M. Nishimoto, K. Hori, T. Ohira, and A. Shibata, "Termiticidal activity of wood vinegar, its components and their homologues," *J. Wood Sci.*, vol. 48, no. 4, pp. 338–342, 2002, doi: 10.1007/BF00831357.
- [18] J. Nasywa and K. Sa'diyah, "Pengaruh Jumlah Massa Umpan Sekam Padi Terhadap Kualitas Asap Cair Pada Proses Pirolisis," *DISTILAT J. Teknol. Separasi*, vol. 8, no. 3, pp. 559–566, 2023, doi: 10.33795/distilat.v8i3.500.
- [19] H. Moghadam, M. Samimi, A. Samimi, and M. Khorram, "Study of Parameters Affecting Size Distribution of Beads Produced from Electro-Spray of High Viscous Liquids," *Iran. J. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 3, pp. 88–98, 2009.
- [20] Raju Muhammad, "Karakterisasi Arang dan Gas-Gas Hasil Pirolisis Limbah Kelapa Sawit," *J. Keteknikan Pertan.*, vol. 4, no. 2, pp. 153–160, 2016.
- [21] B. Igliński, W. Kujawski, and U. Kielkowska, "Pyrolysis of Waste Biomass: Technical and Process Achievements, and Future Development—A Review," *Energies*, vol. 16, no. 4, 2023, doi: 10.3390/en16041829.
- [22] Y. R. Wulandari, A. S. Rezki, D. A. Afifah, N. P. Sari, V. Elsyana, and H. Gustian, "Studi Karakteristik Komposisi Produk Katalitik Pirolisis TKKS dengan katalis Al White," *JoASCE (Journal Appl. Sci. Chem. Eng.)*, vol. 1, no. 1, pp. 22–26, 2023, doi: 10.25181/joasce.v1i1.3020.
- [23] D. F. Nury, M. Z. Luthfi, and S. Zullaikah, "Pengaruh Kondisi Temperatur Pirolisis Tandan Kosong Kelapa Sawit Terhadap Komposisi Produk Tar," *React. J. Res. Chem. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 22–27, 2022.
- [24] A. S. Ginting, A. H. Tambunan, D. Radite, and P. A. Setiawan, "Karakteristik Gas-Gas Hasil Pirolisis Tandan Kosong Kelapa Sawit Characteristics of Gases of Palm Oil Empty Fruit Bunches Pyrolysis," *J Tek Ind Pert*, vol. 25, no. 2, pp. 158–163, 2015.