

## PEMURNIAN ASAP CAIR DARI SERBUK GERGAJI KAYU MELALUI INTEGRASI PROSES DISTILASI DAN ADSORPSI ZEOLIT: KARAKTERISASI SENYAWA KIMIA

Wahyu Anggo Rizal<sup>1\*</sup>, Andri Suwanto<sup>1</sup>, Ria Suryani<sup>1</sup>, Muslih Anwar<sup>1</sup>, Dwi Joko Prasetyo<sup>1</sup>, Satriyo Krido Wahono<sup>1</sup>, Roni Maryana<sup>2</sup>, Hernawan<sup>1</sup>, Ponco Yulianto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pusat Riset Teknologi dan Proses Pangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional  
Jl. Jogja-Wonosari Km 31,5 Yogyakarta 55861

<sup>2</sup> Pusat Riset Kimia Maju, Badan Riset dan Inovasi Nasional  
Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang Selatan, Banten, 15314

\*Penulis korespondensi: wahyuanggorizal@gmail.com

### ABSTRAK

Proses pemurnian asap cair dari biomassa gergaji kayu merupakan langkah penting untuk menghasilkan produk yang lebih berkualitas dan dapat digunakan dalam berbagai aplikasi industri. Penelitian ini mengintegrasikan distilasi dan adsorpsi menggunakan zeolit untuk meningkatkan efektivitas pemurnian asap cair. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan proses integrasi pemurnian asap cair secara distilasi dan adsorpsi dengan zeolit untuk meningkatkan kualitas asap cair. Analisis komponen penyusun senyawa aktif dan senyawa berbahaya pada asap cair dilakukan dengan Gas Chromatography - Mass Spectrometry. Hasil analisis menunjukkan bahwa integrasi proses distilasi dan adsorpsi zeolit mampu secara signifikan meningkatkan kualitas asap cair yang dihasilkan. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan persentase senyawa berbahaya terutama 2-propanone dan 2-butanone, dengan ZA1 sebagai zeolit paling efektif untuk mereduksi senyawa tersebut. Persentase senyawa fungsional seperti asam asetat meningkat pada semua sampel, dengan hasil paling optimal pada sampel DZN 33.05 %. Persentase senyawa fenolat relatif stabil dan tidak banyak terpengaruh oleh perlakuan ini. Kedua jenis senyawa ini bermanfaat untuk aplikasi pada produk pangan. Penggunaan zeolit sebagai adsorben dalam proses ini terbukti efisien dan efektif, mengingat kemampuan selektifitasnya terhadap proses adsorpsi pada asap cair. Integrasi kedua metode ini tidak hanya meningkatkan kualitas produk akhir saja tetapi juga menawarkan pendekatan yang lebih efektif dibandingkan hanya distilasi saja. Dengan demikian, integrasi proses distilasi dan adsorpsi zeolit merupakan solusi inovatif dan efektif untuk pemurnian asap cair dari biomassa serbuk gergaji kayu, memberikan nilai tambah bagi industri pengolahan biomassa serta berpotensi untuk diterapkan dalam skala yang lebih luas.

**Kata Kunci:** Biomassa, Asap Cair, Distilasi, Adsorpsi, Zeolit

### 1 PENDAHULUAN

Biomassa dapat diperoleh dari limbah pertanian, hutan, maupun limbah industry. Serbuk gergaji kayu adalah produk samping dari proses industri furnitur kayu, dengan jumlah limbahnya berkisar 12-25 kg dari setiap 100 kg kayu yang diproduksi (Rizal et al., 2020). Serbuk gergaji kayu merupakan salah satu limbah utama yang diperoleh dari produksi pengolahan kayu, dan kegiatan eksploitasi kehutanan. Jika tidak ditangani dengan tepat maka akan menjadi kontributor utama dalam pencemaran lingkungan (Adegoke et al., 2022). Salah satu metode untuk memanfaatkan dan mengolah limbah ini adalah dengan teknologi konversi biomassa. Teknologi konversi biomassa dapat menghemat biaya dan memberi solusi dalam pengolahan limbah secara

berkelanjutan. Teknologi ini didasarkan pada tiga jalur utama; biokimia, termokimia dan fisika (Nizami et al., 2017). Diantara ke tiga jalur konversi tersebut, termokimia merupakan salah satu metode yang paling menguntungkan dan efektif untuk proses konversi biomassa, karena dapat diaplikasikan pada seluruh jenis biomassa.

Pirolisis merupakan salah satu proses konversi biomassa secara termokimia yang menjanjikan serta ramah lingkungan, mampu mengkonversi biomassa menjadi produk turunan tergantung pada kondisi prosesnya (Rizal et al., 2024). Dengan teknologi ini, serbuk gergaji kayu telah banyak terkonversi menjadi beberapa produk turunan, termasuk untuk bahan papan partikel, media tanam untuk jamur, bahan bakar briket, bio oil dan bahan baku asap cair (Haq et al., 2021; Liu et al., 2018; Rizal, et al., 2022a; Safitri et al., 2024; Susilo et al., 2017). Asap cair merupakan salah satu produk hasil pirolisis yang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi antara lain sebagai pewarna, pengawet, penyedap daging dan sosis (Mansur et al., 2021). Komposisi utama dari asap cair antara lain senyawa asam, fenol, karbonil, furan dan furfural yang berasal dari degradasi termal komponen biomassa. Campuran dari sejumlah golongan senyawa ini memberikan ciri khas berupa sifat anti bakteri, anti oksidan dan sifat sensoris organoleptik dari asap cair (Rizal, et al., 2022a). Senyawa asam mampu menghambat pertumbuhan mikroba pada produk makanan yaitu jamur dan bakteri, sedangkan jenis senyawa fenol dapat memberikan sifat antioksidan dan antibakteri yang efektif pada berbagai jenis organisme bakteri jenis gram positif maupun negatif, kapang dan ragi (Suryani et al., 2020). Namun, salah satu keterbatasan dari asap cair hasil pirolisis secara langsung (*crude*) adalah adanya beberapa kandungan senyawa berbahaya sehingga tidak sesuai jika diaplikasikan pada bidang pangan. Oleh karena itu, diperlukan perlakuan tambahan seperti distilasi atau adsorpsi untuk memurnikan asap cair (Rizal et al., 2022b). Melalui proses pemurnian, senyawa berbahaya yang tidak diinginkan dapat dihilangkan, dan intensitas rasa, warna pada asap cair dapat dipertahankan (Rizal et al., 2020).

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa perlakuan distilasi dan adsorpsi dengan zeolit pada asap cair mampu menurunkan kandungan senyawa berbahaya seperti 2-propanone, 2-butanone dan cyclopentanone. Dengan mengintegrasikan ke-dua proses pemurnian tersebut, di harapkan dapat diperoleh asap cair yang lebih berkualitas. Proses pemurnian asap cair dari biomassa gergaji kayu merupakan langkah penting untuk menghasilkan produk yang lebih berkualitas dan dapat dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi industri. Berdasarkan pada penelitian terdahulu tersebut, Penelitian ini bertujuan mengintegrasikan distilasi dan adsorpsi menggunakan zeolit, untuk meningkatkan efektivitas pemurnian dan kualitas asap cair. Kualitas asap cair diukur berdasarkan komponen penyusun senyawa aktif pada asap cair yang dianalisis menggunakan Gas Chromatography – Mass Spectrometry (GC-MS).

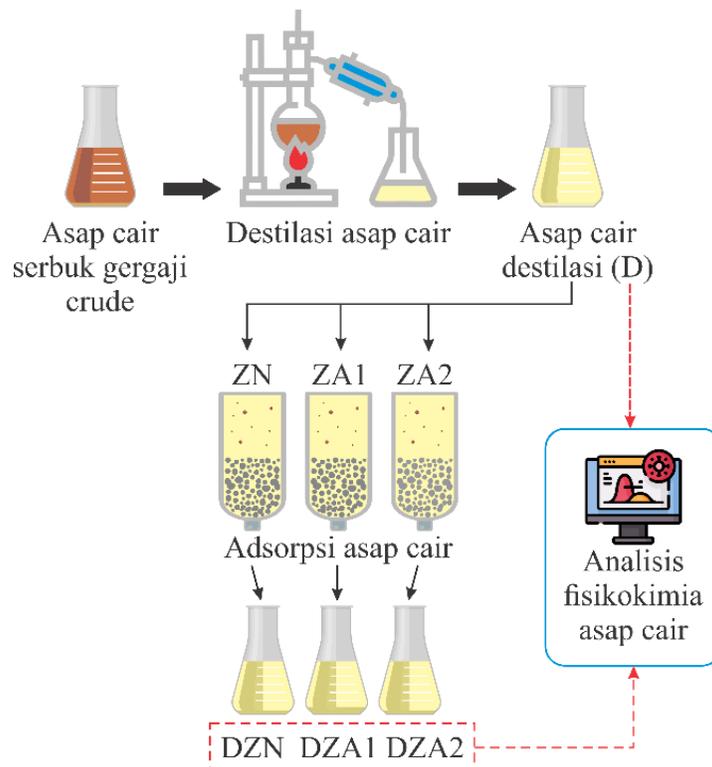
## **2 METODE**

### **2.1 Bahan dan Alat**

Bahan asap cair diperoleh dari proses pirolisis selama 8 jam pada suhu 500 °C dengan bahan baku serbuk gergaji kayu sejumlah 3.6 kg sesuai dengan penelitian terdahulu dari (Rizal et al., 2020). Zeolit natural yang digunakan sebagai media adsorben diperoleh dari daerah Gunungkidul dan di aktivasi dengan menggunakan HCL 1N dan 12N berdasarkan penelitian sebelumnya oleh (Rizal et al., 2022b). Alat yang digunakan pada penelitian ini antara lain, neraca analitik, perangkat alat distilasi, alat gelas erlenmeyer 500 ml, botol vial, pH meter dan instrumen GC-MS- QP2010S (Shimadzu, Japan) dengan kolom AGILENT DB-624.

## 2.2 Integrasi Pemurnian Asap Cair Distilasi dan Adsorpsi

Proses pemurnian asap cair dilakukan secara paralel. Asap cair crude hasil pirolisis diambil sebanyak 200 mL dan didistilasi pada suhu 100 °C, kemudian asap cair hasil distilasi ditampung pada erlenmeyer. Adsorpsi dilakukan dengan menggunakan zeolit natural Gunungkidul (ZN), zeolit teraktivasi HCL 1N (ZA1) dan zeolit teraktivasi HCL 12N (ZA2). Jumlah perbandingan adsorben dan asap cair adalah 1:2 berdasarkan berat, kemudian asap cair dan adsorben ditampung dalam wadah dan didiamkan selama 6 jam. Sifat fisik dari asap cair diamati dengan memperhatikan transparansi, adanya benda terapung, dan warna secara visual. Aroma asap cair diamati kepekatannya secara sensoris dengan penciuman bau. Sifat kimia asap cair diukur antara lain derajat keasaman dengan pH meter dan identifikasi senyawa fungsional dengan GC-MS. Pengukuran GC-MS dioptimalkan dengan suhu kolom mulai dari 60 °C dan dinaikkan hingga mencapai 200 °C, yang ditahan selama 30 menit. Gas helium sebagai pembawa diatur pada tekanan 50 kPa. Data MS dari senyawa asap cair disusun berdasarkan berat molekul pada rentang antara 28-600 m/z dalam waktu 1,2 menit sampai 70 menit, dengan suhu injektor disetel pada 250 °C (Rizal et al., 2022b). Diagram proses penelitian ini ditunjukkan pada gambar 1.



**Gambar 1.** Diagram alir proses penelitian

Secara keseluruhan kegiatan penelitian ini dilaksanakan di Pusat Riset Teknologi dan Proses Pangan (PRTPP), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jl. Jogja-Wonosari Km 31.5, Gunungkidul, DI Yogyakarta

## 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Karakter dan Sifat Fisik Asap Cair

Hasil distilasi asap cair (D) berwarna kuning muda jernih, dengan aroma asap yang cenderung lebih ringan daripada asap cair crude dan mempunyai nilai pH 2. Asap cair hasil distilasi kemudian

diadsorpsi dengan zeolit natural Gunungkidul (ZN) dengan hasil warna cenderung lebih kuning pekat jika dibandingkan dengan hasil distilasi (D) dan aroma asap hampir sama dengan asap cair (D) dengan nilai pH 5, adsorpsi dengan menggunakan zeolit (ZA1) menghasilkan warna kuning yang lebih jernih hampir mendekati warna asap cair (D) dengan aroma asap ringan dan pH 3. Hasil adsorpsi asap cair dengan zeolit (ZA2) menghasilkan warna kuning pekat seperti pada asap cair (DZN) dengan nilai pH 4. Warna dari hasil asap cair ditunjukkan pada Gambar 2. Secara keseluruhan pada asap cair tidak terlihat ditemukan benda terapung.



**Gambar 2.** Hasil produk asap cair

Perbedaan warna dari asap cair pada proses ini menunjukkan adanya perubahan yang dalam komposisi senyawa kimianya (Oktafany et al., 2016). Senyawa fenol, asam serta karbonil merupakan golongan senyawa yang mempengaruhi warna dan aroma dari asap cair (Xin et al., 2020). Hal ini sesuai dengan tujuan dari proses integrasi distilasi dan adsorpsi yaitu mendapatkan asap cair yang lebih murni, jernih dan bebas dari golongan senyawa berbahaya. Asap cair yang berwarna cerah dan jernih tanpa adanya benda terapung memiliki kualitas yang lebih baik daripada asap cair yang berwarna pekat (Prayitno et al., 2014). Selain itu warna asap cair jernih dan tidak ada benda terapung mengindikasikan tidak adanya kandungan tar didalamnya (Yulistiani et al., 2020). Warna asap cair hasil integrasi proses distilasi dan adsorpsi yang paling optimal adalah pada asap cair (DZA1) dengan warna kuning jernih dan pH mendekati asap cair (D) dengan nilai 3. Spesifikasi standar asap cair negara Jepang dalam pada penelitian (Triawan et al., 2023) adalah mempunyai nilai pH 1.50 – 3.70, sehingga hasil asap cair yang masuk dalam standar adalah asap cair (DZA1) dengan nilai pH3, sedangkan DZN dan DZA2 tidak memenuhi standar tersebut. Dengan demikian adsorben zeolit Gunungkidul yang diaktivasi HCL 1N mampu meningkatkan kualitas fisik dari asap cair dari segi warna, keberadaan benda terapung dan nilai pH nya.

### **3.2 Karakter dan Sifat Kimia Asap Cair**

Asap cair distilasi (D) dan hasil adsorpsi (DZN, DZA1, DZA2) kemudian dilakukan analisis menggunakan GC-MS untuk mengetahui senyawa penyusun yang terdapat pada asap cair dan perubahan jenis senyawa akibat adsorpsi oleh zeolit. Hasil analisis GC-MS mengidentifikasi lima golongan senyawa paling dominan, yaitu asam, alkohol, karbonil, furan, dan fenolat, serta beberapa senyawa lainnya dengan konsentrasi lebih rendah. Hasil analisis menggunakan GC-MS disajikan pada Tabel 1.

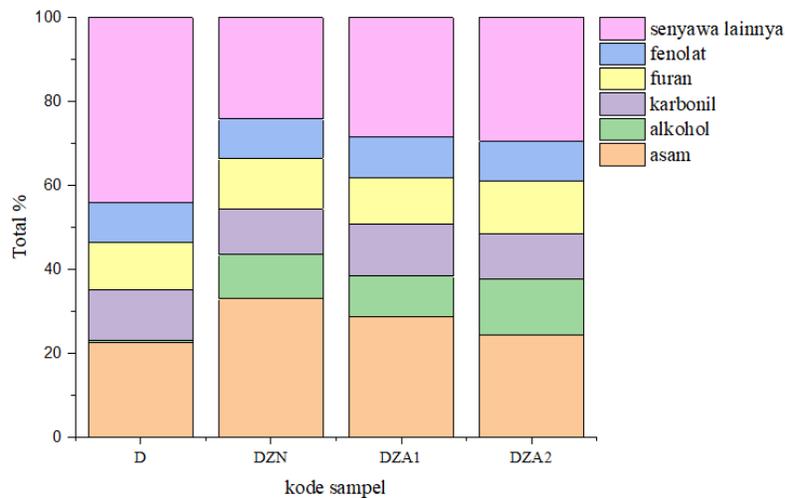
**Tabel 1.** Senyawa asap cair hasil analisa GC-MS

No	Kelompok Senyawa	Nama Senyawa	Area%			
			D	DZN	DZA1	DZA2
1	Asam	Asam Format	-	-	0.21	-
2		Asam Asetat	18.91	27.18	22.86	19.13
3		Asam Propionat	2.38	4.05	3.61	2.76
4		Asam Isobutirat	-	0.26	0.27	0.26
5		Asam Butirat	1.28	1.56	1.52	1.47
6		Senyawa Asam lainnya	-	-	0.55	0.69
7	Alkohol	Metanol	-	9.52	8.31	12.4
8		Etanol	0.53	0.8	0.69	0.64
9		2-propenol	-	0.28	0.32	0.3
10		Senyawa alkohol lainnya	-	-	0.31	-
12	Karbonil	2-propanon	0.92	0.71	0.62	2.67
13		2,3-butadienon	1.45	-	0.98	-
14		2-butanon	0.43	0.34	0.29	0.3
15		1-hidroksi-2-propanon	3.41	3.03	2.78	-
16		1-hidroksi-2-butanon	1.83	1.74	1.57	1.25
17		Siklopentanon	1.8	2.17	1.93	2.01
18		2-metil-2-siklopenten-1-on	-	0.61	1.97	1.98
19		3-metil-2-siklopenten-1-on	2.32	-	0.5	0.44
20		2,3-Dimetil-2-siklopenten-1-on	-	-	0.65	0.74
21		Senyawa karbonil lainnya	-	2.22	1.17	1.5
22	Furan	Furfural	11.17	10.95	9.59	9.96
23		Asetil furan	-	0.54	-	1.15
24		5-metil furfural	-	0.57	0.65	0.56
25		Senyawa Furan lainnya	-	-	0.86	0.73
26	Fenolat	Guaiacol	-	5.7	4.99	5.55
27		m-Kresol	2.02	2.27	2.05	2.04
28		2,4-dimetil fenol	-	-	0.54	0.6
29		2-metoksi-4-metil fenol	1.04	0.78	0.69	0.71
30		4-etil-2-metoksi fenol	-	-	0.27	0.32
31		4-metoksi fenol	6.49	-	-	-
32		Senyawa fenolat lainnya	-	0.51	1.26	0.45
33	Senyawa lainnya	-	44.02	24.2	28.7	29.38

Secara keseluruhan hasil analisis GC-MS menunjukkan bahwa asap cair D memiliki 20 jenis senyawa penyusun, DZN 28 senyawa, DZA1 52 senyawa dan DZA2 52 senyawa. Oleh karena itu proses adsorpsi dapat mempengaruhi perubahan komposisi jumlah senyawa dari asap cair. Hal ini dimungkinkan karena proses aktivasi dengan HCl pada zeolit mempengaruhi struktur kristal, merubah porositas dan rasio perbandingan Si/Al dari zeolit (Atikah, 2017; Rizal et al., 2022b). Berdasarkan data GC-MS diatas dapat diketahui bahwa senyawa paling dominan adalah golongan

asam pada rentang 22 – 33 % dan asam asetat merupakan sebagai senyawa terbanyak pada keseluruhan sampel. Setelah melalui proses adsorpsi persentase asam asetat cenderung naik dengan persentase tertinggi pada DZN sebesar 27.18 % dan terendah DZA2 sebesar 19.13 %. Oleh karena itu melalui proses adsorpsi, konsentrasi senyawa asam asetat dapat ditingkatkan. Asam asetat merupakan asam organik yang bermanfaat untuk mengatur keasaman, memberikan aroma manis asap, dan mengubah tekstur pada jenis makanan yang menggunakan aplikasi asap cair (Xin et al., 2020).

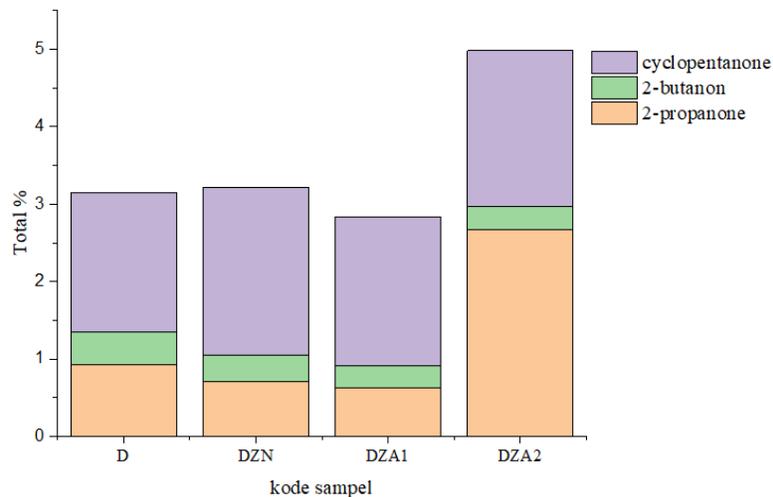
Golongan senyawa fenolat secara menyeluruh tidak terpengaruh secara signifikan pada perlakuan ini, tidak terjadi banyak perubahan pada rentang 9.26 - 9.80 %. Oleh karena itu proses adsorpsi tidak banyak mempengaruhi jumlah persentase senyawa fenolat. Kandungan senyawa fenolat pada asap cair dimanfaatkan sebagai bahan anti oksidan dan dapat memberikan aroma serta cita rasa asap pada makanan (Suryani et al., 2022; Xin et al., 2020). Secara keseluruhan perbandingan jumlah total golongan senyawa pada asap cair ditunjukkan pada Gambar 3. Komponen asam dapat menghambat terbentuknya spora, pertumbuhan bakteri, fungi dan aktivitas virus yang menghambat pembusukan makanan. Sementara fenol berperan sebagai antioksidan yang dapat menghambat oksidasi atau ketengikan, sehingga dapat memperpanjang masa simpan suatu produk makanan (Rizal et al., 2020).



**Gambar 3.** Persentase jumlah golongan senyawa pada asap cair

Beberapa senyawa berbahaya pada asap cair yang disebutkan oleh (Ratnawati & Singgih, 2010) antara lain 2-propanone, 2-butanone, cyclopentanone. Ketiga senyawa tersebut terkandung dalam sampel asap cair dengan jumlah yang beragam dan mengalami perubahan setelah adsorpsi. Pada asap cair D diketahui persentase 2-propanone sebesar 0.92 % dan setelah adsorpsi secara menyeluruh terjadi penurunan terbesar 32.61 %, pada DZA1 menjadi 0.62 %. Persentase 2-butanone pada asap cair D sebesar 0.43 % dan setelah melalui proses adsorpsi persentasenya menurun terbesar 32.56 % pada DZA1 menjadi 0.29 %. Sedangkan persentase cyclopentanone pada asap cair D sebanyak 1.80 % dan setelah adsorpsi persentasenya cenderung naik, antara lain pada DZN 2.17 %, DZA1 1.93% dan DZA2 2.01%. Hal ini menunjukkan bahwa proses integrasi adsorpsi dengan zeolit paling optimal adalah untuk menurunkan persentase dari 2-propanone dan 2-butanone, sedangkan zeolit paling optimal untuk menurunkan senyawa berbahaya tersebut

adalah DZA1 jika dibandingkan dengan DZN dan DZA2. Perbandingan jumlah penurunan komposisi senyawa 2-propanone, 2-butanone, cyclopentanone berdasarkan % areanya ditunjukkan pada Gambar 4.



**Gambar 4.** Persetase jumlah golongan senyawa 2-propanone, 2-butanone, cyclopentanone pada asap cair

#### 4 KESIMPULAN

Proses integrasi pemurnian asap cair antara distilasi dan adsorpsi dengan zeolit mampu mengurangi komposisi senyawa berbahaya, terutama 2-propanone dan 2-butanone. Hal ini ditunjukkan dari hasil penurunan persentase kedua senyawa tersebut pada sampel DZN, DZA1 (2-propanone), dan 2-butanone pada semua sampel. Selain itu, metode integrasi ini juga dapat meningkatkan kadar senyawa golongan asam, terutama asam asetat, yang bermanfaat untuk aplikasi dalam produk pangan. Penggunaan zeolit sebagai adsorben dalam proses ini terbukti efisien dan efektif, mengingat kemampuan selektivitasnya terhadap proses adsorpsi pada asap cair. Integrasi kedua metode ini tidak hanya meningkatkan kualitas produk akhir saja tetapi juga menawarkan pendekatan yang lebih efektif dibandingkan hanya distilasi saja. Dengan demikian, integrasi proses distilasi dan adsorpsi zeolit merupakan solusi inovatif dan efektif untuk pemurnian asap cair dari biomassa gergaji kayu, meningkatkan kualitasnya dan memberikan nilai tambah bagi industri pengolahan biomassa serta berpotensi untuk diterapkan dalam skala yang lebih luas

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional dalam pendanaan kegiatan rumah program No No. 9/III.11/HK/2023 and 2024. Beserta seluruh teknisi litkayasa Pusat Riset Teknologi dan Proses Pangan yang telah banyak membantu dalam terlaksananya kegiatan penelitian.

#### DAFTAR PUSTAKA

Adegoke, K. A., Adesina, O. O., Okon-Akan, O. A., Adegoke, O. R., Olabintan, A. B., Ajala, O. A., Olagoke, H., Maxakato, N. W., & Bello, O. S. (2022). Sawdust-biomass based materials for sequestration of organic and inorganic pollutants and potential for engineering applications. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 5(January), 100274. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100274>

- Atikah, W. S. (2017). Potensi Zeolit Alam Gunung Kidul Teraktivasi Sebagai Media Adsorben Pewarna Tekstil the Potentiality of Activated Natural Zeolite From Gunung Kidul As Adsorben To Textile Dyes. *Arena Tekstil*, 32, 17–24. <https://media.neliti.com/media/publications/217434-karakterisasi-zeolit-alam-gunung-kidul-t.pdf>
- Haq, I., Qaisar, K., Nawaz, A., Akram, F., Mukhtar, H., Zohu, X., Xu, Y., Mumtaz, M. W., Rashid, U., Azlina, W., Ab, W., Ghani, K., Shean, T., & Choong, Y. (2021). *Advances in Valorization of Lignocellulosic Biomass towards Energy Generation*. 1–25.
- Liu, Z., Zhang, F., Liu, H., Ba, F., Yan, S., & Hu, J. (2018). Bioresource Technology Pyrolysis / gasification of pine sawdust biomass briquettes under carbon dioxide atmosphere : Study on carbon dioxide reduction (utilization) and biochar briquettes physicochemical properties. *Bioresource Technology*, 249(November 2017), 983–991. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.012>
- Mansur, D., Sugiwati, S., Rizal, W. A., Suryani, R., & Maryana, R. (2021). Pyrolysis of cajuput (*Melaleuca leucadendron*) twigs and rice (*Oryza sativa*) husks to produce liquid smoke-containing fine chemicals for antibacterial agent application. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01896-x>
- Nizami, A. S., Rehan, M., Waqas, M., Naqvi, M., Ouda, O. K. M., Shahzad, K., Miandad, R., Khan, M. Z., Syamsiro, M., Ismail, I. M. I., & Pant, D. (2017). Waste biorefineries: Enabling circular economies in developing countries. *Bioresource Technology*, 241, 1101–1117. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.097>
- Oktafany, E., Idiawati, N., & Harlia. (2016). Pengaruh Destilasi Berulang Dan Pemurnian Menggunakan Zeolit Teraktivasi H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Terhadap Komposisi Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS). *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 5(4), 62–67.
- Prayitno, T. A., Pramana, J., & Sutapa, G. (2014). Kualitas Asap Cair Batang Gelam (*Melaleuca sp.*) (*Quality of Wood Vinegar Stem Gelam (Melaleuca sp.)*). 32(2), 83–92.
- Ratnawati, & Hartanto, S. (2010). Pengaruh Suhu Pirolisis Cangkang Sawit Terhadap Kuantitas Dan Kualitas Asap Cair. *Jurnal SainsMateri Indonesia*, 12(1), 7–11.
- Rizal, wahyu anggo, Nisa, K., Maryana, R., Prasetyo, dwi joko, Pratiwi, D., Jatmiko, tri hadi, Ariani, D., & Suwanto, A. (2020). Chemical composition of liquid smoke from coconut shell waste produced by SME in Rongkop Gunungkidul. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 462(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/462/1/012057>
- Rizal, W. A., Suryani, R., Anwar, M., Prasetyo, D. J., Wahono, S. K., Apriyana, W., Jatmiko, T. H., Suwanto, A., Maryana, R., Hernawan, H., & Hariyadi, S. (2022). Efektivitas Pemurnian Asap Cair Biomassa Serbuk Gergaji dengan Distilasi, Adsorpsi Zeolite dan Karbon Aktif. *Jurnal Selulosa*, 12(01), 11. <https://doi.org/10.25269/jsel.v12i01.353>
- Rizal, W. A., Suryani, R., Wahono, S. K., Anwar, M., Prasetyo, D. J., Amdani, R. Z., Suwanto, A., & Februanata, N. (2020). Pirolisis limbah biomassa serbuk gergaji kayu campuran: parameter proses dan analisis produk asap cair the pyrolysis of mixed sawdust biomass: process parameters and analysis of liquid smoke products. *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 14(2), 353–364.
- Rizal, W. A., Wahono, S. K., & Yuliansyah, A. T. (2024). Enhancing wood vinegar quality: Integrated pyrolysis process of cajuput (*Melaleuca leucadendron*) twigs biomass with gas-phase adsorption using zeolite adsorbents. *Bioresource Technology Reports*, 26(January), 101840. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101840>
- Safitri, E. D., Arifin, A. S. R., Prima, F. K., & Putri, P. Y. (2024). Karakteristik Papan Partikel

- Berbahan Limbah Eco-Friendly. *Applied Science in Civil Engineering*, 5, 28–33.
- Suryani, R., Daradwinta, R., Az-Zahra, S., Rahmah, S. A., Rizal, W. A., Jatmiko, T. H., Apriyana, W., & Purwestri, Y. A. (2022). Antioxidant Activity, Total Phenolic Content, and Chemical Composition of Liquid Smoke Derived from Wood Sawdust. *Proceedings of the 7th International Conference on Biological Science (ICBS 2021)*, 22(Icbs 2021), 634–639. <https://doi.org/10.2991/absr.k.220406.091>
- Suryani, R., Rizal, W. A., Pratiwi, D., & Prasetyo, D. J. (2020). Characteristics and Antibacterial Activity of Liquid Smoke From White Wood (*Melaleuca leucadendra*) and Teak Wood (*Tectona grandis*) Biomass. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 21(2), 106–117.
- Susilo, H., Rikardo, R., & Suyamto, S. (2017). Pemanfaatan Limbah Serbuk Gergaji Sebagai Media Budidaya Jamur Tiram (*Pleurotus Ostreatus L.*). *Jurnal Pengabdian Pada Masyarakat*, 2(1), 51–56. <https://doi.org/10.30653/002.201721.16>
- Triawan, D. A., Nurwidiyani, R., Nesbah, Hamurwani, D. S., Puteri, N. A., Nasution, A. V., & Yuliyani, U. (2023). Preparation of Liquid Smoke Made from Coffee Husk and Its Application as A Latex Coagulant. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 24(1), 1–8.
- Wahyu Anggo Rizal, Suryani, R., Maryana, R., Prasetyo, D. J., Pratiwi, D., Ratnawati, Y. A., Ariani, D., & Andri, S. (2022). Coconut Shell Waste Treatment Technology for A Sustainable Waste Utilization: A Case Study of the SMEs in Bohol Village, Indonesia. *ASEAN Journal of Community Engagement*, 6(2), 278–293.
- Xin, X., Dell, K., Udugama, I. A., Young, B. R., & Baroutian, S. (2020). Transforming biomass pyrolysis technologies to produce liquid smoke food flavouring. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125368>
- Yulistiani, F., Husna, A., Fuadah, R., Keryanti, Sihombing, R. P., Permanasari, A. R., & Wibisono, W. (2020). *The Effect of Distillation Temperature in Liquid Smoke Purification Process: A Review. February 2021*. <https://doi.org/10.2991/aer.k.201221.088>