

Potensi Limbah Biomassa Menjadi Karbon Aktif Sebagai Upaya *Resources Recovery* : Studi Literatur

Lutfi Adhi Setiaprja¹, Mohamad Rangga Sururi¹, Veny Rachmawati²

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan,
Institut Teknologi Nasional, Bandung

²Pusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

*Koresponden email: lutfiadhi.setiaprja@gmail.com

Diterima: 15 Desember 2023

Disetujui: 18 Desember 2023

Abstract

Reutilization of natural resources as a resource recovery effort is one aspect of sustainable development, one of which is the utilization of biomass waste. Biomass waste is waste from agricultural, plantation, livestock, and forestry processes that contain organic matter composed of carbon dioxide bonds, air, water, soil, and sunlight from plants and animals. Pollution by the accumulation or untreated biomass waste will result in the potential formation of greenhouse gases (GHG). One of the efforts is to utilize biomass waste into activated carbon by carbonizing and activating the biomass waste. The indication of why biomass waste can be used as a material for making activated carbon is because biomass waste contains lignocellulosic materials that have the ability to absorb metals and colors. The purpose of this paper is to see the potential of various kinds of biomass waste that can be utilized into activated carbon by conducting a journal review. The results of the review of various journals show that various kinds of biomass waste can be utilized into activated carbon. The lignocellulosic content of biomass waste consists of lignin in the range of 8%-53.85%, cellulose in the range of 6.92%-81%, and hemicellulose 11%-41%.

Keywords: *biomass waste, utilization, activated carbon, lignin, cellulose, hemicellulose*

Abstrak

Pemanfaatan kembali sumber daya alam sebagai upaya *resources recovery* merupakan salah satu aspek pembangunan berkelanjutan, salah satunya pemanfaatan limbah biomassa. Limbah biomassa merupakan limbah hasil proses pertanian, perkebunan, peternakan, dan perhutanan yang memiliki kandungan bahan organik yang tersusun oleh ikatan karbon dioksida, udara, air, tanah, dan sinar matahari yang berasal dari tumbuhan dan hewan. Pencemaran oleh penumpukan atau tidak terolahnya limbah biomassa akan mengakibatkan potensi pembentukan gas rumah kaca (GRK). Salah satu upaya pemanfaatannya yaitu dengan memanfaatkan limbah biomassa menjadi karbon aktif dengan proses karbonisasi dan aktivasi dari limbah biomassa tersebut. Indikasi mengapa limbah biomassa dapat digunakan menjadi bahan pembuatan karbon aktif karena limbah biomassa mengandung bahan lignoselulosa yang mempunyai kemampuan dalam menyerap logam dan warna. Tujuan dari penulisan ini untuk melihat potensi dari berbagai macam limbah biomassa yang dapat dimanfaatkan menjadi karbon aktif dengan cara melakukan review jurnal. Hasil dari telaah berbagai jurnal menunjukkan bahwa berbagai macam limbah biomassa bisa dimanfaatkan menjadi karbon aktif. Kandungan lignoselulosa pada limbah biomassa terdiri dari lignin pada rentang 8%-53,85%, selulosa pada rentang 6,92%-81%, dan hemiselulosa 11%-41%.

Kata Kunci: *limbah biomassa, pemanfaatan, karbon aktif, lignin, selulosa, hemiselulosa*

1. Pendahuluan

Pemanfaatan kembali sumber daya alam sebagai upaya *resources recovery* merupakan salah satu dari aspek pembangunan berkelanjutan. Salah satu sumber daya yang bisa di manfaatkan kembali adalah limbah biomassa. Limbah biomassa merupakan limbah dari hasil proses pertanian, perkebunan, peternakan, dan perhutanan yang memiliki kandungan bahan organik yang tersusun atas ikatan karbon dioksida (CO₂), udara, air, tanah, dan sinar matahari yang berasal dari tumbuhan dan hewan [1]. Biomassa pada umumnya memiliki kandungan bahan lignoselulosa, bahan ini merupakan struktur penyusun yang memiliki kemampuan untuk mengadsorpsi logam berat karena mengandung gugus-gugus aktif seperti OH dan COOH [2] Biomass lignoselulosa mengandung tiga komponen utama yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin [3]. Selain logam berat, beberapa hasil penelitian menunjukkan adsorben berbahan dasar lignin dapat menyerap polutan diantara fosfat [4] biru metilen [5] dan rhodamine B [6]. Parameter warna dalam industri merupakan salah satu parameter penting dalam indikator suksesnya pengolahan air limbah industri [7].

Pencemaran yang ditimbulkan akibat dari penumpukan atau tidak terolahnya limbah biomassa menuntut penghasil limbah untuk mengelola limbahnya. Salah satu contohnya adalah penumpukan limbah biomassa Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS), TKKS yang dibiarkan menumpuk dan terurai di tempat penampungan akan membentuk suasana anaerobik yang berpotensi menghasilkan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) metana yang besar [8]. Untuk mengatasi permasalahan penumpukan limbah biomassa diperlukan solusi untuk memanfaatkannya. Pemanfaatan limbah biomassa yang mengandung bahan lignoselulosa salah satunya adalah dijadikan karbon aktif. Karbon aktif merupakan suatu padatan berpori yang mengandung 85-95% karbon, dihasilkan dari bahan-bahan yang mengandung karbon akibat dari pemanasan suhu tinggi [9]. Karbon aktif biasa terbuat dari bahan batubara dan bahan biomassa yang mengandung lignoselulosa contohnya seperti sekam padi, tempurung kelapa, tongkol jagung, dan TKKS [10]. Penulisan review jurnal ini untuk membahas potensi dari biomassa yang dapat dimanfaatkan menjadi karbon aktif sebagai salah satu upaya dari *resources recovery*.

2. Metode Penelitian

Pengumpulan data dari penelitian ini merupakan data sekunder dengan melakukan studi literatur tentang berbagai biomassa yang dimanfaatkan menjadi karbon aktif. Setelah mendapatkan literatur dilakukan pengkajian terhadap literatur berbagai biomassa yang dapat dimanfaatkan menjadi karbon aktif. Dalam penelitian ini dilakukan pencarian jurnal atau publikasi ilmiah menggunakan bantuan database artikel yaitu Google Scholar dan Scencedirect. Publikasi yang digunakan sebagai bahan studi literatur dibatasi pada rentang waktu 10 tahun terakhir antara 2013 sampai dengan 2023. Kata kunci yang digunakan adalah “Biomassa sebagai bahan baku karbon aktif” dan “karakteristik kimia berbagai biomassa”. Studi dilakukan dengan membandingkan beberapa literatur kemudian disusun berdasarkan poin-poin penting seperti kandungan dari biomassa, faktor-faktor yang mempengaruhinya, dan efek dari kandungan biomassa tersebut. Sehingga dapat disimpulkan perbandingan antar biomassa yang dapat dijadikan sebagai bahan karbon aktif.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Awal Limbah Biomassa

Biomassa merupakan bahan organik yang dihasilkan melalui proses fotosintesis, baik produknya maupun limbahnya. Biomassa memiliki kelebihan sebagai salah satu energi baru terbarukan (EBT) yaitu sebagai sumber energi yang dapat diperbaharui (*renewable*) yang berakibat dapat menyediakan energi yang berkesinambungan (*sustainable*) [11]. Karakteristik awal dari suatu bahan penting untuk diketahui sebagai dasar dalam pembuatan sebuah produk, dari karakteristik awal ini dapat menggambarkan kondisi awal dari suatu bahan apakah layak atau tidak untuk dibuat menjadi karbon aktif. Berikut merupakan karakteristik kimia dari beberapa limbah biomassa.

Tabel 1. Berbagai Jenis Biomassa dan Kandungannya

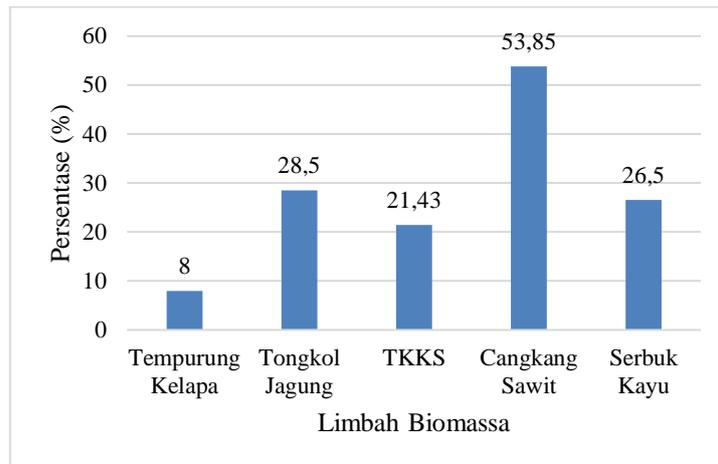
Jenis Limbah Biomassa	Karakteristik	Sumber
Tempurung Kelapa	Lignin 8%, Selulosa 81%, dan Hemiselulosa 11%	[12]
Tongkol jagung	Lignin 28,5%, selulosa 8,5%, dan Hemiselulosa 41%	[13]
Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)	Lignin 21,43%, selulosa 44,63%, dan Hemiselulosa 29,81%	[14]
Cangkang Kelapa Sawit	Lignin 53,85%, selulosa 6,92%, dan Hemiselulosa 26,16%	[15]
Serbuk Kayu	Lignin 26,50%, selulosa 45,42%, dan Hemiselulosa 21%	[16]

Berdasarkan **Tabel 1** terdapat lignin, selulosa dan hemiselulosa. Berdasarkan adanya kandungan ketiga bahan tersebut dapat diindikasikan sebagai sumber bahan baku dalam pembuatan karbon aktif, karena karbon aktif dapat dibuat dengan menggunakan material yang mengandung lignoselulosa sebagai bahan baku karbon aktif [17]. Berikut merupakan uraian dari setiap kandungan:

A. Lignin

Lignin merupakan polimer alam kedua yang paling melimpah dan merupakan salah satu bahan penyusun biomassa berlignoselulosa dengan kandungan mencapai 10- 25%. Lignin tidak larut dalam air dan stabil di alam dan bertindak sebagai "lem" yang menghubungkan selulosa dan hemiselulosa [18].

Berikut merupakan grafik perbandingan kandungan lignin dari berbagai biomassa yang berpotensi dijadikan sebagai bahan karbon aktif:

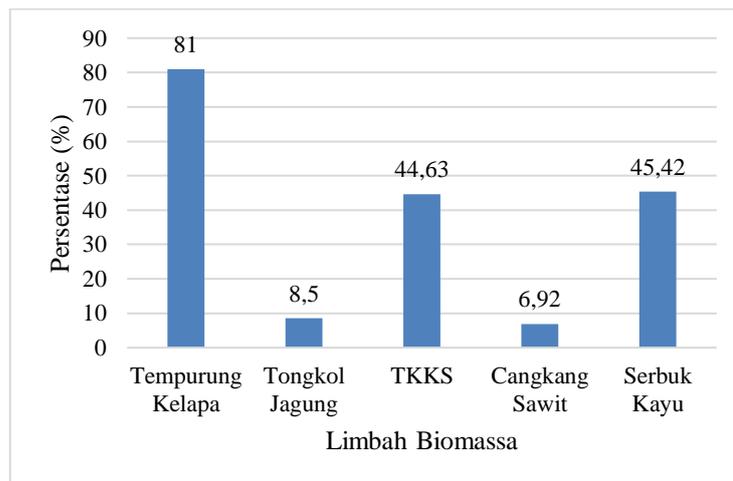


Gambar 1. Grafik Kandungan Lignin Berbagai Limbah Biomassa

Berdasarkan **Gambar 1**, diperoleh bahwa kandungan lignin tertinggi dimiliki oleh cangkang kelapa sawit dengan kandungan lignin 53,85%. Kandungan lignin merupakan salah satu indikator kualitas bahan organik, tinggi rendahnya kandungan ini memiliki indikasi cepat tidaknya suatu bahan untuk terdekomposisi secara alami [19]. Lignin yang menjadi salah satu penyusun biomassa memiliki fungsi sebagai perekat antar sel, proporsi kandungan lignin yang meningkat terjadi karena penurunan nilai selulosa dan hemiselulosa [20]. Kadar lignin yang semakin tinggi baik untuk proses pembakaran. Karena nilai kadar lignin yang terdekomposisi pada suhu 280°C-500°C dan dapat memberikan rendemen karbon aktif yang banyak [20]. Rentang nilai lignin yang terkandung dalam lima jenis limbah biomassa berada pada nilai 8%-53,85%.

B. Selulosa

Selulosa merupakan substansi yang tidak larut dalam air yang terdapat di dalam dinding sel tanaman terutama dari bagian batang, tangkai dan semua bagian yang mengandung kayu. Selulosa merupakan homopolisakarida yang mempunyai molekul berbentuk linear [18]. Berikut merupakan grafik perbandingan kandungan selulosa dari berbagai biomassa yang berpotensi dijadikan sebagai bahan karbon aktif:



Gambar 2. Grafik Kandungan Selulosa Berbagai Limbah Biomassa

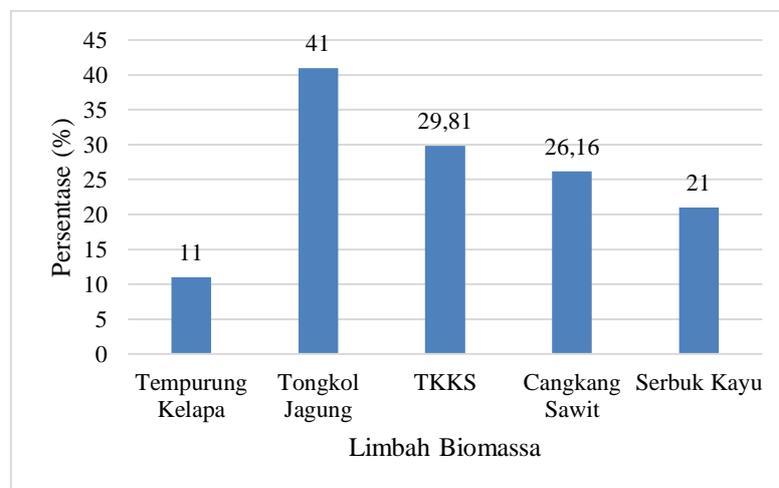
Berdasarkan **Gambar 2**, diperoleh bahwa kandungan selulosa tertinggi dimiliki oleh tempurung kelapa dengan kandungan selulosa 81%. Kandungan selulosa merupakan salah satu indikator kualitas bahan organik, tinggi rendahnya kandungan ini memiliki indikasi cepat tidaknya suatu bahan untuk terdekomposisi secara alami [19]. Sebagian besar selulosa terdapat pada dinding sel dan bagian-bagian berkayu dari tumbuhan. Selulosa merupakan homopolisakarida yang mempunyai molekul berbentuk linear

yang menyebabkan selulosa bersifat kristalin dan tidak mudah larut. Selulosa tidak mudah didegradasi secara kimia maupun mekanis. Di alam, selulosa berasosiasi dengan hemiselulosa dan lignin membentuk struktur utama dinding sel tumbuhan. Karena selulosa menjadi struktur pembentuk kerangka utama, menjadikan selulosa memiliki peran dalam memberikan kekuatan pada serat itu sendiri [21].

Berdasarkan grafik **Gambar 2**, nilai lignin tempurung kelapa merupakan yang tertinggi dengan nilai 81%, berdasarkan literatur dapat ditarik kesimpulan bahwa tempurung kelapa mempunyai waktu paling lama untuk dapat terdegradasi karena nilainya yang tinggi mengindikasikan hubungan antar molekulnya sangat rapat sehingga menjadikan tempurung kelapa memiliki tekstur yang paling keras. Rentang nilai selulosa yang terkandung dalam lima jenis limbah biomassa berada pada nilai 6,92%-81%.

C. Hemiselulosa

Hemiselulosa merupakan kelompok polisakarida heterogen dengan berat molekul rendah. Jumlah hemiselulosa biasanya antara 15 dan 30 persen dari berat kering bahan lignoselulosa. Hemiselulosa mengikat lembaran serat selulosa membentuk mikrofibril yang meningkatkan stabilitas dinding sel sehingga dapat disimpulkan bahwa hemiselulosa merupakan pengisi antara lignin dan selulosa [22]. Berikut merupakan grafik perbandingan kandungan Hemiselulosa dari berbagai biomassa yang berpotensi dijadikan sebagai bahan karbon aktif.



Gambar 3. Grafik Kandungan Hemiselulosa Berbagai Limbah Biomassa

Berdasarkan grafik **Gambar 3** diperoleh bahwa kandungan hemiselulosa tertinggi dimiliki oleh tongkol jagung dengan kandungan hemiselulosa 41%. Kandungan hemiselulosa merupakan salah satu indikator kualitas bahan organik, tinggi rendahnya kandungan ini memiliki indikasi cepat tidaknya suatu bahan untuk terdekomposisi secara alami [19]. Rentang nilai hemiselulosa yang terkandung dalam lima jenis limbah biomassa berada pada nilai 11%-41%. Berdasarkan **Gambar 3**, nilai hemiselulosa tongkol jagung merupakan yang tertinggi dengan nilai 41%, berdasarkan literatur dapat ditarik kesimpulan bahwa tongkol memiliki serat penghubung paling kompleks karena memiliki kadar hemiselulosa yang tinggi.

3.2 Penggunaan Biomassa Sebagai Bahan Baku Karbon Aktif

Karbon aktif merupakan karbon amorf atau karbon yang tidak memiliki bentuk kristal yang melalui aktivasi, memiliki pori-pori yang terbuka sehingga meningkatkan luas permukaan dari struktur karbon aktif yang berdampak pada peningkatan kemampuan dari permukaan untuk menyerap (adsorp) gas ataupun zat-zat dari liquidida [23]. Proses pembuatan karbon aktif secara umum melalui 2 tahap yaitu karbonisasi dan aktivasi. Karbonisasi merupakan suatu proses pembakaran bahan-bahan organik yang berada dalam struktur karbon, proses ini memicu terjadinya pengurangan material zat organik dalam bahan baku dan selanjutnya akan diikuti oleh pelepasan zat-zat pengotor dalam bahan baku, yang berakibat akan membentuk pori-pori, seiring dengan berjalannya proses, akan terjadi perubahan struktur pori [10]. Proses ini merupakan salah satu bagian dari pembuatan karbon aktif yang memiliki tujuan untuk membuka, menambah dan mengembangkan ukuran pori dan memperbesar ukuran diameter pori yang telah terbentuk dalam karbonisasi, dari hasil aktivasi ini karbon aktif akan memiliki daya adsorpsi yang semakin meningkat [24]. Terdapat lima faktor kunci dalam proses aktivasi yang akan menentukan karakteristik dari karbon aktif yang dihasilkan, diantaranya jenis aktivator, ratio aktivator, durasi impregnasi, suhu pirolisis, dan waktu aktivasi [25]. Penggunaan biomassa sebagai bahan baku karbon aktif dapat diindikasikan dari kandungan lignoselulosa dalam bahan. Bahan ini merupakan struktur penyusun dari biomassa yang memiliki

kemampuan untuk mengadsorpsi logam berat [2] dan warna [5] [6]. Dari hasil studi berbagai macam biomassa diatas dapat dilihat bahwa, setiap biomassa memiliki kandungan lignoselulosa yang terdiri atas lignin, selulosa dan hemiselulosa. Berdasarkan kandungan tersebut maka berbagai biomassa dapat dimanfaatkan menjadi bahan baku karbon aktif sebagai adsorben.

3.3 Pemanfaatan Limbah Biomassa Sebagai Upaya *Resources Recovery*

Pembangunan berkelanjutan (*sustainable development*) merupakan suatu kegiatan pembangunan yang mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya alam dan sumber daya manusia secara berkelanjutan untuk mencapai tujuan peningkatan kualitas hidup dan kesejahteraan masyarakat. Salah satu aspek penting dalam pembangunan berkelanjutan adalah pemanfaatan sumber daya alam melalui pemulihan sumber daya (*resource recovery*). *Resource Recovery* merupakan optimalisasi pemanfaatan sumber daya alam dengan melakukan pemulihan dari manfaat sumber daya alam tersebut [26]. Pemanfaatan kembali limbah biomassa menjadi produk yang dapat digunakan memberikan nilai terhadap limbah biomassa tersebut sehingga tidak hanya menjadi limbah, namun bisa dimanfaatkan menjadi suatu produk salah satunya karbon aktif. Selain memberikan manfaat berupa nilai kegunaan yang meningkat, penggunaan kembali limbah biomassa ini akan menurunkan potensi dari pencemaran yang terjadi akibat penumpukan limbah biomassa. Limbah biomassa yang mempunyai karakteristik organik jika dibiarkan menumpuk tanpa pengolahan akan membentuk suasana anaerobik yang berpotensi menghasilkan gas rumah kaca (GRK).

4. Kesimpulan

Penggunaan kembali biomassa sebagai bahan pembuatan karbon aktif dari limbah biomassa seperti tempurung kelapa sawit, tongkol jagung, cangkang sawit, TKKS, dan kayu dapat dilakukan karena bahan ini mempunyai kandungan lignoselulosa yang menjadi indikator bisa atau tidaknya suatu bahan dijadikan sebuah karbon aktif. Dari lima jenis limbah biomassa, yang paling baik yaitu cangkang sawit karena memiliki kadar lignin tertinggi sebesar 53,85%. Kadar lignin ini mempunyai hubungan dengan proses karbonisasi, kandungan lignin yang tinggi berpengaruh pada hasil rendemen karbonisasi yang dihasilkan yang semakin tinggi. Kandungan lignoselulosa ini mengindikasikan suatu bahan dapat menyerap logam berat dan zat warna. Selain itu penggunaan kembali limbah biomassa ini merupakan salah satu upaya *resources recovery*. Upaya ini selain dapat mengurangi jumlah limbah yang tidak terpakai, bisa juga untuk mengurangi dampak dari pencemaran yang dapat terjadi akibat tidak terkelolanya limbah biomassa.

5. Referensi

- [1] Narega, S. O., Ysf, R. A., Aswan, A., Fatria, F., Erlinawati, E., & Hilwatullisan, H. (2022). Produksi Syngas Dari Proses Gasifikasi Biomassa Menggunakan Downdraft Gasifier Sebagai Gas Bakar Pada Motor Bakar Empat Tak. *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia*, 2(11), 469-474.
- [2] Rahmalia, W., Yulistira, F., Ningrum, J., Qurbaniah, M., dan Ismadi, M. J. U. T., Pontianak. (2015). Pemanfaatan potensi tandan kosong kelapa sawit (*Elais guineensis* Jacq) sebagai bahan dasar c-aktif untuk adsorpsi logam perak dalam larutan
- [3] Rasouli, K., Rasouli, J., Mohtaram, M. S., Sabbaghi, S., Kamyab, H., Moradi, H., dan Chelliapan, S. J. J. o. C. P. (2023). Biomass-derived activated carbon nanocomposites for cleaner production: A review on aspects of photocatalytic pollutant degradation. 138181.
- [4] Zhang, X., Mai, Y., Xian, X., Hu, L., Huang, J., Yuan, H., & Lin, X. (2022). Adsorption and Removal of Phosphate from Wastewater Using Lignin-Based Adsorbent Modified with Lanthanide: Characterization, Performance, and Mechanisms. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(49), 18069-18079.
- [5] Cemin, A., Ferrarini, F., Poletto, M., Bonetto, L. R., Bortoluz, J., Lemée, L., ... & Giovanela, M. (2021). Characterization and use of a lignin sample extracted from *Eucalyptus grandis* sawdust for the removal of methylene blue dye. *International Journal of Biological Macromolecules*, 170, 375-389.
- [6] Adeola, A. O., Cui, M., & Naccache, R. (2023). Rhodamine B sequestration using acid-precipitated and microwave-treated softwood lignin: Comparative isotherm, kinetics and thermodynamic studies. *Environmental Technology & Innovation*, 32, 103419.
- [7] Fadilla, P. J., Sururi, M. R., & Marganingrum, D. (2022). Utilization of Bottom Ash as an Adsorbent for Color and COD Removal for Textile Industry Waste. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 19(1), 78-88.
- [8] Krishnan, Y., Bong, C. P. C., Azman, N. F., Zakaria, Z., Abdullah, N., Ho, C. S., Lee, C. T., Hansen, S. B., dan Hara, H. J. J. o. C. P. (2017). Co-composting of palm empty fruit bunch and palm oil mill effluent: microbial diversity and potential mitigation of greenhouse gas emission. 146, 94-100.

- [9] Kundari, N. A., dan Wiyuniati, S. (2008). *Tinjauan kesetimbangan adsorpsi tembaga dalam limbah pencuci PCB dengan zeolit*. Paper presented at the Seminar Nasional IV SDM Teknologi Nuklir.
- [10] Shofa. (2012). *Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Baku Ampas Tebu dengan Aktivasi Kalium Hidroksida*. Universitas Indonesia, Depok.
- [11] Parinduri, L., & Parinduri, T. (2020). Konversi biomassa sebagai sumber energi terbarukan. *JET (Journal of Electrical Technology)*, 5(2), 88-92.
- [12] Kurniaty, I., Hasyim, U. H., & Yustiana, D. (2017). Proses delignifikasi menggunakan NaOH dan amonia (NH₃) pada tempurung kelapa. *Jurnal Integrasi Proses*, 6(4), 197-201.
- [13] Kanani, N., Saputro, A. B. A., Puspawati, I., dan Pratama, A. A. (2019). *Preparasi selulosa dari limbah tongkol jagung dengan bantuan gelombang iradiasi ultrasonik*. Paper presented at the Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar
- [14] Ajayi, S. M., Olusanya, S. O., Sodeinde, K. O., Didunyemi, A. E., Atunde, M. O., Fapojuwo, D. P., ... & Lawal, O. S. (2023). Hydrophobic modification of cellulose from oil palm empty fruit bunch: Characterization and application in Pickering emulsions stabilization. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 5, 100282.
- [15] Edmund, C. O., Christopher, M. S., & Pascal, D. K. (2014). Characterization of palm kernel shell for materials reinforcement and water treatment. *Journal of Chemical Engineering and Materials Science*, 5(1), 1-6.
- [16] Trisanti, P. N., HP, S. S., Nura'ini, E., & Sumarno, S. (2018). Ekstraksi selulosa dari serbuk gergaji kayu sengon melalui proses delignifikasi alkali ultrasonik. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 19(3), 113-119.
- [17] Alam, M. N. (2022). Pengaruh Suhu Pirolisis Terhadap Kadar Fixed Carbon Dari Karbon Aktif Kulit Batang Sagu. *Cokroaminoto Journal of Chemical Science*, 4(2), 19-22.
- [18] Pradana, M. A., Ardhyanta, H., & Farid, M. (2017). Pemisahan selulosa dari lignin serat tandan kosong kelapa sawit dengan proses alkalisasi untuk penguat bahan komposit penyerap suara. *Jurnal Teknik ITS*, 6(2), F413-F416.
- [19] Saptiningsih, E. (2015). Kandungan selulosa dan lignin berbagai sumber bahan organik setelah dekomposisi pada tanah Latosol. *Buletin Anatomi Dan Fisiologi Dh Sellula*, 23(2), 34-42.
- [20] Rani, I. T., Hidayat, W., Febryano, I. G., Iryani, D. A., Haryanto, A., dan Hasanudin, U. J. J. T. P. L. V. (2020). Pengaruh Torefaksi Terhadap Sifat Kimia Pelet Tandan Kosong Kelapa Sawit. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung Vol 9.1*. 63-70.
- [21] Varelis, P., Melton, L., & Shahidi, F. (2018). *Encyclopedia of food chemistry*. Elsevier.
- [22] Pasue, I. I. J. J. o. A. S. (2019). Analisis lignin, selulosa dan hemi selulosa jerami jagung hasil di fermentasi trichoderma viride dengan masa inkubasi yang berbeda. *1(2)*, 62-67.
- [23] Kirk, R. E., dan D.F, O. (1992). *Encyclopaedia of Chemical Technology, 3rd edition*. New York: Encylopedia of Chemical Techology.
- [24] Kusniawati, E., Sari, D. K., & Putri, M. K. (2023). Pemanfaatan Sekam Padi Sebagai Karbon Aktif Untuk Menurunkan Kadar pH, Turbidity, TSS, dan TDS. *Journal of Innovation Research and Knowledge*, 2(10), 4183-4198.
- [25] Sujiono, E. H., Zabrian, D., Zharvan, V., & Humairah, N. A. (2022). Fabrication and characterization of coconut shell activated carbon using variation chemical activation for wastewater treatment application. *Results in Chemistry*, 4, 100291.
- [26] Jahan, N., Tahmid, M., Shoronika, A. Z., Fariha, A., Roy, H., Pervez, M. N., ... & Islam, M. S. (2022). A Comprehensive Review on the Sustainable Treatment of Textile Wastewater: Zero Liquid Discharge and Resource Recovery Perspectives. *Sustainability*, 14(22), 15398.