

Sintesis dan Karakterisasi Biochar Berbahan Limbah Yeast Mud

Yoga Ramadha*, Joanna Adorenee, Ketut Sumada

Program Studi Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: 22031010100@student.upnjatim.ac.id

Diterima: 29 Juni 2026

Disetujui: 09 Juli 2026

Abstract

Yeast mud is a solid byproduct of the bioethanol fermentation industry that is produced in large quantities, has a high moisture content, and is rich in organic matter, making it a potential feedstock for biochar. This study examines the effect of carbonization temperature and time on the yield and quality of biochar from bioethanol yeast mud. The yeast mud was dried at 100°C for 8 hours, then carbonized in a furnace at 200, 300, 400, 500, and 600°C with holding times of 1; 1.5; 2; 2.5; and 3 hours. The biochar was characterized by yield, ash content, chemical composition (SEM-EDX), and functional groups (FTIR). The yield decreased from 90.86% (200°C, 1 hour) to 20.46% (600°C, 3 hours), while ash content rose from 45.5% to 75.22% as temperature increased. Carbon content fell from 14.25% to 2.07%, whereas mineral elements (Ca, S, K, P) became more concentrated due to organic matter volatilization. FTIR confirmed the loss of O-H and aliphatic C-H groups and the formation of condensed aromatic structures, while SEM showed greater pore development. Biochar carbonized at 200°C showed the best quality, indicating its potential for soil amendment applications.

Keywords: *biochar, yeast mud, carbonization, pyrolysis temperature, soil amendment*

Abstrak

Yeast mud merupakan limbah padat hasil sampling industri fermentasi bioetanol yang dihasilkan dalam jumlah besar, memiliki kandungan air tinggi, dan kaya akan bahan organik sehingga berpotensi diolah menjadi biochar. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh suhu dan waktu karbonisasi terhadap yield dan kualitas biochar dari limbah yeast mud bioetanol. Yeast mud dikeringkan pada suhu 100°C selama 8 jam, kemudian dikarbonisasi di dalam furnace pada suhu 200, 300, 400, 500, dan 600°C dengan waktu tinggal 1; 1,5; 2; 2,5; dan 3 jam. Biochar yang dihasilkan dikarakterisasi melalui pengukuran yield, uji kadar abu, analisis komposisi kimia menggunakan SEM-EDX, serta analisis gugus fungsi menggunakan FTIR. Hasil penelitian menunjukkan bahwa yield biochar menurun dari 90,86% (200°C, 1 jam) menjadi 20,46% (600°C, 3 jam), sedangkan kadar abu meningkat dari 45,5% menjadi 75,22% seiring kenaikan suhu. Kandungan karbon menurun dari 14,25% menjadi 2,07%, sementara unsur mineral (Ca, S, K, P) semakin terkonsentrasi akibat volatilitas bahan organik. Analisis FTIR menunjukkan hilangnya gugus O-H dan C-H alifatik serta terbentuknya struktur karbon aromatik terkondensasi pada suhu tinggi, dan hasil SEM memperlihatkan peningkatan pembentukan pori. Biochar hasil karbonisasi pada suhu 200°C menunjukkan kualitas terbaik sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai pembenah tanah.

Kata Kunci: *biochar, yeast mud, karbonisasi, suhu pirolisis, pembenah tanah*

1. Pendahuluan

Bioetanol termasuk salah satu jenis bahan bakar terbarukan yang saat ini banyak dikembangkan sebagai pengganti bahan bakar fosil pada sektor transportasi [1]. Pada skala industri, bioetanol umumnya diproduksi melalui proses fermentasi gula menggunakan ragi *Saccharomyces cerevisiae* yang cukup efektif mengubah gula menjadi etanol [1] [2]. Akan tetapi, proses fermentasi dan distilasi tersebut juga menghasilkan limbah padat dalam jumlah yang tidak sedikit, salah satunya adalah yeast mud [4]. Limbah ini memiliki kadar air yang tinggi, yaitu sekitar 85–90%, dan masih mengandung banyak bahan organik. Apabila dibiarkan begitu saja tanpa penanganan yang tepat, limbah yeast mud berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan [3] [5] [8].

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk memanfaatkan limbah yeast mud adalah dengan mengolahnya menjadi biochar. Biochar sendiri merupakan padatan kaya karbon yang bersifat berpori dan dihasilkan dari proses karbonisasi biomassa pada suhu sekitar 200–700°C dengan jumlah oksigen yang terbatas [33]. Material ini cukup banyak digunakan, baik sebagai adsorben untuk menyerap zat pencemar maupun sebagai pembenah tanah di bidang pertanian. Kandungan bahan organik yang kaya karbon serta adanya unsur hara seperti nitrogen dan fosfor membuat limbah ragi cukup menjanjikan untuk dijadikan

bahan baku biochar [10]. Kualitas biochar yang dihasilkan sendiri dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya suhu dan lama pemanasan, jenis bahan baku, serta kadar air bahan [6].

Beberapa peneliti sebelumnya sudah membuktikan bahwa limbah organik berpotensi dijadikan bahan baku biochar. Manolikaki dan Diamadopoulos [5] melaporkan bahwa biochar dari limbah ragi yang dipirolisis pada suhu 300°C mampu meningkatkan kandungan total karbon organik, nitrogen total, dan fosfor di dalam tanah. Penelitian lain oleh Wang dan Wang [7] memanfaatkan kulit jeruk sebagai bahan baku biochar melalui pirolisis pada suhu 250, 400, dan 700°C selama 6 jam, dengan kadar karbon yang diperoleh berturut-turut sebesar 56,5%, 65,7%, dan 67%. Meski demikian, penelitian yang secara khusus membahas pemanfaatan yeast mud sebagai bahan baku biochar dengan memvariasikan suhu sekaligus waktu karbonisasi masih cukup jarang ditemukan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana pengaruh suhu dan waktu karbonisasi terhadap yield serta kualitas biochar yang dihasilkan dari limbah yeast mud industri bioetanol.

2. Metode Penelitian

Bahan dan Alat

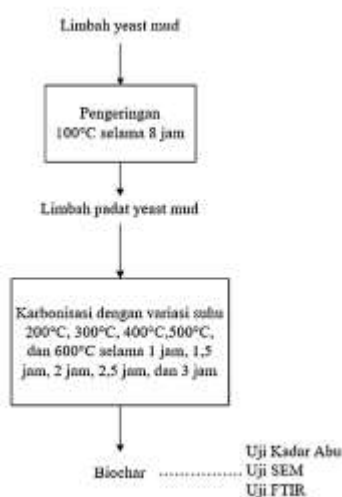
Bahan baku utama dalam penelitian ini adalah limbah yeast mud yang diperoleh dari PT. Energi Agro Nusantara (Enero), Mojokerto, Jawa Timur. Peralatan utama yang digunakan yaitu oven untuk proses pengeringan dan furnace untuk proses karbonisasi. Rangkaian alat penelitian secara umum ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1: Rangkaian alat penelitian

Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian secara ringkas digambarkan pada **Gambar 2**. Limbah yeast mud yang awalnya berbentuk slurry dikeringkan terlebih dahulu menggunakan oven pada suhu 100°C selama 8 jam untuk mengurangi kadar airnya. Setelah kering, sebanyak 100 gram padatan yeast mud dikarbonisasi di dalam furnace. Pada tahap ini suhu divariasikan pada 200, 300, 400, 500, dan 600°C, sedangkan waktu karbonisasinya divariasikan selama 1; 1,5; 2; 2,5; dan 3 jam. Biochar yang dihasilkan kemudian dianalisis sifat fisiknya berupa kadar abu, serta sifat kimianya yang meliputi komposisi unsur dan gugus fungsi.



Gambar 2: Diagram alir pembuatan biochar

Analisis

Yield biochar dihitung dengan membandingkan massa biochar yang dihasilkan terhadap massa bahan baku awal, seperti pada Persamaan (1). Untuk pengujian kadar abu, sebanyak 1 gram biochar ditimbang dan dimasukkan ke dalam cawan, lalu dipanaskan di dalam furnace pada suhu 650°C selama 3 jam. Setelah itu sampel didinginkan di dalam desikator dan ditimbang kembali. Komposisi kimia biochar yang meliputi unsur C, Al, Si, P, S, K, dan Ca ditentukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* yang dilengkapi *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (SEM-EDX). Sementara itu, gugus fungsi pada permukaan biochar dianalisis menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) dengan teknik DRIFTS, di mana sampel terlebih dahulu dibentuk menjadi pellet

3. Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Bahan Baku Yeast Mud

Hasil analisis komposisi bahan baku yeast mud disajikan pada **Tabel 1**. Dari data tersebut terlihat bahwa oksigen merupakan unsur dengan kandungan paling tinggi, yaitu 48,10%, kemudian diikuti oleh karbon sebesar 17,44%. Tingginya kandungan oksigen ini mengindikasikan masih banyaknya gugus fungsi polar seperti hidroksil dan karboksil, yang memang umum dijumpai pada biomassa yang belum mengalami dekomposisi. Adapun karbon pada bahan baku ini sebagian besar masih terikat dalam senyawa organik kompleks seperti protein, polisakarida dinding sel ragi, dan lipid yang sifatnya mudah menguap.

Tabel 1. Komposisi Kimia Bahan Baku Yeast Mud (%Wt)

C	O	Al	Si	P	S	K	Ca
17,44	48,10	1,49	3,86	0,21	10,36	2,03	16,52

Kalsium juga terdeteksi cukup tinggi, yakni 16,52%. Kandungan kalsium ini diduga berasal dari penggunaan kapur ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sebagai penetral pH selama proses fermentasi. Selain itu, belerang terdeteksi sebesar 10,36% yang kemungkinan besar berasal dari asam amino penyusun protein sel ragi. Unsur lain yang ditemukan dalam jumlah lebih kecil antara lain Si (3,86%), K (2,03%), Al (1,49%), dan P (0,21%). Keberadaan unsur K dan P ini cukup menarik karena dapat memberikan nilai tambah bagi biochar apabila digunakan sebagai pembenah tanah [11].

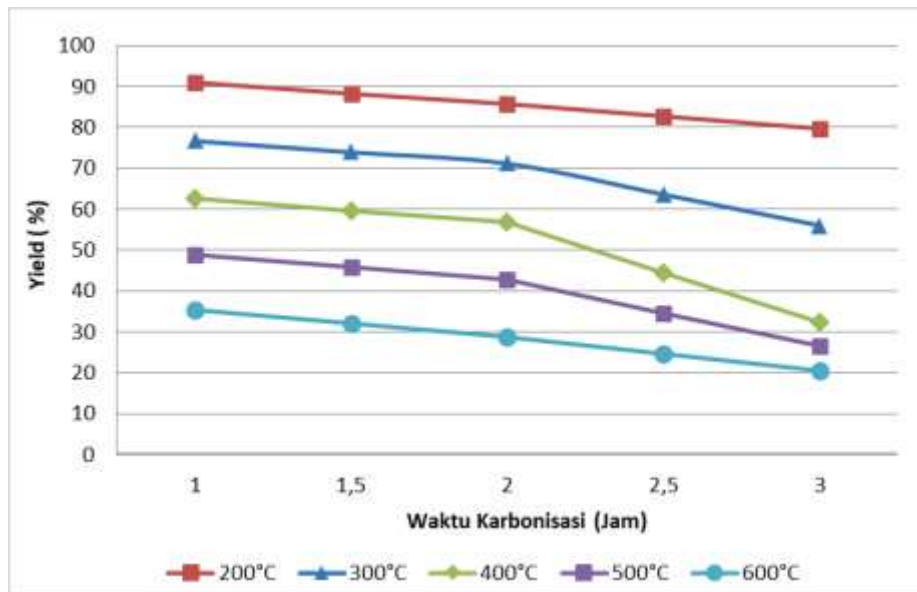
Pengaruh Suhu dan Waktu terhadap Yield Biochar

Pengaruh suhu dan waktu karbonisasi terhadap yield biochar dapat dilihat di **Tabel 2** dan **Gambar 3**. Secara umum, yield biochar cenderung menurun seiring bertambahnya suhu maupun waktu karbonisasi. Yield tertinggi diperoleh sebesar 90,86% pada suhu 200°C dengan waktu 1 jam, sedangkan yield terendah sebesar 20,46% terjadi pada suhu 600°C selama 3 jam.

Tabel 2. Yield Biochar pada Variasi Suhu dan Waktu Karbonisasi (%)

Suhu (°C)	1 jam	1,5 jam	2 jam	2,5 jam	3 jam
200	90,86	88,26	85,66	82,61	79,57
300	76,74	73,97	71,20	63,58	55,97
400	62,62	59,68	56,74	44,55	32,37
500	48,95	45,83	42,70	34,56	26,41
600	35,28	31,98	28,67	24,57	20,46

Penurunan yield ini terjadi karena adanya pelepasan senyawa volatil secara bertahap selama proses berlangsung, di mana bahan organik berubah menjadi gas dan abu seiring naiknya suhu. Penurunan yang lebih tajam mulai terlihat pada suhu di atas 400°C akibat banyaknya materi volatil yang hilang. Di samping faktor suhu, lamanya waktu karbonisasi juga ikut berpengaruh. Semakin lama waktu karbonisasi, semakin banyak komponen volatil yang terlepas sehingga massa biochar yang tersisa menjadi lebih sedikit. Hasil ini sejalan dengan penelitian Sakhiya dkk. [12] yang menyebutkan bahwa suhu tinggi dan waktu tinggal yang lama akan meningkatkan konversi biomassa menjadi produk gas dan cair, sehingga residu padatnya berkurang.



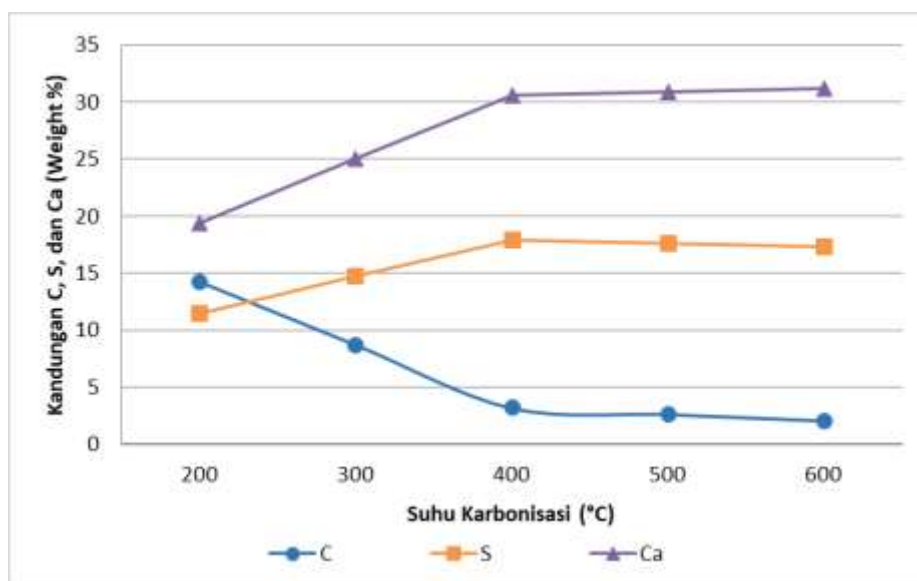
Gambar 3: Pengaruh suhu dan waktu karbonisasi terhadap yield biochar

Pengaruh Suhu terhadap Komposisi Kimia Biochar

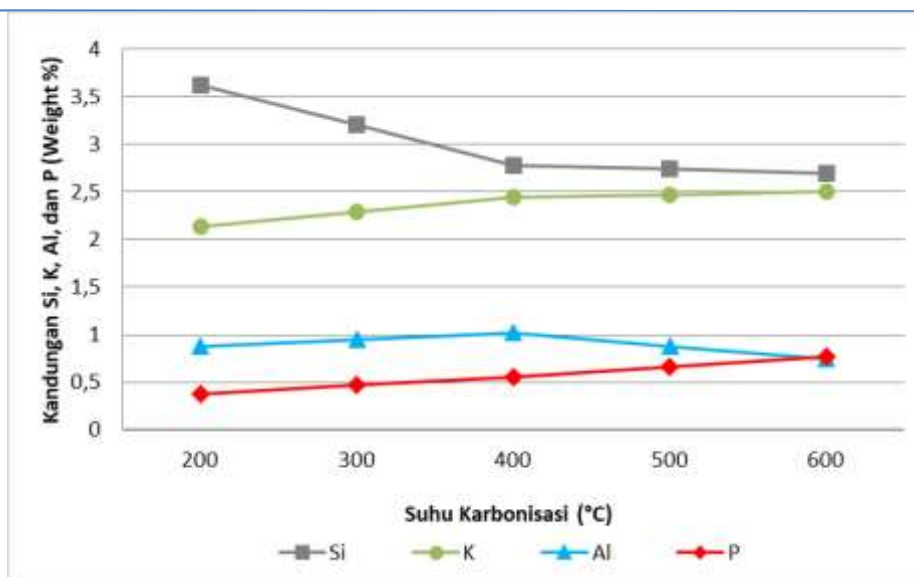
Komposisi kimia biochar pada berbagai suhu karbonisasi (waktu tetap 3 jam) ditampilkan pada Tabel 3, sedangkan kecenderungannya secara grafis dapat dilihat pada Gambar 4. Hasil SEM-EDX menunjukkan bahwa kandungan karbon menurun cukup drastis, dari 14,25% pada suhu 200°C menjadi hanya 2,07% pada suhu 600°C. Penurunan ini sesuai dengan prinsip karbonisasi biomassa, di mana senyawa organik akan terdekomposisi pada suhu tinggi [13]. Hal ini juga didukung oleh karakteristik yeast mud yang banyak mengandung senyawa organik mudah terurai seperti protein, lipid, dan polisakarida [14].

Tabel 3. Komposisi Kimia Biochar pada Variasi Suhu Karbonisasi (%Wt, waktu 3 jam)

Suhu (°C)	C	Al	Si	P	S	K	Ca
200	14,25	0,88	3,62	0,38	11,42	2,14	19,41
300	8,72	0,95	3,20	0,47	14,68	2,29	25,02
400	3,19	1,02	2,78	0,56	17,94	2,44	30,64
500	2,63	0,88	2,74	0,66	17,61	2,47	30,93
600	2,07	0,75	2,70	0,77	17,29	2,51	31,22



(a)



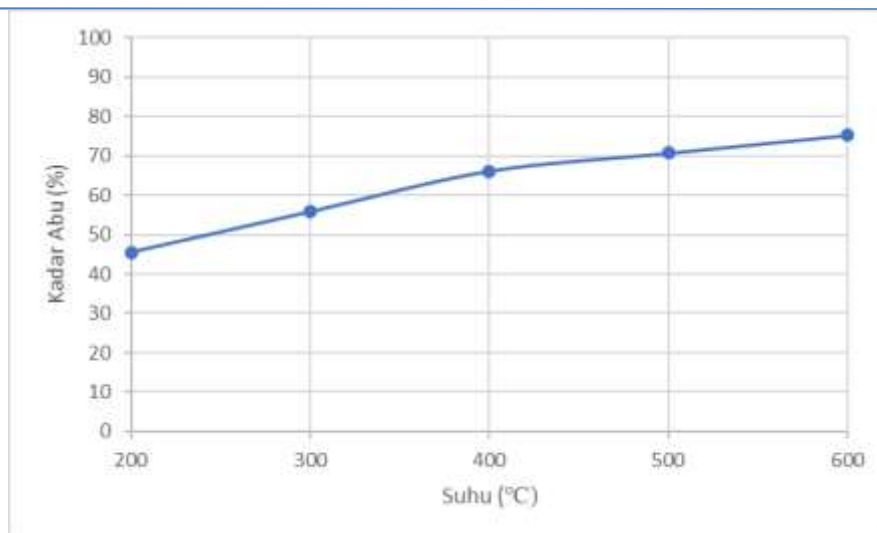
(b)

Gambar 4: Pengaruh suhu karbonisasi terhadap komposisi biochar. (a) unsur C, S, dan Ca
(b) unsur Si, K, Al, dan P

Sebaliknya, kandungan mineral seperti S, K, dan Ca justru meningkat seiring naiknya suhu. Kandungan Ca naik dari 19,41% menjadi 31,22%, S dari 11,42% menjadi 17,29%, dan K dari 2,14% menjadi 2,51%. Peningkatan ini sebenarnya bukan karena jumlah mineralnya bertambah, melainkan akibat efek konsentrasi. Ketika bahan organik banyak yang menguap, massa total biochar berkurang sehingga proporsi mineral yang tahan panas menjadi terlihat lebih besar [15] [16]. Tingginya kandungan S dan Ca ini juga berkaitan dengan asal bahan bakunya, yaitu limbah fermentasi yang memang mengandung sulfur dari metabolisme ragi dan kalsium dari kapur penetral. Kandungan fosfor juga ikut meningkat dari 0,38% menjadi 0,77%, yang kemungkinan disebabkan oleh perubahan fosfat organik menjadi fosfat anorganik yang lebih stabil pada suhu tinggi [17]. Sementara itu, unsur Al dan Si terlihat relatif stabil, yang menandakan keduanya berasal dari komponen anorganik yang tahan terhadap panas [18]. Berdasarkan data ini, biochar pada suhu 200°C dapat dikatakan memiliki komposisi paling baik karena kandungan karbonnya paling tinggi dan masih disertai mineral fungsional seperti Ca, K, dan P, sehingga berpotensi digunakan sebagai pembenah tanah [19].

Pengaruh Suhu terhadap Kadar Abu

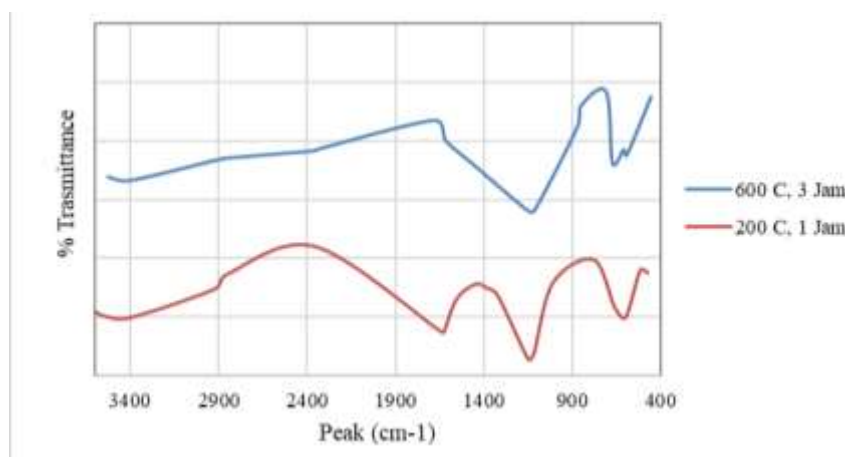
Hasil pengujian kadar abu pada waktu tetap 3 jam ditampilkan pada Gambar 5. Kadar abu meningkat dari 45,5% pada suhu 200°C menjadi 55,81% (300°C), 66,11% (400°C), 70,67% (500°C), dan akhirnya mencapai 75,22% pada suhu 600°C. Peningkatan kadar abu ini terjadi karena komponen organik terurai dan terlepas dalam bentuk senyawa volatil, sementara komponen anorganik yang lebih tahan panas tetap tertinggal di dalam biochar [20]. Kecenderungan yang sama juga ditemukan oleh Tu dkk. [21]. Selain itu, nilai kadar abu yang tinggi memang umum dijumpai pada biochar berbahan dasar lumpur (sludge) yang banyak mengandung mineral [22]. Perlu dicatat bahwa kadar abu pada penelitian ini jauh melampaui standar mutu biochar (15,2–16,8%) [34] [35], yang disebabkan oleh tingginya kandungan mineral pada bahan baku yeast mud.



Gambar 5. Pengaruh suhu karbonisasi terhadap kadar abu biochar

Analisis FTIR

Analisis FTIR dilakukan untuk membandingkan gugus fungsi pada biochar hasil karbonisasi 200°C (1 jam) dan 600°C (3 jam), sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 6**. Perbedaan paling mencolok terlihat pada intensitas gugus O-H dan C-H alifatik. Puncak pada 3300–3600 cm⁻¹ yang menunjukkan gugus hidroksil (O-H) [23] dan puncak pada 2850–2930 cm⁻¹ yang menunjukkan C-H alifatik [24] terlihat jauh lebih kuat pada sampel 200°C. Hal ini mengindikasikan bahwa komponen organik seperti lipid dan protein belum terdekomposisi secara sempurna pada suhu rendah.

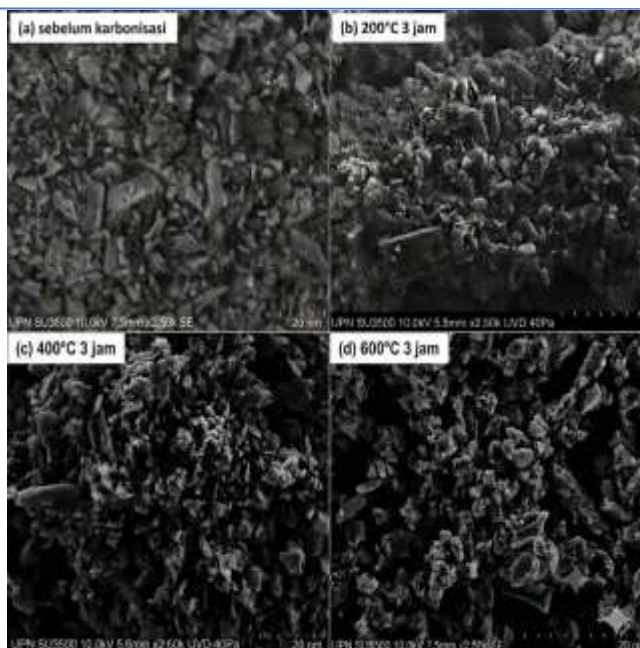


Gambar 6. Spektrum FTIR biochar pada kondisi karbonisasi yang berbeda

Pada sampel 200°C juga teramati puncak C=O karbonil dan C=C aromatik di rentang 1600–1700 cm⁻¹ [26], puncak C-N di sekitar 1322 cm⁻¹, serta C-O-C dan Si-O pada 1000–1200 cm⁻¹. Sebaliknya, pada biochar hasil karbonisasi 600°C, hampir seluruh gugus O-H dan C-H alifatik sudah hilang. Hal ini terjadi melalui reaksi dehidrasi dan aromatisasi yang menghasilkan struktur karbon aromatik terkondensasi yang lebih stabil [20], [25]. Dengan kata lain, biochar 200°C bersifat lebih reaktif dan cocok untuk menyuplai hara organik dalam jangka pendek, sedangkan biochar 600°C lebih sesuai untuk penyimpanan karbon dalam jangka panjang [27], [28].

Analisis Morfologi (SEM)

Hasil analisis morfologi permukaan biochar menggunakan SEM pada perbesaran 2500 kali ditampilkan pada **Gambar 7**. Sebelum proses karbonisasi (**Gambar 7a**), permukaan sampel terlihat masih padat dan tidak beraturan, dengan partikel-partikel kasar yang saling menggumpal dan pori yang masih sedikit. Setelah dikarbonisasi, morfologi permukaan berubah cukup jelas. Pada suhu yang lebih tinggi (**Gambar 7c dan 7d**), permukaan biochar tampak semakin kasar dan mulai terbentuk rongga-rongga kecil yang menyerupai pori.



Gambar 7. Morfologi permukaan biochar hasil uji SEM: (a) sebelum karbonisasi; (b) 200°C; (c) 400°C; (d) 600°C

Terbentuknya pori ini menunjukkan bahwa kenaikan suhu karbonisasi dapat mendorong perkembangan pori pada biochar. Suhu yang tinggi menyediakan energi yang cukup untuk mengembangkan mikroporositas dan mengubah struktur pori [29]. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Xu dkk. [30] dan Kyriakou dkk. [32], di mana kenaikan suhu karbonisasi membuat porositas dan luas permukaan biochar meningkat akibat terdegradasinya komponen yang tidak stabil serta terlepasnya produk gas. Pola morfologi seperti ini juga mirip dengan biochar berbahan dasar lumpur pengolahan air limbah yang dilaporkan oleh Fernandes dkk. [31].

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, suhu dan waktu karbonisasi terbukti berpengaruh terhadap yield dan kualitas biochar dari limbah yeast mud. Semakin tinggi suhu dan semakin lama waktu karbonisasi, yield yang dihasilkan justru semakin menurun, yaitu dari 90,86% (200°C, 1 jam) menjadi 20,46% (600°C, 3 jam). Biochar hasil karbonisasi pada suhu 200°C memiliki kandungan Ca 19,41%, C 14,25%, S 11,42%, Si 3,62%, dan K 2,14% dengan yield 79,57% (3 jam), serta memiliki kadar abu paling rendah, sehingga kondisi ini ditetapkan sebagai kondisi terbaik. Dilihat dari komposisi unsur dan gugus fungsi yang dimilikinya, biochar dari limbah yeast mud cukup berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai pembenah tanah.

5. Saran

Penulis menyarankan dilakukan analisis luas permukaan (BET) atau aktivasi biochar agar perkembangan pori dan luas permukaan biochar dapat diketahui. Selain itu, kadar abu biochar dari yeast mud tergolong tinggi, disarankan untuk memberikan perlakuan awal (pre-treatment) pada bahan baku guna mengurangi kandungan mineral sehingga proporsi karbon biochar dapat lebih ditingkatkan. Penyesuaian ini penting dilakukan agar biochar yang dihasilkan dapat memenuhi standard mutu dan memberikan manfaat yang lebih maksimal.

6. Daftar Pustaka

- [1] S. H. Mohd Azhar, R. Abdulla, S. A. Jambo, H. Marbawi, J. A. Gansau, A. A. Mohd Faik, and K. F. Rodrigues, "Yeasts in sustainable bioethanol production: A review," *Biochem. Biophys. Rep.*, vol. 10, pp. 52–61, 2017.
- [2] K. P. Eliodório et al., "Advances in yeast alcoholic fermentations for the production of bioethanol, beer and wine," in *Adv. Appl. Microbiol.*, vol. 109, pp. 61–119, 2019.
- [3] G. Dagaew et al., "Feed utilization efficiency and ruminal metabolites in beef cattle fed with cassava pulp fermented yeast waste replacement soybean meal," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, 2022.

- [4] T. Thanapornsri, R. Phongsri, L. Laopaiboon, and P. Laopaiboon, "Use of spent yeasts from bioethanol production plant as low-cost nitrogen sources for ethanol fermentation from sweet sorghum stem juice in low-cost bioreactors," *Carbon Resour. Convers.*, 2024.
- [5] I. Manolikaki and E. Diamadopoulos, "Agronomic potential of biochar prepared from brewery byproducts," *J. Environ. Manage.*, vol. 255, 2020.
- [6] F. Amalina, A. S. A. Razak, S. Krishnan, A. W. Zularisam, and M. Nasrullah, "A comprehensive assessment of the method for producing biochar, its characterization, stability, and potential applications in regenerative economic sustainability – A review," *Cleaner Mater.*, vol. 3, 2022.
- [7] J. Wang and S. Wang, "Preparation, modification and environmental application of biochar: A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 227, pp. 1002–1022, 2019.
- [8] D. San Martin et al., "Valorization of brewer's spent yeasts' hydrolysates as high-value bioactive molecules," *Sustainability*, vol. 13, no. 12, 2021.
- [9] D. N. Arifianto, R. P. Reswara, and R. Dewati, "Kinetika Reaksi Sintesis Glukosa dari Limbah Padat Yeast (Yeast Mud) Menggunakan Proses Hidrolisis Asam," *J. Serambi Eng.*, vol. 9, no. 4, pp. 10929–10936, 2024.
- [10] D. E. Leiva-Candia, S. Pinzi, M. D. Redel-Macías, A. Koutinas, C. Webb, and M. P. Dorado, "The potential for agro-industrial waste utilization using oleaginous yeast for the production of biodiesel," *Fuel*, vol. 123, pp. 33–42, 2014.
- [11] K. Y. Chan, L. Van Zwieten, I. Meszaros, A. Downie, and S. Joseph, "Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment," *Aust. J. Soil Res.*, vol. 45, p. 629, 2007.
- [12] A. K. Sakhiya, P. Baghel, S. Pathak, V. K. Vijay, and P. Kaushal, "Effect of process parameters on slow pyrolysis of rice straw: product yield and energy analysis," in *Proc. ICUE, IEEE*, 2020.
- [13] J. Lehmann and S. Joseph, *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*, 2nd ed. London: Routledge, 2015.
- [14] M. K. Hossain, V. Strezov, K. Y. Chan, A. Ziolkowski, and P. F. Nelson, "Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar," *J. Environ. Manage.*, vol. 92, no. 1, pp. 223–228, 2011.
- [15] J. H. Yuan, R. K. Xu, and H. Zhang, "The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 3, pp. 3488–3497, 2011.
- [16] J. A. Ippolito et al., "Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review," *Biochar*, vol. 2, no. 4, pp. 421–438, 2020.
- [17] G. Xu, L. L. Wei, J. N. Sun, H. B. Shao, and S. X. Chang, "What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: direct or indirect mechanism?," *Ecol. Eng.*, vol. 52, pp. 119–124, 2013.
- [18] A. Enders, K. Hanley, T. Whitman, S. Joseph, and J. Lehmann, "Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance," *Bioresour. Technol.*, vol. 114, pp. 644–653, 2012.
- [19] K. B. Cantrell, P. G. Hunt, M. Uchimiya, J. M. Novak, and K. S. Ro, "Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar," *Bioresour. Technol.*, vol. 107, pp. 419–428, 2012.
- [20] A. Tomczyk, Z. Sokołowska, and P. Boguta, "Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects," *Rev. Environ. Sci. Bio/Technol.*, vol. 19, no. 1, pp. 191–215, 2020.
- [21] P. Tu et al., "Influence of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of biochars obtained from herbaceous and woody plants," *Bioresour. Bioprocess.*, vol. 9, no. 1, p. 131, 2022.
- [22] Z. Wang, S. Liu, K. Liu, S. Ji, M. Wang, and X. Shu, "Effect of temperature on pyrolysis of sewage sludge: Biochar properties and environmental risks from heavy metals," *E3S Web Conf.*, vol. 237, p. 01040, 2021.
- [23] R. M. Silverstein, F. X. Webster, D. J. Kiemle, and D. L. Bryce, *Spectrometric Identification of Organic Compounds*, 8th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.
- [24] J. Coates, "Interpretation of infrared spectra, a practical approach," in *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, R. A. Meyers, Ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2000, pp. 10815–10837.
- [25] M. Keiluweit, P. S. Nico, M. G. Johnson, and M. Kleber, "Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar)," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 44, no. 4, pp. 1247–1253, 2010.

- [26] M. Uchimiya, L. H. Wartelle, K. T. Klasson, C. A. Fortier, and I. M. Lima, "Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 59, no. 6, pp. 2501–2510, 2011.
- [27] D. Woolf, J. E. Amonette, F. A. Street-Perrott, J. Lehmann, and S. Joseph, "Sustainable biochar to mitigate global climate change," *Nat. Commun.*, vol. 1, art. 56, 2010.
- [28] S. P. Sohi, E. Krull, E. Lopez-Capel, and R. Bol, "A review of biochar and its use and function in soil," in *Adv. Agron.*, vol. 105, pp. 47–82, 2010.
- [29] L. Leng et al., "An overview on engineering the surface area and porosity of biochar," *Sci. Total Environ.*, vol. 763, p. 144204, 2021.
- [30] W. Xu, B. Cai, X. Zhang, Y. Zhang, Y. Zhang, and H. Peng, "The biochar derived from pecan shells for the removal of Congo Red: The effects of temperature and heating rate," *Molecules*, vol. 29, no. 23, p. 5532, 2024.
- [31] J. O. Fernandes et al., "Disposable eco-friendly electrochemical device for trimethoprim antibiotic determination using biochar from sewage treatment plant sludge," *Biochar*, vol. 8, no. 1, p. 7, 2026.
- [32] M. Kyriakou et al., "Biowaste-based biochar: A new strategy for fermentative bioethanol overproduction via whole-cell immobilization," *Appl. Energy*, vol. 242, pp. 480–491, 2019.
- [33] M. Hussain et al., "Biochar for crop production: potential benefits and risks," *J. Soils Sediments*, vol. 17, no. 3, pp. 685–716, 2017.
- [34] A. Khan, S. Khan, M. Lei, M. Alam, M. A. Khan, and A. Khan, "Biochar characteristics, applications and importance in health risk reduction through metal immobilization," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 20, 2020.
- [35] D. Asyifa, A. Gani, and R. F. I. Rahmayani, "Karakteristik Biochar Hasil Pirolisis Ampas Tebu dan Aplikasinya pada Tanaman Seledri," *J. IPA Pembelajaran IPA*, vol. 3, no. 1, pp. 15–20, 2019