

Karakteristik Fisikokimia Biochar Ampas Kopi dengan Perbedaan Perlakuan Suhu dan Waktu Pirolisis

Physicochemical Properties of Coffee Grounds Biochar Under Different Pyrolysis Conditions

Mohamad Mukhlis Sutiyoso, Razhika Faradila*, Lorine Tantalu

¹Prodi Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Tribhuwana Tunggadewi, Jl. Tlogo Warna Malang, Jawa timur, Indonesia.

*email : razhika@unitri.ac.id

Abstrak

Beberapa kondisi menjadi perhatian atas permintaan energi yang terus meningkat sehingga sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan mengalami permintaan yang meningkat. Salah satu sumber energi terbarukan potensial adalah biomassa, termasuk ampas kopi yang melimpah namun belum dimanfaatkan optimal. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh variasi suhu dan waktu pirolisis terhadap karakteristik fisikokimia biochar ampas kopi. Proses pirolisis dilakukan pada suhu 500 °C, 600 °C, dan 700 °C dengan waktu tinggal 30, 90, dan 150 menit. Analisis biochar meliputi kadar air, kadar abu, zat terbang, karbon tetap, nilai kalor, pH, serta morfologi pori. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu dan waktu pirolisis secara signifikan memengaruhi sifat biochar. Suhu tinggi menghasilkan biochar dengan kadar air dan zat terbang rendah, pH alkalis, serta struktur pori yang lebih berkembang, meskipun diikuti dengan peningkatan kadar abu. Kondisi optimum diperoleh pada suhu 700 °C selama 150 menit dengan karakteristik unggul: kadar air 1,48%, kadar abu 23.50%, karbon tetap 51.26%, dan pH 11.30. Temuan ini mengonfirmasi potensi ampas kopi sebagai bahan baku biochar berkualitas tinggi yang mendukung strategi pengelolaan limbah berkelanjutan sekaligus menyediakan sumber energi alternatif ramah lingkungan.

Kata kunci: *biochar, ampas kopi, pirolisis, sifat fisikokimia, energi alternatif*

Abstract

The increasing demand for energy drives the need for environmentally friendly and sustainable alternative energy sources. One promising renewable energy resource is biomass, particularly coffee grounds, which are abundant yet underutilized. This study provides the first comprehensive evaluation of coffee waste biochar from Tirtoyudo, Indonesia, highlighting its potential as a renewable energy source and to evaluate the effect of pyrolysis conditions. Pyrolysis was conducted at temperatures of 500°C, 600°C, and 700°C with retention times of 30, 90, and 150 minutes. Biochar analyses included moisture content, ash content, volatile matter, fixed carbon, pH, and pore morphology. Results showed that both temperature and time significantly influenced biochar properties. Higher temperatures produced biochar with lower moisture and volatile matter, more alkaline pH, higher calorific values, and enhanced pore structures, although with increased ash content. Optimum conditions were achieved at 700°C for 150 minutes, producing biochar with superior characteristics: 1.48% moisture, 23.50% ash, fixed carbon 51.26%, and a pH of 11.30. These findings confirm the high potential of coffee waste as feedstock for high-quality biochar, supporting sustainable waste management strategies while providing environmentally friendly renewable energy.

Keywords: *biochar, coffee waste, pyrolysis, physicochemical properties, alternative energy*

PENDAHULUAN

Pemanfaatan limbah pertanian sebagai bahan baku energi terbarukan dan produk bernilai tambah telah menjadi salah satu isu strategis dalam mendukung pembangunan berkelanjutan. Kebutuhan energi yang terus meningkat, keterbatasan sumber energi fosil, serta dampak negatif terhadap lingkungan mendorong pencarian alternatif energi ramah lingkungan (Ipahrudin et al., 2022). Biochar tidak hanya berfungsi sebagai bahan bakar padat dengan nilai kalor yang kompetitif, tetapi juga sebagai amelioran tanah yang mampu memperbaiki sifat

fisik, kimia, dan biologi. Ampas kopi merupakan salah satu limbah agroindustri yang jumlahnya cukup melimpah, khususnya di daerah sentra produksi kopi seperti Kabupaten Malang, Jawa Timur (Faradila et al., 2024). Selama ini, pemanfaatan ampas kopi umumnya masih terbatas sebagai pakan ternak atau bahan kompos. Padahal, komposisi kimia ampas kopi yang kaya karbon, lignoselulosa, dan senyawa organik menunjukkan potensi besar untuk diolah menjadi biochar dengan karakteristik yang unggul (Pauziah et al., 2025). Konversi ampas kopi menjadi biochar diharapkan dapat mengurangi volume limbah, meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber

daya, serta memberikan nilai tambah ekonomis bagi masyarakat sekitar. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa karakteristik biochar sangat dipengaruhi oleh kondisi pirolisis, khususnya suhu dan waktu tinggal. (Tomczyk et al., 2020) Karakteristik biochar dipengaruhi oleh kondisi pirolisis; peningkatan suhu dan waktu tinggal biasanya menurunkan kadar air dan zat terbang, sekaligus meningkatkan kandungan karbon tetap, nilai kalor, serta pH alkalis, namun pengaruh tersebut pada limbah ampas kopi belum banyak diteliti. (Setyawan et al., 2024) menunjukkan bahwa biochar dari residu pertanian seperti sekam padi dan tongkol jagung umumnya memiliki pH alkalis yang dapat membantu menetralkan tanah masam. Namun saat ini belum ada penelitian yang membahas mengenai pengaruh suhu dan lama waktu pirolisis pada limbah ampas kopi.

Kebaruan dari penelitian ini menitik beratkan pada evaluasi kondisi pirolisis terhadap karakteristik biochar ampas kopi dari segi fisik dan kimianya. Penelitian ini mengobservasi terkait parameter proksimat (kadar air, kadar abu, dan karbon tetap), pH, serta morfologi pori melalui analisis mikroskopis dan pengukuran luas permukaan. Dengan pendekatan komprehensif ini, diharapkan dapat ditentukan kondisi pirolisis optimum yang menghasilkan biochar dengan kualitas tinggi dan multifungsi. Kontribusi penelitian ini tidak hanya memberikan pemahaman ilmiah baru mengenai sifat biochar berbasis ampas kopi, tetapi juga mendukung strategi pengelolaan limbah pertanian berkelanjutan, peningkatan efisiensi energi, serta pengembangan produk inovatif yang berdaya saing tinggi di tingkat nasional maupun global.

METODE

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Tepat Guna, Mikrobiologi Industri Fakultas Pertanian, Science Technopark Universitas Tribhuwana Tunggadewi dan Lab Mesin dan Daya Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya pada bulan Juli – Agustus 2025.

Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Carbolite furnace (run-off biochar)* atau alat pirolisis biochar yang digunakan untuk memberikan karakteristik pada bahan struktur dengan cara memanaskan suatu bahan struktur sampai menjangkau suhu yang dipersyaratkan dengan metode Pirolisis Lambat (*Slow Pyrolysis*) dan Timbangan digital berfungsi untuk mengukur berat ampas kopi sebelum masuk proses pirolisis .kemudian ph meter untuk mengukur pH

biochar ampas kopi, Boom Calori meter untuk mengukur nilai kalor biochar serta Pengontrol Tungku Tahanan (*Resistance Furnace Controller*) untuk menganalisa Zat terbang yang menguap selama proses pemanasan dengan suhu 800 °C. Bahan baku utama yaitu Ampas kopi yang digunakan pada penelitian ini berasal dari limbah ampas kopi UMKM Kopi Tirtoyudo kabupaten malang, Jawa Timur.

Pelaksanaan Penelitian

Langkah awal pada penelitian ini yaitu dengan menjemur ampas kopi selama 3 hari dengan kondisi cuaca cerah. Untuk memperoleh biochar ampas kopi yang optimal maka perlu memperhatikan kandungan air pada ampas kopi; banyaknya kandungan kadar air yang ada pada ampas kopi akan mempengaruhi proses pirolisis. Apabila ampas kopi yang akan digunakan pada penelitian ini mengandung kadar air yang tinggi, maka perlu dilakukan proses pengeringan dibawah paparan matahari hingga sesuai dengan standart SNI 06-1683-2021 sebesar $\leq 15\%$. Pelaksanaan penelitian disajikan pada bagan alur seperti pada Gambar 1. Penelitian ini dilakukan dengan variasi suhu dan waktu pirolisis. Variasi suhu pirolisis antara lain 500°, 600° dan 700°C dan variasi waktu 30, 90 dan 150 menit. Variasi perlakuan penelitian dapat disimak pada Tabel 1.

Persiapan Bahan Baku Biochar

Langkah yang harus dilakukan pertama kali dalam penelitian ini adalah dengan tahap persiapan bahan baku biochar Ampas kopi. Untuk limbah kopi diambil dari 1- 4 UMKM kopi tirtoyudo. di Kecamatan Tirtoyudo, Kabupaten Malang Selatan. Berat ampas kopi pada penelitian ini sebesar 10 kg.

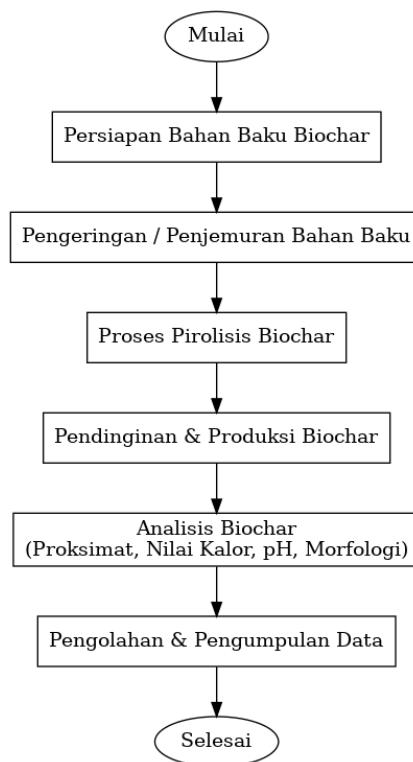
Tahapan Penngeringan Bahan Baku Biochar

Langkah selanjutnya dengan mengimplementasikan aplikasi penjemuran bahan baku biochar khususnya ampas kopi. Hal tersebut dilakukan untuk menekan kandungan menekan kadar air yang terlalu tinggi, sehingga tidak mempengaruhi proses *Running* biochar.

Pengeringan bahan baku dilakukan di Science Technopark dengan memaparkan bahan baku diatas alas selama di 1-3 Hari. Interval lama pengeringan bahan baku sesuai dengan intensitas cahaya matahari.

Tahap Penimbangan Bahan Baku Biochar

Sebelum dilakukan *running* atau pembakaran biochar, berat setiap bahan baku diukur dengan menggunakan timbangan digital yang dimana masing-masing komposisi sebesar 500 gr.



Gambar 1. Tahapan penelitian

Tabel 1. Variasi Perlakuan Penelitian

Kode	Perlakuan	
	Waktu (menit)	Suhu °C
W1T1	30	500
W2T1	90	500
W3T1	150	500
W1T2	30	600
W2T2	90	600
W3T2	150	600
W1T3	30	700
W2T3	90	700
W3T3	150	700

Tahap Produksi Biochar

Proses produksi biochar pada penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Energi Terbarukan Science Technopark (STP) dengan menggunakan reaktor pirolisis berkapasitas 1 kg per siklus. Reaktor tersebut beroperasi pada kondisi suhu tinggi dengan suplai oksigen yang sangat terbatas, sehingga memungkinkan terjadinya pirolisis secara optimal. Sebelum pelaksanaan proses, dilakukan pengukuran kadar air awal bahan baku untuk memastikan kesesuaian dengan standar. Limbah kopi yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kadar air berkisar 11–15%, sesuai dengan acuan SNI 06-1683-2021.

Gambar yang tertera dibawah ini merupakan tahapan awal proses produksi biochar Dimana sebelum

Running biochar memastikan ampas kopi sesuai dengan SNI 06-1683-2021 Sebesar 11–15%, dan penimbangan sampel ampas kopi sebelum proses pirolisis sebesar 500 gr setiap kali *Running* proses Pirolisis.

Proses pirolisis biochar ampas kopi biochar menggunakan metode pirolisis lambat (*Slow Pyrolysis*) dengan suhu 500°, 600° dan 700° C dan variasi waktu 30, 90 dan 150 menit. Selama proses pirolisis peneliti mengontrol suhu dan memastikan waktu pirolisis sesuai sehingga hasil pirolisis biochar ampas kopi sesuai dengan SNI 06-1683-2021.



Gambar 1. Proses Penjemuran Ampas Kopi dan Penimbangan sampel perlakuan



Gambar 2. Proses pirolisis biochar dan hasil pirolisis

Parameter yang diamati

Parameter utama yang diamati dalam penelitian ini meliputi kadar air, kadar abu, kadar zat terbang, karbon tetap, nilai kalor, pH, serta ukuran pori biochar. Seluruh parameter tersebut dipilih karena memiliki keterkaitan langsung dengan sifat fisikokimia biochar yang menentukan kualitasnya sebagai sumber energi terbarukan maupun bahan multifungsi lain.

Kadar Air (*Moisture Content*)

Kadar air dihitung untuk mengetahui tingkat kelembapan biochar yang berpengaruh pada kemudahan penyalaan dan kestabilan penyimpanan. Perhitungannya dilakukan dengan metode oven (ASTM D3173):

$$\text{Kadar Air (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

Dimana W1 adalah berat sampel sebelum dikeringkan (g) dan W2 adalah erat sampel setelah dikeringkan pada 105 °C (g) selama 12 jam.

Kadar Abu (Ash Content)

Kadar abu menunjukkan jumlah residu mineral anorganik setelah pembakaran. Analisis dilakukan sesuai ASTM D3174:

$$\text{Kadar Abu (\%)} = \frac{W_3}{W_1} \times 100$$

Dimana W1 adalah berat sampel awal (g) dan W3 adalah berat abu setelah dibakar pada 750 °C (g).

Karbon Tetap (Fixed Carbon)

Karbon tetap dihitung dengan metode by difference, yaitu sisa komponen setelah dikurangi kadar air, abu, dan zat terbang:

$$\text{Karbon Tetap (\%)} = 100 - (\text{Kadar air} + \text{Kadar Abu} + \text{Kadar Zat Terbang})$$

pH Biochar

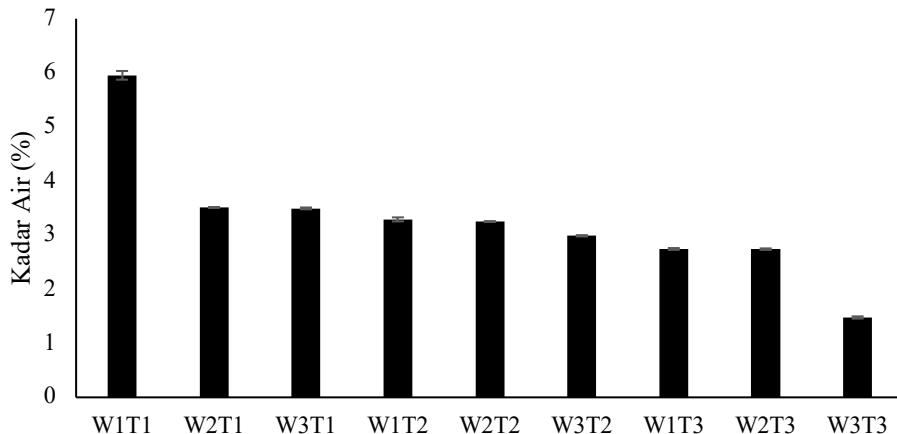
Nilai pH diukur dengan metode suspensi (1:20 b/v), yaitu 10 g biochar dilarutkan dalam 200 mL aquades, kemudian diukur menggunakan pH meter setelah

pengadukan. Tidak ada rumus khusus, nilai pH diperoleh langsung dari instrumen.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kadar Air Biochar

Hasil analisis kadar air biochar ampas kopi pada berbagai variasi suhu dan waktu pirolisis menunjukkan adanya penurunan kadar air yang konsisten seiring meningkatnya suhu dan lamanya waktu pirolisis. Pada gambar 2 dapat dilihat bahwa pada suhu 500°C dengan waktu 30 menit, kadar air biochar masih relatif tinggi yaitu 5,95%, namun mengalami penurunan drastis menjadi 3,51% pada 90 menit dan relatif stabil pada 150 menit 3,49%. Pada suhu 600 °C, kadar air lebih rendah, berkisar antara 3,29% hingga 2,99% dengan penurunan yang tidak terlalu signifikan antara 30 hingga 150 menit. Sementara itu, pada suhu tertinggi yaitu 700 °C, kadar air berada pada kisaran 2,74% pada 30 dan 90 menit, lalu turun tajam menjadi 1,48% pada 150 menit.



Gambar 3. Pernyataan suhu dan waktu pirolisis terhadap kadar air biochar

Gambar 3 memperlihatkan bahwa suhu pirolisis memiliki pengaruh lebih dominan dibanding waktu pirolisis terhadap kadar air biochar. Semakin tinggi suhu, semakin banyak molekul air bebas dan terikat lemah yang terlepas, sehingga kadar air biochar menurun (Zhang *et al.*, 2020). Biochar ampas kopi menunjukkan tren serupa, yaitu kadar air menurun secara signifikan pada suhu 600 °C ke atas.

Selain faktor suhu, lamanya waktu pirolisis juga memberikan kontribusi, terutama pada suhu tinggi. Pada suhu 700 °C, kadar air tetap stabil pada 30 hingga 90 menit, namun turun drastis pada 150 menit, yang menunjukkan bahwa waktu pirolisis berperan penting dalam memastikan keluarnya sisa kelembapan pada kondisi ekstrem. Kombinasi suhu tinggi dan waktu tahan yang lebih lama mampu menghasilkan biochar dengan kadar air di bawah 2%, yang dianggap optimal untuk penyimpanan jangka

panjang dan penggunaan sebagai bahan bakar padat (Setyawan *et al.*, 2024). Bertajuk pada SNI 06-1683-2021, kadar air paling rendah sebesar 1,48% yang dihasilkan dari kondisi pirolisis 700°C dengan waktu 150 menit.

Kadar Abu Biochar

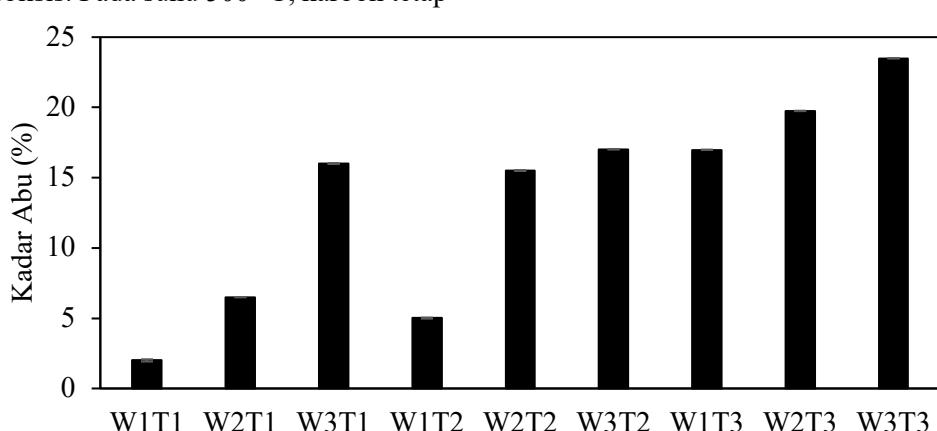
Pada gambar 3 dapat dilihat bahwa kadar abu biochar ampas kopi meningkat secara konsisten seiring dengan kenaikan suhu dan lamanya waktu pirolisis. Pada suhu 500 °C, kadar abu awalnya rendah yaitu 2,00% pada waktu 30 menit, namun meningkat menjadi 6,50% pada 90 menit dan mencapai 16,00% pada 150 menit. Pada suhu 600 °C, tren yang sama juga terlihat dengan nilai kadar abu 5,01% pada 30 menit, meningkat menjadi 15,51% pada 90 menit, dan 17,02% pada 150 menit. Sementara itu, pada suhu tertinggi yaitu 700 °C, kadar abu sudah relatif

tinggi sejak awal (16,98% pada 30 menit), kemudian terus meningkat hingga 23,50% pada 150 menit. Pada perlakuan 700 °C selama 150 menit menghasilkan kadar abu tertinggi sebesar 23,50%, sedangkan perlakuan 500°C selama 30 menit menghasilkan kadar abu terendah sebesar 2,00%. Hasil ini memperlihatkan bahwa suhu pirolisis merupakan faktor dominan dalam meningkatkan kadar abu, diikuti dengan lamanya waktu pirolisis yang semakin memperkuat pengaruh suhu. Kenaikan kadar abu terjadi karena semakin tinggi suhu dan semakin lama waktu pirolisis, semakin banyak senyawa organik volatil dan karbon yang terdegradasi, sehingga fraksi anorganik (abu) yang tersisa menjadi lebih besar secara proporsional (Das *et al.*, 2021). Kadar abu biochar meningkat pada suhu tinggi karena terjadi hilangnya fraksi organik, sedangkan mineral anorganik relatif stabil (Faradila *et al.*, 2024). Suhu pirolisis yang tinggi mempercepat proses degradasi komponen organik seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin, sehingga kandungan mineral anorganik menjadi lebih dominan. Bertajuk pada SNI 06-1683-202, Kadar abu paling mendekati SNI sebesar 6,51% pada kondisi pirolisis 500°C dengan waktu 90 menit.

Karbon Tetap (*Fixed Carbon*)

Gambar 5 menunjukkan bahwa kadar karbon tetap biochar ampas kopi bervariasi tergantung suhu dan lama waktu pirolisis. Pada suhu 500 °C, karbon tetap

relatif tinggi pada awalnya yaitu 56,01% (30 menit), namun menurun menjadi 49,98% pada 90 menit dan turun drastis menjadi 31,83% pada 150 menit. Pada suhu 600 °C, pola yang serupa juga terlihat. Karbon tetap masih tinggi pada 30 menit (54,98%), kemudian menurun menjadi 36,23% pada 90 menit dan 34,90% pada 150 menit. Sebaliknya, pada suhu 700 °C, kadar karbon tetap relatif stabil. Nilainya tercatat 54,28% pada 30 menit, sedikit naik menjadi 55,25% pada 90 menit, dan masih cukup tinggi pada 150 menit yaitu 51,26%. Hal ini menunjukkan bahwa pada suhu tinggi, sebagian besar senyawa volatil sudah hilang sejak awal, sehingga fraksi karbon tetap lebih dominan dan tidak banyak terdegradasi meskipun waktu pirolisis diperpanjang. Data ini memperlihatkan bahwa suhu pirolisis tinggi sebesar 700 °C lebih efektif dalam mempertahankan kadar karbon tetap biochar, sedangkan pada suhu rendah hingga menengah sebesar 500–600 °C, perpanjangan waktu pirolisis justru menyebabkan penurunan karbon tetap. Temuan ini sejalan dengan teori yang menyebutkan bahwa karbon tetap akan meningkat dengan naiknya suhu pirolisis hingga titik tertentu, kemudian dapat menurun kembali apabila waktu pirolisis terlalu lama karena sebagian karbon ikut terdegradasi menjadi gas (Tomczyk *et al.*, 2021). Bertajuk pada SNI 06-1683-202, karbon tetap yang mendekati nilai SNI sebesar 31,83 % dari kondisi pirolisis 500°C dengan waktu 150 menit.



Gambar 4. Pengaruh waktu dan suhu pirolisis terhadap kadar abu

Nilai pH

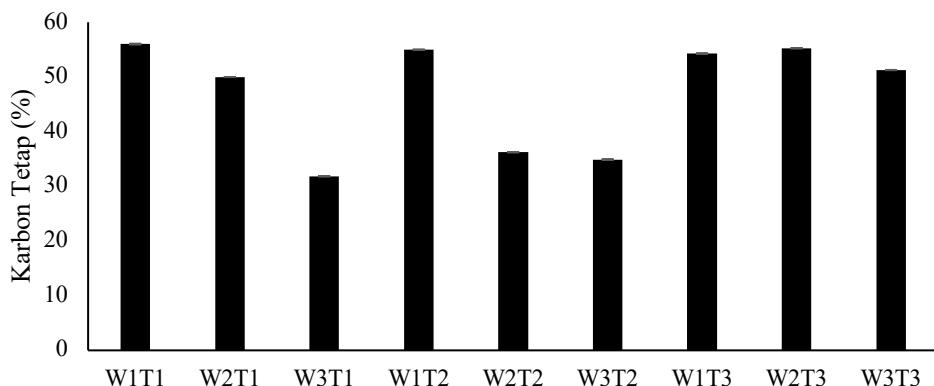
Gambar 6 menunjukkan bahwa nilai pH biochar ampas kopi meningkat seiring dengan kenaikan suhu dan lamanya waktu pirolisis. Pada suhu 500 °C, pH biochar tercatat 6,97 pada waktu 30 menit (masih bersifat netral), meningkat menjadi 7,63 pada 90 menit (cenderung alkalis), dan naik drastis hingga 10,19 pada 150 menit. Pada suhu 600 °C, pH biochar juga menunjukkan pola kenaikan. Nilai pH meningkat dari 7,03 pada 30 menit menjadi 10,04 pada 90 menit, kemudian sedikit menurun menjadi 9,30 pada 150 menit. Sementara itu, pada suhu tertinggi 700 °C, biochar cenderung memiliki pH

yang tinggi dan stabil. Nilai pH tercatat 10,12 pada 30 menit, meningkat menjadi 10,57 pada 90 menit, dan mencapai nilai tertinggi 11,30 pada 150 menit. Hal ini konsisten dengan teori bahwa semakin tinggi suhu pirolisis, semakin banyak senyawa organik asam yang terurai dan semakin dominan fraksi mineral alkalis, sehingga biochar menjadi bersifat sangat basa. Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa baik suhu maupun waktu pirolisis berpengaruh signifikan terhadap peningkatan pH biochar. Peningkatan pH berkaitan erat dengan dekomposisi senyawa organik asam (misalnya asam karboksilat) dan akumulasi abu mineral yang bersifat

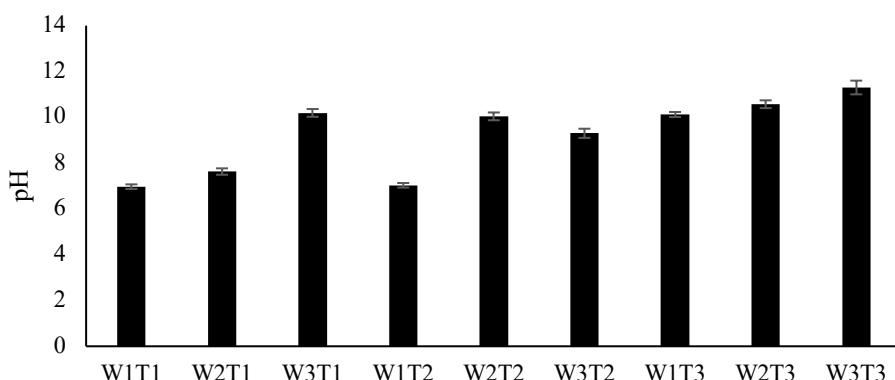
alkalis (Nur *et al.*, 2021). Biochar umumnya memiliki pH netral hingga sangat basa, tergantung kondisi pirolisis dan kandungan mineral dalam bahan baku. Bertajuk pada SNI 06-1683-202, pH yang mendekati nilai SNI sebesar 11,30% yang dihasilkan dari kondisi pirolisis 700 °C dengan waktu 150 menit.

Ukuran pori

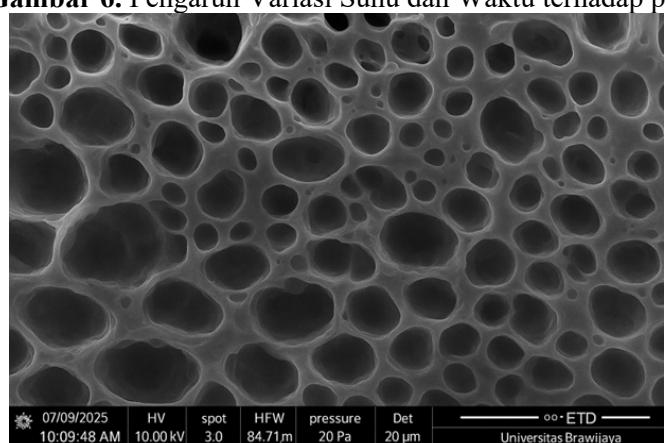
Pada gambar 7 menunjukkan hasil pengamatan SEM pada sampel biochar ampas kopi pirolisis pada suhu 700 °C menunjukkan pola morfologi khas berupa



Gambar 5. Pengaruh Variasi Suhu dan Waktu terhadap Karbon Tetap



Gambar 6. Pengaruh Variasi Suhu dan Waktu terhadap pH



Gambar 7. Hasil karakterisasi SEM

struktur mikropori dengan tekstur pecah-pecah merupakan fenomena yang lazim pada biochar hasil pirolisis suhu menengah. Jika durasi pirolisis diperpanjang hingga 150 menit, struktur pori cenderung berkembang lebih lanjut: rongga menjadi lebih dalam dengan variasi diameter yang lebih lebar dalam skala makropori 20 μm , yang dapat meningkatkan luas permukaan serta memperbaiki difusi oksigen dan aktor penting dalam meningkatkan efisiensi pembakaran ketika digunakan sebagai bahan bakar padat (Setyawan *et al.*, 2024).

Berlandaskan observasi terkait hasil karakterisasi biochar dengan metode SEM dapat dilihat pada bagian tengah hingga tinggi menghasilkan biochar dengan struktur pori lebih berkembang dibandingkan pirolisis suhu rendah. Demikian pula, penelitian Zhang et al. (2020) menegaskan bahwa biochar dengan pori yang lebih dalam dan diameter bervariasi memiliki kemampuan pembakaran dan adsorpsi yang lebih baik. Selain itu, struktur pori yang terbentuk tidak hanya bermanfaat untuk aplikasi energi, tetapi juga memberikan potensi dalam bidang pertanian sebagai pemberi nutrisi tanah, karena biochar dengan porositas tinggi dapat meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) dan retensi air tanah. Bertajuk pada SNI 06-1683-202, ukuran pori yang mendekati nilai SNI sebesar 50 nanometer pada kondisi pirolisis 700°C dengan waktu 150 menit.

KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa suhu dan waktu pirolisis berpengaruh signifikan terhadap karakteristik fisikokimia biochar ampas kopi. Peningkatan suhu dan durasi pirolisis menurunkan kadar air, meningkatkan kadar abu, Serta pH, Karbon tetap relatif stabil pada suhu tinggi, sementara morfologi pori semakin berkembang seiring kondisi pirolisis ekstrem. Kondisi optimum diperoleh pada perlakuan 700 °C selama 150 menit yang menghasilkan biochar dengan nilai kalor tinggi, kadar air rendah, karbon tetap memadai, pH basa, dan porositas baik. Dengan demikian, ampas kopi memiliki potensi besar untuk diolah menjadi biochar berkualitas tinggi, baik sebagai sumber energi alternatif maupun bahan multifungsi untuk aplikasi lingkungan dan pertanian.

SARAN

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi variasi parameter pirolisis lainnya, seperti laju pemanasan, jenis atmosfer pirolisis, serta ukuran partikel bahan baku, guna memperoleh data yang lebih komprehensif mengenai kualitas biochar ampas kopi. Selain itu, analisis lanjutan dengan metode yang lebih spesifik perlu dilakukan untuk mengungkap luas permukaan spesifik, gugus fungsi, serta struktur kristal biochar. Uji performa energi dan emisi gas buang juga sangat penting untuk memastikan kelayakan biochar sebagai bahan bakar padat ramah lingkungan. Penelitian dalam skala lapangan, misalnya pemanfaatan biochar dalam bentuk briket atau campuran bahan bakar, dapat memberikan gambaran nyata mengenai aplikasinya. Akhirnya, kajian keekonomian dan keberlanjutan perlu ditambahkan agar pemanfaatan biochar ampas kopi tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga secara sosial, ekonomi, dan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

Das, S. K., Ghosh, G. K., Avasthe, R. K., & Sinha, K. (2021). Compositional heterogeneity of different biochar: Effect of pyrolysis temperature and feedstocks. *Journal of Environmental Management*, 278(P2), 111501. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111501>

Faradila, R., Harsono, S. S., & Larasati, Y. (2024). Karakteristik Biochar Limbah Bubuk Kopi Produksi UMKM Kopi Tirtoyudo, Malang Selatan. *Jurnal Ilmiah Teknologi Pertanian AGROTECHNO*, 9.

Ipahrudin, G., Ifadillah, S., & Mutmainah, I. (2022). Analisis Permintaan dan Penyediaan Energi Fosil dari berbagai Subsektor di Indonesia pada Masa Mendatang. *Journal of Engineering Environmental Energy and Science*, 1(1), 29–38. <http://ejurnal.ubharajaya.ac.id/index.php/JOE3S29>

Nur, A. A., Al Amrie, M., & Yusran. (2024). Peranan Ampas Kopi Sebagai Energi Alternatif. *Jurnal Ekonomi Pembangunan Dan Manajemen*, 3.

Pauziah, A., Yuliana, D., Ardiansyah, R., & Bekti, R. J. (2025). Pemanfaatan Limbah Ampas Kopi dan Teh Sebagai Pupuk Organik Ramah Lingkungan. *Abdidaya: Jurnal Abdi Cindeka Nusantara*, 6.

Setyawan, H. Y., Sunyoto, N. M. S., Sugiarto, Y., Dewanti, B. S. D., Widayanti, V. T., Hakim, L., Kurniawan, S., Nugroho, G. A., Ulandari, D., Choirun, A., Hanindipto, F. A., Sundari, S. A., Pamungkas, I. A., Pratama, A. P. A., & Wan, Z. (2024). Characterisation of biochar from various carbon sources. *BIO Web of Conferences*, 90. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249006003>

Sugiarto, Y., Sunyoto, N. M. S., Zhu, M., Jones, I., & Zhang, D. (2021). Effect of biochar addition on microbial community and methane production during anaerobic digestion of food wastes: The role of minerals in biochar. *Bioresource Technology*, 323(December 2020), 124585. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124585>

Sugiarto, Y., Wijayanti, U. R., Sunyoto, N. M. S., Maharsih, I. K., Andriani, R. D., & Anugroho, F. (2023). The Effect of Biochar Particle Size on Biogas Production Using Bread Waste Substrate. *Jurnal Keteknikan Pertanian Tropis Dan Biosistem*, 11(1), 105–115. <https://doi.org/10.21776/ub.jkptb.2023.011.01.10>

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects.

Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 19(1), 191–215.
<https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>
Zhang, X., Zhang, P., Yuan, X., Li, Y., & Han, L. (2020). Effect of pyrolysis temperature and

correlation analysis on the yield and physicochemical properties of crop residue biochar. *Bioresource Technology*, 296(September 2019), 122318.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122318>