

EFEK HOLDING TIME PROSES AKTIVASI TERHADAP STRUKTUR PORI KARBON AKTIF DARI AMPAS KOPI SEDUH

D N K Putra Negara

Dosen
Universitas Udayana
Program Studi Teknik Mesin
devputranegara@unud.ac.id

I Made Widiyarta

Dosen
Universitas Udayana
Program Studi Teknik Mesin
m.widiyarta@unud.ac.id

Tjokorda G Tirta Nindhia

Dosen
Universitas Udayana
Program Studi Teknik Mesin
nindhia@yahoo.com

Anton S Ferdinand

Mahasiswa
Universitas Udayana
Program Studi Teknik Mesin
a.sferdinand1806@gmail.com

Activated carbon has a high adsorption capacity due to its high porosity. The pore structure of activated carbon is largely affected by the chemical composition of the raw material and the parameters of the manufacturing process. This article aims to determine the pore structure of activated carbon from brewed coffee. The manufacture of activated carbon is carried out in one step of carbonization and activation in the same reactor and furnace. The sample was carbonized by heating to a temperature of 650 °C, then immediately activated at that temperature by flowing nitrogen with 30, 60, and 90 minutes variations. The resulting activated carbons are marked as K-A30, K-A60, and K-A90 for activation holding times of 30, 60, and 90 minutes, respectively. Then the activated carbon was characterized to determine their proximate composition, morphology, and surface pore structure. The results showed that activated carbon under an activation holding time of 60 minutes (K-A60) had the highest fixed carbon content of 71.67%. Meanwhile, generally, the activated carbon K-A30 has the best pore structure due to it having the highest pore surface area (121.765 m²/g), pore-volume (0.058 cc/g), and nitrogen adsorption capacity (37.692 cc/g) with an average pore diameter of 1.915 nm. This research is urgent because it can convert brewed coffee grounds into activated carbon with such pore structure characteristics and potentially applied to various adsorption applications.

Keywords: Activated Carbon, Coffee, Pore Structure, Activation, Holding Time.

1. PENDAHULUAN

Karbon aktif adalah adsorben yang diperoleh dari material berkarbon, memiliki struktur kristalografi tidak teratur, dan dibentuk oleh mikrokristal yang terdistribusi secara acak [1]. Karbon aktif memiliki porositas yang tinggi karena karakteristik struktur porinya yang unik dengan luas permukaan pori dan volume pori yang tinggi. Porositas yang tinggi dari karbon aktif disebabkan karena memiliki pori-pori yang kompleks, mulai dari ukuran mikropori dengan diameter pori kurang dari 2 nm, mesopori dengan diameter pori 2-50 nm dan makropori yang memiliki ukuran pori lebih dari 50 nm (berdasarkan IUPAC; *International Union of Pure and Applied Chemistry*). Struktur pori seperti itu menyebabkan karbon aktif memiliki kemampuan adsorpsi yang tinggi sehingga banyak diaplikasikan dalam berbagai aplikasi praktis. Aplikasinya sangat luas meliputi penyimpanan gas metana [2-4], pemurnian biogas [5,6], menghilangkan zat pewarna [7], penyerapan CO₂ [2, 8-10], penghilangan polutan knalpot dari mesin diesel [11], sebagai bahan filter pada *catalytic converter* [12], sebagai bahan super kapasitor [13], dan masih banyak aplikasi lainnya.

Karakteristik struktur pori sangat ditentukan oleh sifat dasar bahan baku yaitu komposisi kimia bahan baku serta parameter proses pembuatannya. Bahan baku yang baik adalah memiliki kandungan karbon yang tinggi dan kadar abu yang rendah. Karakteristik bahan baku mempengaruhi karakteristik karbon aktif yang dihasilkan. Hal ini disebabkan karena porositas yang dihasilkan dapat bervariasi baik dalam bentuk maupun dimensinya [1], tergantung dari kandungan bahan baku dan pemilihan parameter proses dalam produksinya. Karakteristik karbon aktif terutama luas permukaan, diameter pori, volume pori dan distribusi ukuran pori sangat menentukan kapasitas penyerapan terhadap substansi yang akan diserap. Hal ini karena substansi yang

akan diserap/*adsorptive* seperti nitrogen, metana, karbon dioksida, karbon monoksida dan yang lainnya, memiliki dimensi molekul yang spesifik sehingga diperlukan pula karbon aktif dengan ukuran pori yang minimal sama atau lebih besar dari dimensi molekul substansi tersebut.

Karbon aktif umumnya diproduksi melalui proses dehidrasi, karbonisasi, dan aktivasi. Dehidrasi bertujuan untuk mengurangi kadar air bahan baku sebelum dikarbonisasi. Proses karbonisasi merupakan proses pirolisis dari bahan baku (*precursor*) dalam lingkungan tanpa atau minim oksigen (*inert atmosphere*) pada suhu sedang-tinggi (300-800 °C) [1]. Karbonisasi dimaksudkan untuk meminimalkan kadar *volatile* dan mengubah bahan baku menjadi arang dengan kandungan fix karbon yang tinggi. Arang yang dihasilkan memiliki daya serap yang masih rendah karena struktur porinya belum sempurna diakibatkan karena sebagian produk karbonisasi yang dihasilkan (sebagian besar berupa tar) terpolimerisasi ulang dan mengembun menutupi pori-pori [1]. Proses aktivasi diperlukan untuk menghilangkan endapan tar ini sehingga memperbesar porositas yang ada. Aktivasi dapat berupa aktivasi fisika dan aktivasi kimia. Aktivasi fisika biasanya dilakukan pada suhu yang lebih tinggi (700-1000 °C) [1] dengan menggunakan agen pengaktif seperti N₂, CO₂, *steam* dan lain-lain. Sedangkan aktivasi kimia adalah proses aktivasi yang melibatkan zat pengaktif kimia seperti NaOH, H₃PO₄. Selama proses aktivasi terjadi penghilangan deposit tar, pembukaan pori-pori dasar yang terbentuk selama pirolisis, pengembangan pori-pori baru dan pelebaran pori yang sudah ada sehingga akan dihasilkan karbon aktif dengan tingkat porositas yang tinggi [1].

Penggunaan karbon aktif yang semakin luas berimbas pada semakin meningkatnya kebutuhan karbon aktif. Secara tradisional karbon aktif diproduksi dengan bahan baku dari kayu, batu bara, residu minyak bumi, lignit dan polimer [1]. Semua bahan tersebut sangat mahal dan tidak dapat diperbarui kecuali kayu sehingga diperlukan untuk mencari bahan baku alternatif yang terbarukan, mudah didapat dan biaya murah. Biomassa merupakan sumber bahan baku karbon aktif yang memiliki prospek yang menjanjikan. Beberapa bahan baku dari biomassa yang sudah diteliti dan dikembangkan menjadi karbon aktif diantaranya dari bambu [10,15,16], sekam padi [17,18], cangkang kelapa sawit [8], serbuk gergaji [6,19], kulit kopi [20], limbah kelapa sawit [21], serpihan kayu [22] limbah teh [23], dan jerami padi [24]. Namun masih minim referensi mengenai pembuatan karbon aktif dengan menggunakan ampas kopi seduh, padahal ampas kopi seduh memiliki kandungan karbon yang cukup tinggi dan berpotensi sebagai bahan baku karbon aktif. Di lain sisi, perkembangan pembentukan mikrostruktur karbon aktif sangat tergantung pada kondisi/parameter proses karbonisasi dan aktivasi seperti suhu akhir, laju pemanasan, waktu penahanan dan laju aliran massa gas [1]. Jika karbon aktif yang dibuat berbentuk serbuk pada umumnya proses karbonisasi dan aktivasi dilakukan terpisah. Urutan prosesnya adalah dehidrasi, karbonisasi, pembentukan serbuk dan aktivasi. Pada penelitian ini bahan baku yang digunakan adalah ampas kopi seduh (sudah berbentuk serbuk) sehingga prosesnya menjadi lebih singkat yaitu proses dehidrasi, karbonisasi dan langsung diaktivasi. Dengan demikian tujuan dari artikel ini adalah untuk mengetahui struktur pori karbon aktif berbahan ampas kopi seduh yang dikarbonisasi dan diaktivasi langsung dalam satu reaktor dengan variasi waktu penahanan (*holding time*) selama proses aktivasi. Karakteristik yang dicari adalah komposisi proksimat, diameter pori, luas permukaan pori, volume pori, daya serap terhadap nitrogen dan morfologi permukaan.

2. METODE DAN BAHAN

Metode yang digunakan dalam pengaktifan karbon aktif ini adalah *dry activation* atau aktivasi fisika. Proses aktivasi dilakukan dengan memanaskan sampel sampai suhu 650 °C diikuti dengan mengalirkan agen pengaktif gas nitrogen ke dalam reaktor yang berisi arang yang akan diaktifkan, tanpa melibatkan agen pengaktif berupa zat kimia yang dicampurkan dengan arang.

2.1 Preparasi Bahan Baku

Material yang digunakan sebagai bahan baku karbon aktif adalah ampas kopi seduh seperti ditunjukkan pada Gambar 1, sedangkan untuk agen pengaktif digunakan gas nitrogen. Ampas kopi seduh diperoleh di salah satu kedai kopi di Kota Denpasar. Jenis kopi yang digunakan merupakan kopi arabica (*Arabica coffee*). Perlakuan terhadap sampel diawali dengan proses dehidrasi di dalam dapur listrik (*tubular furnace*) pada suhu 105°C selama 2 jam, selanjutnya sampel didinginkan di dalam dapur listrik sampai mencapai suhu kamar. Tujuan perlakuan ini adalah untuk meminimalkan kadar uap air dari sampel sehingga siap untuk diproses lebih lanjut pada proses karbonisasi.



Gambar 1. Ampas kopi seduh

2.2. Karbonisasi dan Aktivasi

Alat yang digunakan untuk proses karbonisasi dan aktivasi adalah *tubular reactor*, *flowrate meter* dan *programmable tubular electric furnace*. *Tubular reactor* memiliki dimensi panjang 30 cm dan diameter 5 cm, terbuat dari *stainless steel* berfungsi sebagai tempat sampel selama proses karbonisasi dan aktivasi. Pada kedua ujung reaktor dihubungkan dengan pipa *stainless steel* berdimensi panjang 25 cm dan diameter 8 mm yang selama proses aktivasi dihubungkan dengan selang gas sebagai *inlet* dan *outlet*. Melalui selang gas ini nitrogen dialirkan ke dalam reaktor selanjutnya dikeluarkan bersama gas-gas hasil proses aktivasi. *Flowrate meter* berfungsi untuk mengatur laju aliran nitrogen ke dalam reaktor, sedangkan *programmable tubular electric furnace* (Gambar 2) merupakan dapur listrik berbentuk *tubular* dimana posisinya dapat diatur dalam arah horisontal maupun vertikal. Dapur listrik ini memiliki kapasitas pemanasan maksimum 1000 °C, laju pemanasan, suhu pemanasan dan lama pemanasan dapat diprogram sesuai dengan yang dibutuhkan.

Sampel hasil proses dehidrasi selanjutnya dimeshing dengan tujuan untuk mendapatkan ukuran butir yang seragam yaitu dengan ukuran 60 mesh. Sejumlah 50 gr sampel yang sudah dimeshing dimasukkan ke dalam reaktor, selanjutnya reaktor dimasukkan ke dalam *programmable tubular electric furnace* dan dipanaskan sampai suhu 650°C dengan laju pemanasan 10°C/menit. Selanjutnya pada suhu tersebut dilakukan aktivasi secara langsung dengan mengalirkan nitrogen ke dalam reaktor dengan laju 150 mL/menit. Penahanan selama proses aktivasi dilakukan dengan variasi 30, 60 dan 90 menit dan pendinginan dilakukan di dalam *furnace* sampai mencapai suhu kamar. Karbon aktif yang dihasilkan diberi simbol K-A30, K-A60 dan K-A90 masing-masing untuk lama penahanan aktivasi (*holding time*) 30, 60 dan 90 menit



Gambar 2. Programmable tubular electric furnace



Gambar 3. Sampel karbon aktif yang dihasilkan

2.2. Karakterisasi Karbon Aktif

Karbon aktif yang dihasilkan selanjutnya dikarakterisasi. Karakterisasi yang dilakukan meliputi uji *proximate*, uji SEM dan uji *adsorption isotherm*. Uji *proximate* dilakukan menggunakan alat *Thermogravimetric Analyser*, TGA 701, ASTM D7582 MVA BIOMASS dengan tujuan untuk mengetahui kandungan *fix carbon*, *ash*, *volatile* dan *moisture*. Uji SEM bertujuan untuk mengetahui morfologi permukaan karbon aktif dengan menggunakan alat SEM-JSM-651OLA. Uji *adsorption isotherm* dilakukan menggunakan alat *Quantachrome Nova Instruments Version 11.0* bertujuan untuk mengetahui luas permukaan pori (S_{BET}), volume pori (V_P), diameter pori (D_P) dan daya serap karbon aktif terhadap nitrogen.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Analisa Proksimat Karbon Aktif

Pada Table 1 ditunjukkan komposisi proksimat karbon aktif hasil uji TGA. SNI 06-3730-1995 tentang karbon aktif teknis mensyaratkan bahwa karbon aktif berbentuk serbuk dikatakan berkualitas baik jika memiliki kadar *moisture* tidak melebihi 15%, kadar *volatile* tidak melewati 25%, kadar *ash* maksimal 10% dan *fix karbon* minimal 65%. Berdasarkan Tabel 1, karbon aktif yang dibuat sudah memenuhi semua persyaratan dari SNI. Dilihat dari kandungan *fix karbonnya*, ketiga karbon aktif memiliki kandungan *fix karbon* yang tidak terlalu jauh berbeda. Kandungan *fix karbon* tertinggi didapat pada karbon aktif yang diaktivasi dengan lama penahanan selama 60 menit (K-A60).

Fix karbon yang cukup tinggi dari karbon aktif terutama terjadi akibat adanya dekomposisi termal yang mengubah bahan baku menjadi arang pada proses karbonisasi dan sebagai hasilnya adalah adanya pengurangan komponen non karbon serta meningkatnya kandungan *fix karbon* [1]. Lama aktivasi tidak memberikan efek yang signifikan terhadap kandungan *fix karbon* dari karbon aktif. Hal ini disebabkan karena hal utama yang mempengaruhi kandungan *fix karbon* dari karbon aktif adalah kandungan *fix karbon* dari bahan baku [25]. Bahan baku dengan *fix karbon* yang lebih tinggi akan menghasilkan karbon aktif dengan kandungan *fix karbon* yang lebih tinggi pula dibandingkan dengan *fix karbon* dari karbon aktif yang diproduksi dengan bahan baku yang memiliki kandungan *fix karbon* yang lebih rendah. Hal lain yang mempengaruhi *fix karbon* adalah kandungan selulosa dan lignin dari bahan baku, suhu aktivasi, dan cara aktivasi yang digunakan [25]. Namun, karena bahan baku yang digunakan sama, maka efek lama waktu aktivasi tidak signifikan terhadap kandungan *fix karbon* dari karbon aktif.

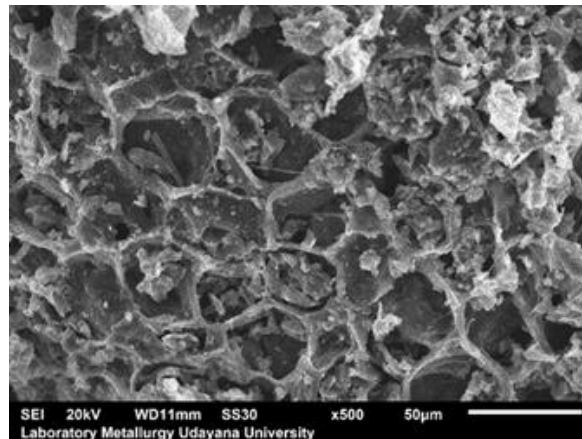
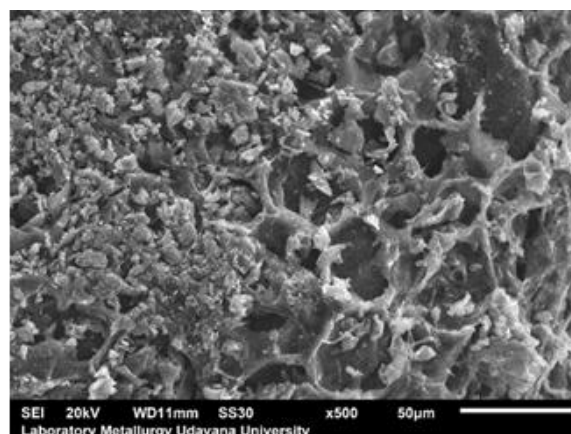
Sedangkan untuk kandungan *ashnya*, karbon aktif K-A60 memiliki kandungan *ash* terendah yaitu 4,67%. Terlihat bahwa lama penahanan aktivasi memberikan komposisi proksimat yang fluktuatif, dimana peningkatan lama penahanan aktivasi dari 30 ke 60 menit menyebabkan kandungan *moisture*, *volatile* dan *fix karbon* meningkat dan terjadi penurunan ketika waktu aktivasi ditingkatkan menjadi 90 menit. Kandungan *ash* menurun ketika lama aktivasi ditingkatkan dari 30 ke 60 menit, namun meningkat ketika lama penahanan aktivasi ditingkatkan lagi menjadi 90 menit. Kandungan *ash* sangat mempengaruhi kualitas karbon aktif. Kadar *ash* yang tinggi dapat menutupi pori-pori karbon aktif sehingga akan mengurangi kemampuan penyerapannya [25,26,27]

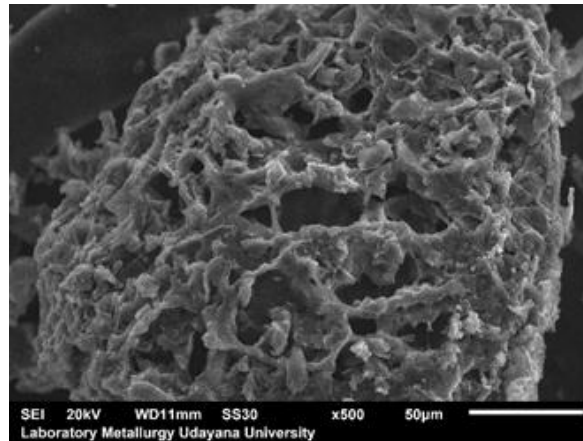
Tabel 1. Komposisi proximate karbon aktif

KARBON AKTIF	KOMPOSISI PROKSIMAT HASIL UJI TGA (%)			
	MOISTURE	VOLATILE	ASH	FIX CARBON
K-A30	9,80	10,19	8,35	71,67
K-A60	11,47	11,85	4,67	72,01
K-A90	9,42	11,06	7,76	71,76

3.2. Morfologi Permukaan Karbon Aktif

Hasil image SEM yang menunjukkan morfologi permukaan karbon aktif ditunjukkan pada Gambar 4 sampai Gambar 6. Terbentuknya struktur pori sangat jelas terlihat sebagai akibat perlakuan karbonisasi dan aktivasi. Pada proses karbonisasi dihasilkan porositas awal pada arang, sedangkan pada proses aktivasi terjadi pengembangan porositas lebih lanjut dan menghasilkan struktur teratur yang pada akhirnya membentuk karbon aktif dengan porositas padat yang tinggi [1], seperti ditunjukkan pada Gambar 4, 5 dan 6. Bentuk pori yang dihasilkan secara umum berbentuknya tidak teratur. Diameter pori rata-rata yang dihasilkan berukuran mikropori (kurang dari 2 nm) untuk K-A30, dan berukuran mesopori (antara 2 sampai 50 nm) untuk karbon aktif K-A60 dan K-A90 seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Sedangkan efek lama penahanan selama proses aktivasi terhadap bentuk pori dan diameter pori sulit dievaluasi karena pori-pori yang terbentuk tidak teratur dan memiliki rata-rata diameter pori yang fluktuatif.

**Gambar 4.** Morfologi permukaan karbon aktif K-A30**Gambar 5.** Morfologi permukaan karbon aktif K-A60



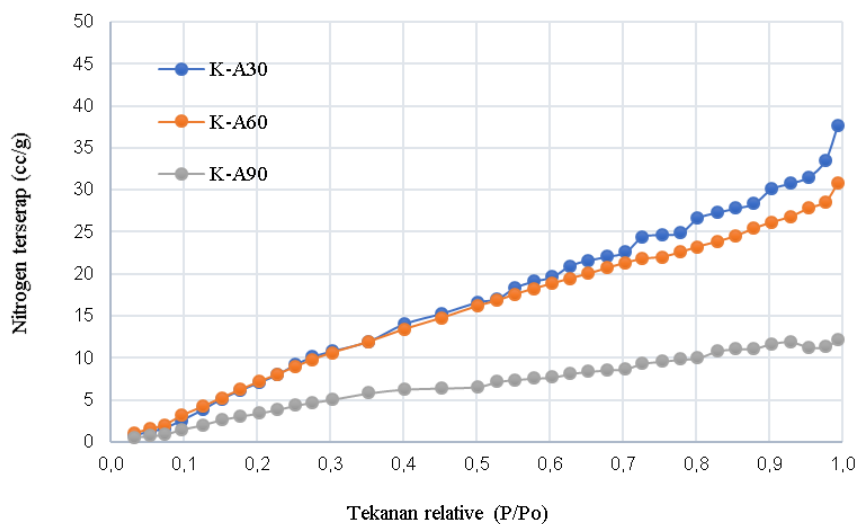
Gambar 6. Morfologi permukaan karbon aktif K-A90

Tabel 2. Struktur pori karbon aktif

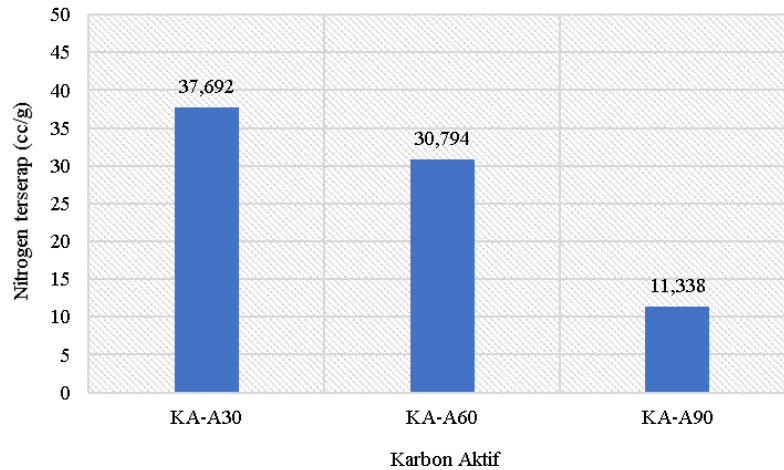
KARBON AKTIF	S _{BET}	V _P	D _P
	(m ² /g)	(cc/g)	(nm)
K-A30	121,765	0,058	1,915
K-A60	75,799	0,048	2,513
K-A90	34,819	0,018	2,014

3.3. Adsorption Isotherm

Uji *adsorption isotherm* menghasilkan kurva yang menyatakan hubungan antara jumlah nitrogen yang terserap pada variasi tekanan relatif tertentu, seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Secara umum dapat dilihat bahwa semakin tinggi tekanan relatif semakin banyak nitrogen yang terserap. Efek lama penahanan aktivasi terhadap kurva *adsorption isotherm* menunjukkan bahwa semakin lama penahanan aktivasi semakin rendah nitrogen yang terserap. K-A30 dan K-A60 memiliki daya serap nitrogen yang relatif sama sampai tekanan relative $P/P_0 = 0,5$ untuk selanjutnya sampai tekanan *relative* = 1, K-A30 memiliki daya serap yang lebih tinggi dibandingkan K-A60. Karbon aktif K-A90 memiliki daya serap nitrogen yang lebih rendah dibandingkan dengan K-A30 dan K-A60 untuk semua variasi tekanan relatif. Di akhir proses (tekanan *relative* = 1), Karbon aktif K-A30 memiliki daya serap nitrogen tertinggi (37,692 cc/g), disusul oleh K-A60 (30,794 cc/g) dan yang terendah adalah K-A90 (11,338 cc/g) seperti ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 7. Kurva *adsorption isotherm* karbon aktif



Gambar 8. Daya serap karbon aktif terhadap nitrogen

3.4. Struktur Pori Karbon Aktif

Pada Tabel 2 ditunjukkan struktur pori karbon aktif yang meliputi luas permukaan pori (S_{BET}), volume pori (V_P) dan diameter pori (D_P). Sedangkan Gambar 6 menunjukkan daya serap Lama aktivasi memberikan efek signifikan terhadap luas permukaan pori dan volume pori karbon aktif yang dihasilkan. Semakin lama aktivasi menyebabkan semakin menurunnya luas permukaan pori dan volume pori. Lama aktivasi 30 menit memberikan luas permukaan pori $121,765 \text{ m}^2/\text{g}$. Ketika lama aktivasi ditingkatkan menjadi 60 menit luas permukaan pori turun menjadi $75,799 \text{ m}^2/\text{g}$ dan kembali turun menjadi $34,819 \text{ m}^2/\text{g}$ ketika lama aktivasi ditingkatkan menjadi 90 menit. Kondisi yang serupa juga terjadi pada volume pori, dimana ketika lama aktivasi ditingkatkan dari 30 menjadi 60 menit volume pori turun dari $0,058 \text{ cc/g}$ menjadi $0,048 \text{ cc/g}$. Ketika lama aktivasi ditingkatkan menjadi 90 menit, volume pori kembali turun menjadi $0,018 \text{ cc/g}$. Pada kasus ini, dengan semakin tingginya luas permukaan pori semakin tinggi volume porinya dengan semakin tinggi pula nitrogen yang mampu diserap.

Lama aktivasi memberikan efek yang fluktuatif terhadap rata-rata diameter pori dari karbon aktif. Lama aktivasi 30 menit menghasilkan diameter pori rata-rata $1,915 \text{ nm}$. Ketika lama aktivasi ditingkatkan menjadi 60 menit diameter pori rata-rata naik menjadi $2,513 \text{ nm}$ dan kembali turun menjadi $2,014 \text{ nm}$ dengan ditingkatkannya lama aktivasi menjadi 90 menit. Menurut IUPAC-1985, pori diklasifikasikan menjadi mikropori (ukuran pori kurang dari 2 nm), mesopore (ukuran pori antara 2 sampai 50 nm) atau transitional pores dan makropori (ukuran pori lebih besar dari 50 nm) yang didasarkan pada lebar (w) yang menunjukkan jarak celah dinding pori atau radius dari pori yang berbentuk silindris. Berdasarkan definisi ini maka K-A30 sebagian besar porinya berada di daerah mikropori sedangkan K-A60 dan K-A90 sebagian besar pori-porinya berada pada rentang mesopore.

4. KESIMPULAN

Ampas kopi seduh sudah dibuat menjadi karbon aktif dengan aktivasi fisika. Variasi lama penahanan (*holding time*) selama proses aktivasi menunjukkan bahwa semakin lama waktu penahanan, semakin rendah luas permukaan pori dan volume pori. Semakin tinggi luas permukaan pori menghasilkan volume pori yang semakin tinggi dan daya serap terhadap nitrogen yang semakin tinggi pula. Kondisi optimal dicapai pada karbon aktif yang diaktivasi dengan penahanan selama 30 menit karena memberikan karakteristik terbaik yaitu menghasilkan luas permukaan pori, volume pori dan daya serap tertinggi terhadap nitrogen. Karbon aktif K-A30 sangat berpotensi digunakan untuk aplikasi penyerapan H_2S , CO_2 pada biogas dan beberapa aplikasi lain seperti penyerapan metil biru.

5. PERNYATAAN TERIMA KASIH

Terimakasih yang mendalam disampaikan kepada LPPM Unud yang telah mendanai penelitian ini pada tahun anggaran 2021 melalui Skim Penelitian Unggulan Program Studi (PUPS) melalui Fakultas Teknik Universitas Udayana. Terimakasih juga disampaikan untuk Program Studi Teknik Mesin serta Pusat Penelitian Material dan Teknologi Universitas Udayana yang banyak membantu dalam memfasilitasi terselenggaranya pelaksanaan penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. PALLARÉS, A. GONZÁLEZ-CENCERRADO, I. ARAUZO., “Production and characterization of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam,” *Biomass and Bioenergy*, v. 115, pp. 64-73, April 2018, doi: 10.1016/j.biombioe.2018.04.015.
- [2] S. KOONAPHAPDEELERT, J. MORAN, P. AGGARANGSI, A. BUNKHAM., “Energy for sustainable development low pressure biomethane gas adsorption by activated carbon,” *Energy Sustain. Dev.*, v. 43, pp. 196–202, 2018, doi: 10.1016/j.esd.2018.01.010.
- [3] B. N. HO, D. PINO-PEREZ, C. M. GHIMBEU, J. DIAZ, D. PEREDO-MANCILLA, C. HORT, D. BESSIERES., “Determination of methane, ethane and propane on activated carbons by experimental pressure swing adsorption method,” *Journal of Natural Gas Science Engineering*, v. 95, pp. 1-10, November 2021, doi: 10.1016/j.jngse.2021.104124.
- [4] Y. ZHENG, Q. LI, C. YUAN, Q. TAO, Y. ZHAO, G. ZHANG, J. LIU, G. QI., “Thermodynamic analysis of high-pressure methane adsorption on coal-based activated carbon,” *Fuel*, v. 230, pp. 172–184, April 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.05.056.
- [5] M. FAROOQ, M. N. ALMUSTAPHA, M. IMRAN, M. A. SAEED, J. M. ANDRESEN., “Bioresource technology in-situ regeneration of activated carbon with electric potential swing desorption (EPSD) for the H₂S removal from biogas,” *Bioresource Technology*, v. 249, pp. 125–131, July 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.09.198.
- [6] I. DURÁN, F. RUBIERA, AND C. PEVIDA., “Biogas purification by means of adsorption on pine sawdust-based activated carbon : Impact of water vapor,” *Chemical Engineering Journal*, v. 353, no, pp. 197–207, July 2018, doi: 10.1016/j.cej.2018.07.100.
- [7] F. BARJASTEH-ASKARI, M. DAVOUDI, M. DOLATABADI, S. AHMADZADEH., “Iron-modified activated carbon derived from agro-waste for enhanced dye removal from aqueous solutions,” *Heliyon*, v. 7, n. 6, pp. 1-8, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07191.
- [8] S.H. KHALIL, “Effects on surface area, intake capacity and regeneration of impregnated palm-shell activated carbon with monoethanolamide and 2-Amino-2-Methyl- 1-Propanol equipped for CO₂ adsorption,” *J. Earth Sci. Clim. Change*, v. 9, n. 7, pp. 1–10, 2018, doi: 10.4172/2157-7617.1000484.
- [9] J. HAN, L. ZHANG, B. ZHAO, L. QIN, Y. WANG, F. XING., “The N-doped activated carbon derived from sugarcane bagasse for CO₂ adsorption,” *Industrial Crops & Products*, v. 128, pp. 290–297, November 2018, doi: 10.1016/j.cej.2012.11.050.
- [10] D. A. KHUONGAB, H. N. NGUYEN, T. TSUBOTA., “Activated carbon produced from bamboo and solid residue by CO₂ activation utilized as CO₂ adsorbents,” *Biomass and Bioenergy*, v. 148, pp. 1-7, Maret 2021, doi: 10.1016/j.biombioe.2021.106039.
- [11] Q. PU, J. ZOU, J. WANG, S. LU, P. NING, L. HUANG, Q. WANG ., “Systematic study of dynamic CO₂ adsorption on activated carbons derived from different biomass,” *Journal of Alloys and Compounds*, v. 887, pp. 1-14, 2021.
- [12] Z. WANG, H. KUANG, J. ZHANG, L. CHU, Y. JI, “Experimental study on the removal of real exhaust pollutants from a diesel engine by activated carbon,” *Applied Sciences*, v. 9, pp. 1-11, July 2019, doi: 10.3390/app9153175.
- [13] A. HAMID, M. ABDULLAH, I.D. FEBRIANA, H.E. KURNIAWAN, H.D. WILUJENG, S.D. WIJAYA., “Pemanfaatan karbon aktif dari limbah kulit pisang untuk catalytic converter pada mesin diesel,” *Rekayasa Mesin*, v. 20, pp. 709–716, Nopember 2021, doi.org/10.21776/ub.jrm.2021.012.03.20
- [14] F. CHENG, X. YANG, S. ZHANG, W. LU., “Boosting the supercapacitor performances of activated carbon with carbon nanomaterials,” *J. Power Sources*, v. 450, December 2019, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.227678.
- [15] D. N. K. P. NEGARA, T. G. T. NINDHIA, M. SUCIPTA, I. W. SURATA, K. S. ASTRAWAN, I. P. H. WANGSA, “Simultaneous adsorption of motorcycle emissions through bamboo-activated carbon,” *Int. J. Glob. Energy Issues*, v. 43, n. 2–3, pp. 199–210, 2021, doi: 10.1504/ijgei.2021.115144.
- [16] D. N. K. P. NEGARA, T. G. T. NINDHIA, I. W. SURATA, F. HIDAJAT, M. SUCIPTA, “Nanopore structures, surface morphology, and adsorption capacity of tabah bamboo-activated carbons,” *Surfaces and Interfaces*, v. 16, pp. 22-26, 2019, doi: 10.1016/j.surfin.2019.04.002.
- [17] L. MING, X. RUI, “Preparation of a dual Structure activated carbon from rice husk char as an adsorbent for CO₂ capture,” *Fuel Processing Technology*, v. 186, pp. 35-39, April 2019, doi: 10.1016/j.fuproc.2018.12.015.
- [18] Y. FU, Y. SHEN, Z. ZHANG, X. GE, M. CHEN, “Activated bio-chars derived from rice husk via one-and two-step KOH-catalyzed pyrolysis for phenol adsorption,” *Science of The Total Environment*, v. 646, pp. 1567-1577, January 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.423.
- [19] V. H. NGUYEN, D.T. NGUYEN, T.T. NGUYEN, H.P.T. NGUYEN, H.B. KHUAT, T.H. NGUYEN, V.K. TRAN, S. WOONG CHANG, P. NGUYEN-TRI, D.D. NGUYEN, D.D. LA., “Activated carbon with ultrahigh surface area derived from sawdust biowaste for the removal of rhodamine B in water,”

- Environmental Technology Innovation*, v. 24, pp. 1-10, 2021, doi: 10.1016/j.eti.2021.101811.
- [20] S. SUN, Q. YU, M. LI, H. ZHAO, C. WU, “Preparation of coffee-shell activated carbon and its application for water vapor adsorption”, *Renew. Energy*, v. 142, pp. 11–19, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.04.097.
- [21] G. BENSIDHOM, A. BEN HASSEN-TRABELSI, K. ALPER, M. SGHAIROUN, K. ZAAFOURI, I. TRABELSI, “Pyrolysis of date palm waste in a fixed-bed reaktor: Characterization of pyrolytic products,” *Bioresour. Technol.*, vol. 247, pp. 363–369, 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2017.09.066.
- [22] SUHENDRAYATNA, M. APRIANTI, P. N. SHEILLA, I. MACHDAR, E. ELVITRIANA, “Optimization process of carbon mono oxide (CO) gas emission adsorption using activated carbon from rice husk,” *J. Phys. Conf. Ser.*, v. 1114, n. 1, pp. 1-9, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1114/1/012014.
- [23] J. ZHOU, A. LUO, Y. ZHAO, “Preparation and characterisation of activated carbon from waste tea by physical activation using steam,” *J. Air Waste Manag. Assoc.*, v. 68, n. 12, pp. 1269–1277, 2018, doi: 10.1080/10962247.2018.1460282.
- [24] H. NAM, W. CHOI, D. A. GENUINO, S. C. CAPAREDA, “Development of rice straw activated carbon and its utilizations,” *J. Environ. Chem. Eng.*, v. 6, n. 4, pp. 5221–5229, 2018, doi: 10.1016/j.jece.2018.07.045.
- [25] F. F. POLII, “Pengaruh suhu dan lama aktivasi terhadap mutu arang aktif dari kayu kelapa. (*Effects of activation temperature and duration time on the quality of the active charcoal of coconut wood*)”, *J. Ind. Has. Perkeb.*, vol. 12, no. 2, pp. 21-28, 2017, doi: 10.33104/jihp.v12i2.1672.
- [26] S. OKO, MUSTAFA, A. KURNIAWAN, E. S. B. PALULUN, “Pengaruh suhu dan konsentrasi aktivator hcl terhadap karakteristik karbon aktif dari ampas kopi,” *Metana : Media Komunikasi Rekayasa Proses dan Teknologi Tepat Guna*, v. 17, no. 1, pp. 15–21, 2021, <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/metana/article/download/37702/19519>.
- [27] S. HUDA, R. D. RATNANI, L. KURNIASARI, “Karakterisasi karbon aktif dari bambu ori (*bambusa arundinacea*) yang di aktivasi menggunakan asam klorida (HCl)”, *Inovasi Teknik Kimia*, v. 5, no. 1, pp. 22-27. <https://publikasiilmiah.unwahas.ac.id/index.php/inteka/article/view/3397/3155>