

PENGARUH RASIO MASSA KAYU MAHONI DAN AKTIVATOR KOH PADA KARAKTERISTIK KARBON BERPORI UNTUK APLIKASI PENANGKAP GAS KARBON DIOKSIDA

NAJWA OSYA AZHARI¹, FERRY FAIZAL², AYI BAHTIAR^{2,*}

¹ Program Studi Sarjana Fisika, FMIPA, Universitas Padjadjaran, Jl. Ir. Soekarno KM 21, Jatinangor 45363, Kabupaten Sumedang, Jawa Barat, INDONESIA

² Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Padjadjaran, Jl. Ir. Soekarno KM 21, Jatinangor 45363, Kabupaten Sumedang, Jawa Barat, INDONESIA

Abstrak. Peningkatan emisi gas karbon dioksida (CO₂) akibat aktivitas industri dan penggunaan bahan bakar fosil menjadi salah satu isu lingkungan yang mendesak untuk diatasi. Adsorpsi merupakan teknologi yang paling terkenal untuk menangkap gas CO₂ karena memiliki efisiensi yang tinggi, mudah dioperasikan, dan konsumsi energi yang rendah. Keberhasilan teknologi adsorpsi bergantung pada desain adsorben, salah satunya dengan menggunakan karbon aktif. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis karbon berpori berbasis biomassa yang berasal dari serbuk kayu mahoni dan menggunakan aktivator KOH serta menganalisis karakteristik pori dan kemampuan adsorpsinya terhadap gas CO₂. Proses karbonisasi dilakukan dengan metode pirolisis dengan 3 (tiga) variasi rasio raw material: KOH yaitu (1:1), (1:2), dan (1:3) yang masing-masing diberi nama PC-1, PC-2, dan PC-3. Yield yang dihasilkan mengalami penurunan dan kenaikan seiring dengan bertambahnya massa aktivator. Penurunan yield disebabkan karena banyak nya zat volatile yang hilang dalam proses pirolisis, sedangkan kenaikan menandakan bahwa aktivator telah mencapai titik jenuhnya. Analisis BET menunjukkan bahwa sampel PC-3 memiliki luas permukaan spesifik terbesar yaitu sebesar 276,445 m²/g dibandingkan dengan PC-1 dan PC-2. Dengan demikian, luas permukaan spesifik meningkat seiring dengan bertambahnya rasio massa KOH terhadap raw material. Distribusi ukuran pori dari ketiga sampel menunjukkan bahwa karbon aktif yang dihasilkan didominasi oleh mesopori. Hasil pengujian adsorpsi gas CO₂ menunjukkan bahwa karbon aktif mampu menangkap gas CO₂. Semakin tinggi luas permukaan spesifik, semakin besar volume gas CO₂ yang diadsorpsi.

Kata kunci: Adsorpsi, Karbon berpori, Kayu mahoni, KOH, CO₂

Abstract. The increase in carbon dioxide (CO₂) gas emissions due to industrial activities and the use of fossil fuels is one of the urgent environmental issues to be addressed. Adsorption is the most well-known technology for capturing CO₂ gas because it has high efficiency, is easy to operate, and has low energy consumption. The success of adsorption technology depends on the design of the adsorbent, one of which is using activated carbon. This study aims to synthesize biomass-based porous carbon derived from mahogany wood powder and using KOH activator and to analyze the pore characteristics and its adsorption capacity for CO₂ gas. The carbonization process was carried out using the pyrolysis method with 3 (three) variations of the raw material: KOH ratio, namely (1:1), (1:2), and (1:3) which were named PC-1, PC-2, and PC-3, respectively. The resulting yield decreased and increased along with the increasing mass of the activator. The decrease in yield was caused by the large number of volatile substances lost in the pyrolysis process, while the increase indicated that the activator had reached its saturation point. BET analysis showed that the PC-3 sample had the largest specific surface area of 276.445 m²/g compared to PC-1 and PC-2. Thus, the specific surface area increased with increasing mass ratio of KOH to raw material. The pore size distribution of the three samples showed that the activated carbon produced was dominated by mesopores. The results of the CO₂ gas adsorption test showed that activated carbon was able to capture CO₂ gas. The higher the specific surface area, the greater the volume of CO₂ gas adsorbed.

Keywords: Adsorption, Porous carbon, Mahogany wood, KOH, CO₂.

* Email: ayi.bahtiar@phys.unpad.ac.id

1. Pendahuluan

Pemanasan global telah menjadi isu penting yang memicu keprihatinan publik terkait masalah lingkungan dan perubahan iklim yang ekstrem. Karbon dioksida (CO_2) yang dihasilkan rumah kaca melalui respirasi tanaman, sebagai dianggap sebagai kontributor utama dalam permasalahan tersebut. Saat ini, emisi karbon (CO_2) yang berlebihan masih berasal dari penggunaan bahan bakar fosil [1]. Peningkatan emisi gas CO_2 yang terus meningkat setiap tahunnya menjadi salah satu isu lingkungan yang mendesak untuk diatasi.

Diantara berbagai teknologi penangkap dan pemisahan CO_2 , adsorpsi merupakan teknologi yang paling terkenal karena memiliki efisiensi yang tinggi, mudah dioperasikan, konsumsi energi yang rendah, dan sangat cocok untuk aplikasi industri, terutama dengan menggunakan adsorben padat [2]. Keberhasilan teknologi adsorpsi ini bergantung pada desain adsorben padat yang sangat efisien, yang ditentukan oleh parameter luas permukaan spesifik dari adsorben. Berdasarkan penelitian sebelumnya, bahan berbasis karbon berpori terutama karbon aktif, dianggap sebagai pilihan yang tepat untuk teknologi penangkap CO_2 karena bahan ini memiliki biaya produksi yang rendah, luas permukaan yang besar, stabilitas kimia dan termal yang baik, serta sifat hidrofobik yang memastikan kinerja adsorpsi tetap baik bahkan dalam kondisi lembab [3]. Selain itu, karbon berpori ini juga memiliki porositas dan morfologi yang mudah disesuaikan dan konsumsi energi yang rendah untuk kebutuhan regenerasi [2].

Karbon aktif adalah jenis khusus dari karbon berpori yang dapat dihasilkan dari bahan dasar biomassa. Biomassa merupakan sumber daya alam terbarukan, menurut Aisy, biomassa yang berasal dari limbah perkebunan berpotensi untuk dijadikan karbon aktif karena biomaterial ini memiliki kandungan biomassa yang tinggi [4]. Salah satu limbah perkebunan yang umum ditemukan adalah kayu, seperti kayu mahoni, yang memiliki kandungan biomassa sekitar 54,07%. Hal ini karena batang pohon mahoni tersusun dari selulosa (17,39%), hemiselulosa (19,81%), lignin (41,05%), dan zat ekstraktif yang sebagian besar tersusun dari unsur karbon. Dalam pembuatan karbon aktif terdapat tahap aktivasi kimia melalui impregnasi pada aktivator seperti Kalium Hidroksida (KOH), Seng Klorida (ZnCl_2), Ammoniak (NH_3), dan uap air (H_2O). Aktivator KOH sangat efektif dalam menciptakan pori-pori kecil yang diperlukan untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi dalam penangkap dan penyimpanan gas. Aktivasi kimia dengan KOH dapat dilakukan pada berbagai suhu, selama aktivasi ini, kimia logam Kalium (K) dan KOH dimasukkan di antara lapisan struktur karbon dan meningkatkan luas permukaan dan porositas. KOH sebagai agen alkali yang kuat, dapat membantu pelebaran pori dengan memecahkan struktur karbon karena dapat bertindak sebagai katalis untuk mendorong oksidasi karbon [5]. Aktivasi kimia menggunakan KOH, telah terbukti efektif dalam menghasilkan karbon aktif dengan kapasitas adsorpsi CO_2 yang tinggi dan struktur pori-pori yang optimal [6]. KOH sebagai basa kuat dapat meningkatkan pembentukan pori-pori dan menghasilkan luas permukaan yang sangat besar, yang merupakan dua faktor utama dalam kinerja adsorben [7]. Variasi rasio KOH terhadap biomassa selalu menghasilkan perbedaan porositas dan luas permukaan yang dihasilkan.

Porositas pada karbon aktif mengacu pada jumlah dan ukuran pori-pori yang ada pada struktur karbon aktif. Porositas sangat penting karena berhubungan langsung dengan kemampuan karbon aktif untuk menyerap molekul. Pori-pori ini memungkinkan karbon aktif menangkap dan menahan partikel dari gas atau cairan yang melewatinya. Semakin tinggi porositas (dengan jumlah pori-pori yang lebih banyak), semakin besar kapasitas karbon aktif untuk mengadsorpsi zat. Oleh karena dalam penelitian ini, dilakukan studi pengaruh variasi rasio massa kayu mahoni terhadap KOH pada luas permukaan karbon berpori dan kapasitas adsorpsi gas CO_2 .

2. Metode Percobaan

Bahan yang digunakan meliputi limbah kayu mahoni sebagai sumber karbon, Kalium Hidroksida (KOH) sebagai aktivator, air deionisasi (*DI-water*), dan etanol. Metode eksperimen yang dilakukan meliputi penyiapan *raw-material* dari serbuk kayu mahoni, proses aktivasi, proses karbonasi dan karakterisasi. Karakterisasi yang dilakukan meliputi BET (*Brunauer-Emmet-Teller Quantachrome Quadrasorb-Evo Surface Area & Pore Size Analyzer*, di *Integrated Laboratory Research Center*, Universitas Indonesia. Pengujian adsorpsi gas CO₂ dilakukan di Departemen Fisika, Universitas Padjadjaran.

2.1 Pembuatan *Raw Material*

Serbuk kayu mahoni yang digunakan sebagai karbon berpori ini berasal dari limbah penggergajian kayu mahoni. Serbuk kayu yang sudah halus, dicuci terlebih dahulu menggunakan air deionisasi (*DI-water*) pada gelas *beaker*. Pencucian bahan dilakukan sebanyak dua kali untuk memastikan bahwa semua kotoran, zat ekstraktif, dan kontaminan yang mungkin ada pada permukaan bahan dapat dihilangkan. Setelah itu, dilakukan pencucian dengan *DI-water* yang telah dididihkan pada suhu 200°C, dan disaring kembali. Kemudian serbuk tersebut dimasukkan ke dalam gelas *beaker* dan ditambahkan etanol, dipanaskan menggunakan *hot plate* pada suhu 65°C selama 18 jam. Serbuk kayu yang telah kering tersebut, kemudian digerus sampai halus dengan *mortar* sehingga diperoleh *raw material*.

2.2 Proses Aktivasi

Proses aktivasi dilakukan setelah sampel sudah cukup kering dengan menggunakan material KOH. Material KOH ditimbang pada timbangan analitik kemudian dilarutkan menggunakan air deionisasi dengan mempertimbangkan massa molar dan konsentrasinya *Raw material* kering yang sudah ditimbang, kemudian dicampurkan pada KOH cair dan dimasukkan ke dalam alat sonikasi selama 30 menit. Perbandingan *raw material*:KOH yang digunakan adalah (1:1), (1:2), dan (1:3), yang masing-masing diberi nama PC-1 (*Porous Carbon-1*), PC-2, dan PC-3. Sampel yang sudah disonikasi, diletakkan kembali diatas *magnetic stirrer* selama 2 jam. Setelah *raw material* dan aktivator KOH tercampur rata, sampel disaring dengan menggunakan kertas saring serta dikeringkan diatas *hot-plate* pada suhu 85°C.

2.3 Proses Karbonisasi

Hasil campuran *raw material* dengan KOH yang berbentuk serbuk kering, ditempatkan pada *alumina boat* dan dimasukkan ke dalam *tube furnace* serta dipanaskan hingga suhu 700°C dibawah aliran gas nitrogen (N₂) selama 2 jam. Perlakuan panas pada karbon dalam suasana *inert* atau vakum dapat menghilangkan kelompok oksida permukaan tersebut sehingga pori yang terbentuk akan semakin banyak [8]. Laju kenaikan suhu dari suhu ruang ke suhu 700°C adalah 5°C/menit. Setelah proses karbonasi selesai, suhu dibiarkan ke suhu ruang secara alami. Karbon yang disintesis, kemudian digerus dan dicuci beberapa kali dengan menggunakan *DI-water* hingga mencapai pH netral. Karbon yang telah dicuci, dikeringkan di dalam *oven* selama 1 jam pada suhu 110°C. Setelah itu, karbon disaring dengan menggunakan *mesh* ukuran 60, sehingga diperoleh karbon yang siap untuk dikarakterisasi.

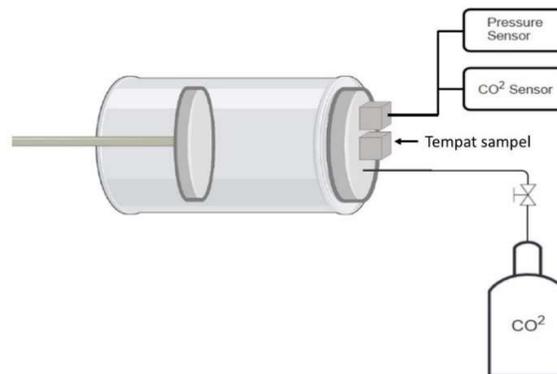
2.4 Pengujian Adsorpsi Gas CO₂

Pengukuran kinerja karbon berpori sebagai penangkap gas CO₂ dilakukan menggunakan alat uji, seperti ditunjukkan secara skematik pada Gambar 1. Alat ini terdiri dari tabung berisi piston untuk mengatur volume ruang gas CO₂, sensor gas untuk mendeteksi konsentrasi CO₂ dalam sistem, dan sensor tekanan untuk mendeteksi tekanan yang dihasilkan. Selain itu, alat ini juga dilengkapi dengan

LCD (*Liquid Crystal Display*) untuk menampilkan data dari sensor tekanan dan sensor gas, yang kemudian dibaca dan diolah melalui mikrokontroler arduino dan ditampilkan pada komputer.

Dalam penelitian ini, dilakukan dua jenis pengukuran, yaitu penentuan kondisi saturasi karbon berpori dan adsorpsi dengan gas CO₂ kontinu. Pengukuran kondisi saturasi bertujuan untuk melihat titik jenuh karbon berpori, yaitu kondisi dimana karbon tidak dapat lagi menyerap CO₂. Dalam pengukuran ini, gas CO₂ dengan tekanan input 1 bar dimasukkan ke dalam sistem dengan volume piston 1 liter selama 2 menit. Setelah itu, sistem dibiarkan selama 10 menit agar karbon berpori menyerap CO₂. Untuk memperoleh data *baseline*, pengukuran dilakukan tanpa karbon berpori terlebih dahulu untuk mengetahui jumlah gas CO₂ yang masuk ke dalam sistem tanpa adanya adsorpsi. Selanjutnya, pengukuran diulang dengan memasukkan karbon berpori ke dalam sistem.

Pada pengukuran adsorpsi gas CO₂ kontinu, gas CO₂ dimasukkan secara terus-menerus ke dalam sistem, sehingga tekanan meningkat seiring bertambahnya jumlah gas yang masuk. Data *baseline* diambil terlebih dahulu tanpa sampel karbon berpori, kemudian dibandingkan dengan data yang diperoleh saat karbon berpori digunakan. Perbandingan data *baseline* dan data menggunakan karbon berpori digunakan untuk menghitung seberapa banyak CO₂ yang berhasil diserap oleh karbon berpori.



Gambar 1. Skematik alat uji kinerja adsorpsi gas CO₂

3. Hasil dan Pembahasan

Nilai *yield* karbon yang dihasilkan untuk berbagai variasi rasio *raw-material*:KOH, ditunjukkan pada Tabel 1. Nilai *yield* berkurang dan bertambah seiring dengan meningkatnya rasio *raw material* terhadap KOH yang digunakan. Penambahan *yield* ini mungkin saja terjadi karena larutan KOH telah mencapai titik jenuhnya [8].

Kurva isoterm adsorpsi-desorpsi untuk sampel PC-1, PC-2 dan PC-3 ditunjukkan pada Gambar 2. Berdasarkan klasifikasi kurva isoterm standar IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), kurva isoterm adsorpsi-desorpsi pada Gambar 2 menunjukkan tipe IV yang mengindikasikan tipe pori mikropori dan mesopori. Hasil analisis kurva isoterm BET, menunjukkan bahwa sampel PC-1, PC-2, dan PC-3 memiliki mesopori, dengan diameter pori 2–50 nm dan diameter rata-rata pori 2,99–3,34 nm, seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Tampak bahwa semakin besar variasi rasio aktivator KOH yang digunakan, semakin besar pula luas permukaan karbon

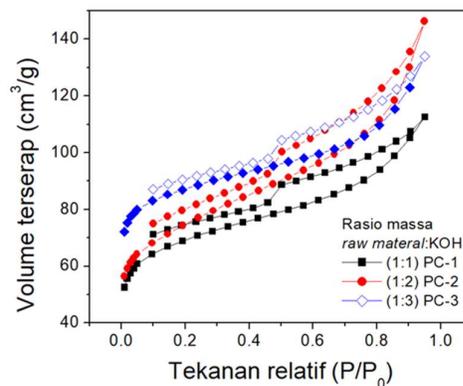
berpori yang dihasilkan. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan aktivator KOH membantu untuk meningkatkan luas permukaan dari karbon berpori. Saat karbon dan KOH dipanaskan pada proses karbonasi dengan suhu 600–900 °C, terjadi reaksi kimia kompleks antara KOH dan karbon, antara lain:



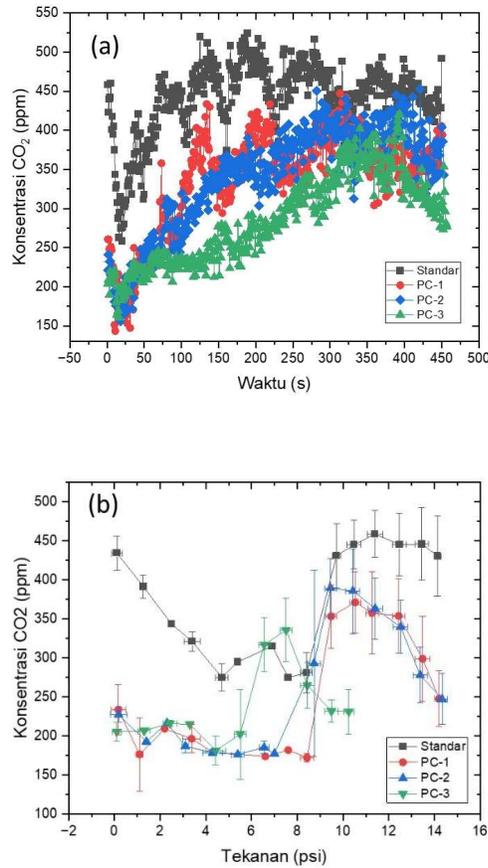
dimana gas hidrogen (H_2) logam kalium (K) akan menyusup ke dalam struktur karbon dan melubangi struktur karbon yang menghasilkan pori-pori. Khususnya gas K akan berinterkalasi ke dalam lapisan-lapisan karbon dan memperluasnya, melalui pembukaan ruang antarlapisan, sehingga membantu penciptaan struktur berpori saat logam K dikeluarkan melalui proses pencucian pasca-aktivasi. Setelah aktivasi termal, produk sisa seperti K_2CO_3 dapat dengan mudah dicuci menggunakan air atau asam ringan (HCl), dan menyisakan struktur karbon berpori. Dengan demikian, rasio KOH terhadap kayu mahoni yang meningkat dapat meningkatkan luas permukaan karbon berpori yang dihasilkan. Luas permukaan terbesar dimiliki oleh sampel PC-3 dengan rasio *raw material*:KOH (1:3) adalah 276,445 m^2/g . Nilai luas permukaan spesifik ini masih relatif rendah, karena berbagai faktor yang memengaruhi proses aktivasi dan pembentukan pori tidak optimal. Beberapa hal yang mungkin menjadi penyebab masih kecilnya nilai luas permukaan spesifik dari karbon berpori yang dihasilkan, diantaranya kondisi awal aktivasi yang belum optimal seperti suhu karbonasi yang masih rendah ($\geq 700^\circ\text{C}$) sehingga tidak cukup energi untuk membentuk pori dan waktu aktivasi terlalu singkat yang menyebabkan pori belum berkembang sempurna. Penyebab lain dapat berasal dari proses pencucian dan pengeringan yang kurang bersih. Masih ada sisa aktivator K_2CO_3 atau KOH yang mengakibatkan pori-pori menjadi tersumbat, sehingga nilai luas permukaan spesifiknya rendah. Oleh karena itu, diperlukan optimasi proses suhu karbonasi dan proses pencucian agar dihasilkan karbon berpori dengan luas permukaan spesifik yang besar.

Tabel 1. Yield dari karbon berpori hasil sintesis

Nama sampel	Rasio massa <i>raw material</i> : aktivator	Massa <i>raw material</i> (gram)	Massa hasil karbonasi (gram)	Massa karbon (gram)	Yield karbon (%)
PC-1	1:1	7,0285	3,4607	1,1705	16,65
PC-2	1:2	7	4,1343	1,1640	16,63
PC-3	1:3	7,3680	4,4508	1,2593	17,09



Gambar 2. Kurva isotherm adsorpsi-desorpsi BET



Gambar 3. Grafik konsentrasi gas CO₂ yang terdeteksi sebagai fungsi dari (a). Waktu dan (b). Tekanan.

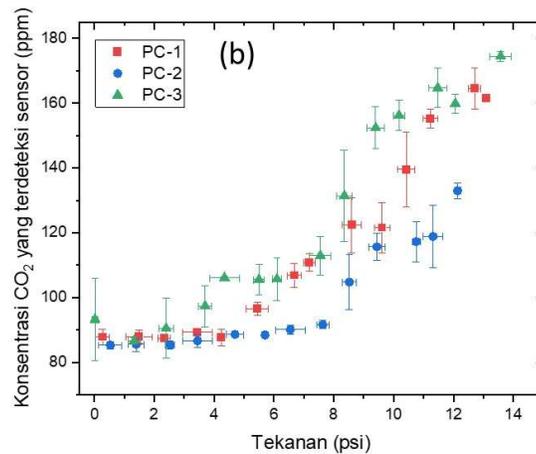
Tabel 2. Karakteristik pori dari sampel hasil analisis karakterisasi BET

No	Sampel	Luas permukaan (m ² /g)	Total volume pori (cm ³ /g)	Diameter rata-rata pori (nm)
1	PC-1	223,585	0,1742	3,1167
2	PC-2	270,937	0,2265	3,3434
3	PC-3	276,445	0,2072	2,9977

Uji kinerja adsorpsi ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan dari karbon berpori untuk mengadsorpsi gas karbon dioksida (CO₂) pada tekanan tertentu. Pada pengujian adsorpsi ini, gas CO₂ yang terserap akan meningkat seiring dengan bertambahnya waktu, namun pada akhirnya akan mencapai suatu titik kesetimbangan yang menandakan bahwa karbon berpori sudah tidak lagi dapat menyerap gas CO₂ dan mengalami fase jenuh [9]. Pada kesetimbangan tersebut, kapasitas maksimum gas CO₂ yang mampu diserap karbon berpori. Konsentrasi gas CO₂ yang terdeteksi oleh sensor menandakan bahwa gas CO₂ belum teradsorpsi oleh karbon berpori dan masih memenuhi ruangan tersebut. Gambar 3 menunjukkan grafik yang dihasilkan dari konsentrasi gas CO₂ yang

terdeteksi dalam ruangan tersebut terhadap tekanan (P) dan waktu (t). Semakin kecil konsentrasi gas CO_2 yang terdeteksi, semakin banyak gas CO_2 yang teradsorpsi ke dalam karbon berpori. Gambar 3(a) memperlihatkan bahwa tiap sampel memiliki waktu kenaikan yang berbeda-beda. Sampel PC-3 mengalami kenaikan konsentrasi pada detik ke 380, sedangkan sampel PC-2 mengalami kenaikan konsentrasi pada detik ke 300. Hal ini menunjukkan gas CO_2 lebih banyak terserap pada sampel PC-3 yang memiliki luas permukaan terbesar. Dengan demikian, luas permukaan menjadi salah satu variabel yang menentukan tingkat kapasitas adsorpsi dari karbon berpori ini. Gambar 3(b), memperlihatkan konsentrasi gas CO_2 yang terdeteksi oleh sensor sebagai fungsi dari tekanan gas. Tekanan berperan penting dalam mendorong atau membantu gas CO_2 untuk memasuki pori-pori di dalam karbon berpori. Semakin besar tekanan yang diberikan maka laju gas CO_2 untuk teradsorpsi ke dalam karbon berpori juga semakin cepat. Pada pengujian ini menggunakan tekanan yang sama untuk menginjeksikan gas CO_2 yaitu sebesar 1 bar (14,5 psi).

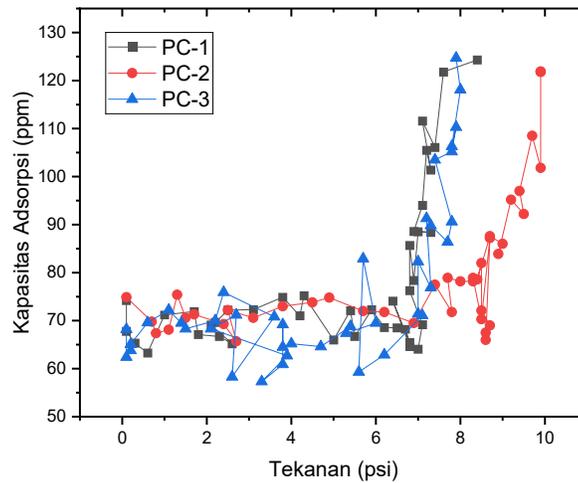
Gambar 4 menunjukkan konsentrasi gas CO_2 yang terdeteksi oleh sensor sebagai fungsi dari tekanan untuk sistem tanpa sampel/data standar (a), dan dengan sampel karbon berpori (b). Peningkatan tekanan akan meningkatkan konsentrasi gas CO_2 yang tidak teradsorpsi, sesuai dengan hukum gas ideal yaitu ketika tekanan meningkat di dalam ruang tetap (volume konstan), maka konsentrasi molekul gas juga akan meningkat. Tekanan yang terdeteksi oleh sensor, dipengaruhi oleh nilai luas permukaan spesifik dari sampel (Gambar 4(b)).



Gambar 4. Grafik konsentrasi gas CO_2 yang terdeteksi sebagai fungsi dari tekanan untuk (a). Data standar dan (b). Data sampel

Pengukuran kapasitas penyerapan dari karbon berpori bertujuan untuk mengetahui seberapa besar kapasitas yang dimiliki oleh karbon berpori untuk mengadsorpsi gas CO_2 . Gambar 5 menunjukkan semakin besar tekanan maka semakin besar pula kapasitas karbon berpori untuk mengadsorpsi. Pada tekanan rendah, molekul gas CO_2 yang tersedia di ruang masih sedikit, sehingga kapasitas adsorpsi karbon berpori relatif rendah. Seiring bertambahnya tekanan, molekul gas CO_2 jadi lebih terkonsentrasi, sehingga lebih banyak molekul yang dapat diadsorpsi pada permukaan karbon berpori. Tampak bahwa sampel PC-3 menunjukkan gas CO_2 yang terdeteksi sensor yang paling kecil dibanding sampel PC-1 dan PC-2. Hal ini berarti sampel PC-

3 mengadsorpsi gas CO₂ lebih banyak dibanding sampel PC-1 dan PC-2. Jumlah gas CO₂ yang teradsorpsi semakin meningkat seiring dengan meningkatnya nilai luas permukaan spesifik dari karbon berpori



Gambar 5. Grafik kapasitas adsorpsi gas CO₂ oleh sampel.

4. Kesimpulan

Karbon berpori dari limbah serbuk kayu mahoni telah berhasil dibuat dengan aktivator KOH dan variasi rasio *raw material*:KOH (1:1), (1:2), dan (1:3) menggunakan metode *one step carbonization*. Aktivator KOH mempengaruhi distribusi pori hingga luas permukaan yang dimiliki oleh karbon berpori tersebut. Sampel PC-1, PC-2, dan PC-3 memiliki peningkatan luas permukaan dengan luas permukaan tertinggi dimiliki oleh PC-3 yaitu 276,445 m²/g. Luas permukaan yang tinggi, disertai dengan penurunan radius pori yang dimilikinya. Hasil pengujian adsorpsi gas CO₂ pada semua sampel, menunjukkan potensi aplikasi karbon berpori yang dihasilkan sebagai penangkap gas CO₂. Karbon berpori sampel PC-3 dengan luas permukaan terbesar mampu mengadsorpsi gas CO₂ lebih banyak daripada sampel lainnya.

5. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh Universitas Padjadjaran, melalui skema *Academic Leadership Grant* (ALG) dengan nomor kontrak 1422/UN6.3.1/PT.00/2024, Tanggal 18 Maret 2024.

Daftar Pustaka

- [1] W. Shi, J. Yu, H Liu et al., "Hierarchically nanoporous carbon for CO₂ capture and separation: Roles of morphology, porosity, and surface chemistry", *ACS Appl. Nano Mater.* Vol. 6, pp 7887–7900, 2023.
- [2] B. Chang, L. Sun, W Shi et al., "Cost-efficient strategy for sustainable cross-linked

- microporous carbon bead with satisfactory CO₂ capture capacity”, *ACS Omega*, Vol. 3, 5563-5573, 2018.
- [3] Z. Zhang, Z. P. Cano, D. Luo et al., “Rational design of tailored porous carbon-based materials for CO₂ capture”, *J. Mater. Chem. A*, Vol. 7, 20985-21003, 2019.
- [4] S. R. Aisy, Karakteristik karbon berpori dari kayu mahoni yang didoping ganda nitrogen dan sulfur untuk aplikasi penangkap karbon dioksida, *Skripsi Program Sarjana Fisika*, Universitas Padjadjaran, 2024.
- [5] C. Goel, S. Mohan, P. Dinesha, “CO₂ capture by adsorption on biomass-derived activated char: A review”, *Sci Total Environ*. Vol. 798, 149296, 2021.
- [6] Z. Heidarinejad, M. H. Dehghani, M. Heidari et al., “Methods for preparation and activation of activated carbon: A review”, *Environ. Chem. Lett.*, Vol 18, 393-415. 2020.
- [7] A. Hai, G. Bharath, K. R. Babu et al., Date seeds biomass-derived activated carbon for efficient removal of NaCl from saline solution, *Process Saf. Environ*. Vol. 129, pp 103-111, 2019.
- [8] E. Umiatin, E. Budi, “Pengaruh konsentrasi larutan KOH pada karbon aktif tempurung kelapa untuk adsorpsi logam Cu”, *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal)*, Vol. 4 2015.
- [9] M. L. Zulfa, “Pembuatan alat uji penangkap gas CO₂ dan pengujian kinerja karbon berpori dari batang kayu mahoni sebagai penangkap gas CO₂”, *Skripsi Program Sarjana Fisika*, Universitas Padjadjaran, 2024.