

## PENGARUH DOPING SULFUR PADA KARAKTERISTIK KARBON BERPORI DARI LIMBAH KAYU MAHONI UNTUK APLIKASI PENANGKAP KARBON DIOKSIDA

ABDUL LATHIF<sup>1</sup>, SHOFWAH RIHADATUL AISY<sup>1</sup>, BUDI ADIPERDANA<sup>2</sup>, AYI BAHTIAR<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Bandung-Sumedang Km.21 Jatinangor 45363, Sumedang, Jawa Barat

<sup>2</sup>Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Bandung-Sumedang Km.21 Jatinangor 45363, Sumedang, Jawa Barat

**Abstrak.** Emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) menjadi salah satu penyumbang utama pemanasan global, perubahan iklim, serta dapat berdampak pada gangguan sistem pernapasan manusia. Penangkapan karbon adalah metode yang berperan penting dalam mengurangi emisi gas CO<sub>2</sub> karena tersedia secara luas, porositas yang tinggi, fisikokimia yang tinggi, sintesis sederhana dan berbiaya murah, serta tidak menghasilkan polutan. Dalam penelitian ini, disintesis karbon berpori yang didoping atom sulfur (S) yang berasal dari limbah kayu mahoni menggunakan metode one step carbonization, dimana proses aktivasi dan doping pada sampel dilakukan secara sekaligus masing-masing menggunakan KOH sebagai aktivator dan sodium tiosulfat (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sebagai sumber doping S. Variasi massa dari komposisi biomassa:KOH:sodium tiosulfat yang dilakukan adalah (1:1:0), (1:1:0,5) dan (1:1:1), yang berturut-turut diberi nama CS-0, CS-0,5 dan CS-1. Hasil EDS menunjukkan bahwa doping atom S telah berhasil dilakukan pada karbon berpori yang ditandai dengan terukurnya kandungan persen atomik dari S pada sampel CS-0,5 dan CS-1, masing-masing sebesar 11,57% dan 33,46%. Hasil FTIR juga menunjukkan adanya gugus fungsi C=S pada bilangan gelombang 1080 cm<sup>-1</sup>. Hasil pengukuran BET menunjukkan bahwa sampel CS-0,5 memiliki luas permukaan dan volume total pori sebesar 385,814 m<sup>2</sup>/g dan 0,425 cm<sup>3</sup>/g, yang lebih tinggi jika dibandingkan karbon tanpa doping (CS-0). Doping S yang tinggi pada sampel CS-1 mengakibatkan pori-pori tertutup oleh atom S sebagaimana hasil dari foto SEM, dan juga ditunjukkan oleh luas permukaan dan volume total pori yang rendah, yaitu 115,235 m<sup>2</sup>/g dan 0,200 cm<sup>3</sup>/g. Dengan demikian sampel CS-0,5 memiliki potensi paling tinggi sebagai material karbon berpori untuk aplikasi penangkap karbon dioksida, karena memiliki luas permukaan dan volume pori yang paling besar.

**Kata kunci:** Penangkap karbon dioksida, limbah kayu mahoni, *one-step carbonization*, karbon berpori doping S, luas permukaan, volume total pori.

**Abstract.** Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions are one of the main contributors to global warming, climate change, and can have an impact on the human respiratory system. Carbon capture is a method that plays an important role in reducing CO<sub>2</sub> gas emissions because it is widely available, high porosity, high physicochemistry, simple synthesis, and low costs, and also does not produce pollutants. In this research, porous carbon doped with sulfur (S) atoms was synthesized from mahogany wood waste using the one step carbonization method, where the activation and doping processes on the sample were carried out simultaneously using KOH as the activator and sodium thiosulfate (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) as the source of doping S. Mass variations of the composition of biomass:KOH:sodium thiosulfate carried out were (1:1:0), (1:1:0.5) and (1:1:1), which were respectively named CS-0, CS0.5, and CS-1. The EDS results show that S atomic has been successfully doped into porous carbon as indicated by the measured 11.57% and 33.46% atomic of S in the samples CS-0.5 and CS-1, respectively. FTIR results also show the C=S functional group was identified at a wave number of 1080 cm<sup>-1</sup>. The BET measurement results show that the sample CS-0.5 has a surface area and total pore volume of 385.814 m<sup>2</sup>/g and 0.425 cm<sup>3</sup>/g, which is higher than undoped carbon (CS-0). The high S doping in the sample (CS-1) resulted in the pores being closed by S atoms as shown in the SEM image, and was also shown by the low surface area and total volume of the pores, namely 115.235 m<sup>2</sup>/g and 0.200 cm<sup>3</sup>/g. Thus, the sample CS-0.5 has highest potential as porous carbon materials for carbon dioxide capture applications, due to its highest specific surface area and total pore volume.

**Keywords:** Carbon capture, mahogany wood waste, *one-step carbonization*, porous carbon, S-doped, surface area, total pore volume

---

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

## 1. Pendahuluan

Karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) menjadi salah satu penyumbang utama pemanasan global, perubahan iklim, gangguan sistem pernapasan, dan lain-lain [1]. Adapun sumber utama dari emisi  $\text{CO}_2$  adalah pembakaran bahan bakar, kegiatan industri, dan pengolahan gas alam [2]. Seiring dengan permintaan bahan bakar fosil yang terus menerus tinggi untuk waktu yang lama, maka penelitian melalui pengembangan berbagai metode untuk mengurangi pelepasan  $\text{CO}_2$  sangat diperlukan [1].

Berbagai teknologi adsorben padat telah digunakan sebagai metode penangkapan  $\text{CO}_2$  [1]. Metode penangkapan tersebut memiliki beberapa karakteristik, seperti operasi yang mudah, input modal kecil, kehilangan energi kecil, dan bebas korosi [3]. MOFs (Metal Oxide Frameworks) dan zeolit memiliki potensi adsorpsi  $\text{CO}_2$  yang lebih besar pada tekanan yang relatif rendah karena morfologi ultra-mikroporinya. Namun, bahan-bahan ini memerlukan prosedur sintetik yang rumit serta biaya sintetik yang tinggi [2]. Penangkapan  $\text{CO}_2$  dengan mekanisme adsorpsi berbasis karbon (carbon capture) dianggap sebagai metode yang menjanjikan dan menguntungkan karena tersedia secara luas, memiliki luas permukaan yang besar, modifikasi bahan kimia/porositas permukaan yang mudah, regenerasi mudah, memiliki sifat hidrofobik yang baik, memiliki stabilitas termal, mekanik, dan fisikokimia yang tinggi, dapat disintesis dengan metode yang sederhana, dan biaya yang murah serta tidak menghasilkan polutan [1,3,4].

Karakteristik penting dari material untuk diaplikasikan sebagai penangkap karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) adalah porositas yang meliputi luas permukaan pori, total volume pori, dan diameter pori. Sifat fisika dan kimia yang merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap proses penangkapan  $\text{CO}_2$  [2]. Doping karbon dengan atom sulfur (S) digunakan untuk meningkatkan sifat fisika dan kimia melalui interaksi elektrostatis permukaan karbon dengan gas interaksi (molekul adsorbat), sehingga dapat meningkatkan selektivitas dalam menangkap gas  $\text{CO}_2$  [1,5]. Dalam penelitian ini, dilakukan sintesis karbon berpori dari biomassa limbah kayu mahoni dengan menggunakan metode karbonisasi satu langkah atau one step carbonization. Aktivator yang digunakan berupa KOH dan natrium tiosulfat ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) digunakan sebagai sumber doping S.

## 2. Bahan dan Metode

Bahan yang digunakan meliputi limbah kayu mahoni sebagai sumber karbon, natrium tiosulfat ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) sebagai doping sulfur, natrium 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.

Limbah kayu hasil penggergajian yang telah berbentuk serbuk, dicuci menggunakan *DI-water*, dan disaring menggunakan filter kopi. Setelah itu, dilakukan pencucian dengan *DI-water* yang telah dididihkan pada suhu  $200^\circ\text{C}$ , dan disaring kembali. Kemudian serbuk tersebut dimasukkan ke dalam gelas *beaker* dan ditambahkan etanol, dipanaskan menggunakan *hot plate* pada suhu  $65^\circ\text{C}$  selama 18 jam. Serbuk kayu yang telah kering tersebut, kemudian digerus sampai halus dengan *mortar* sehingga diperoleh *raw material*.

Proses aktivasi bertujuan untuk menginisiasi pembentukan pori. Dalam penelitian ini, digunakan KOH sebagai aktivator. Untuk sampel tanpa doping, dilakukan pencampuran hanya antara *raw material* dan KOH dengan rasio 1:1, kemudian dimasukkan ke dalam gelas *beaker*. Campuran bahan tersebut kemudian disonikasi selama 30 menit. Setelah itu, dilakukan pengadukan dengan *magnetic stirrer* selama 2 jam dengan kecepatan 2000 rpm. Sampel kemudian disaring kembali dengan kertas saring dan hasilnya dimasukkan ke dalam *petry dish*, dikeringkan, dan digerus,

sehingga diperoleh sampel untuk proses karbonisasi. Untuk sampel yang didoping S, digunakan sodium tiosulfat ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) sebagai sumber doping S. Sodium tiosulfat dicampurkan dalam proses aktivasi melalui pencampuran *raw material*, KOH, dan doping S secara langsung. Rasio massa antara *raw material*:KOH:doping S, dan *DI-water* adalah 1:1:x:10, dimana x adalah massa dopan S. Rasio (x) divariasikan dari 0,5 dan 1, sehingga rasio *raw material*:KOH:doping S adalah (1:1:0,5), dan (1:1:1).

Sampel hasil proses aktivasi yang sudah kering dimasukkan ke dalam *alumina boat*, untuk dilakukan proses karbonisasi menggunakan *tube furnace*. Proses karbonisasi di dalam *tube furnace* pada suhu  $700^\circ\text{C}$  selama 2 jam dibawah aliran gas  $\text{N}_2$ . Laju kenaikan suhu dari suhu ruang ke suhu  $700^\circ\text{C}$  adalah  $5^\circ\text{C}/\text{menit}$ . Setelah proses karbonasi selesai, suhu dibiarkan ke suhu ruang secara alami. Karbon yang disintesis, kemudian digerus dan dicuci dengan menggunakan HCl 0,1-0,5 M hingga mencapai pH netral. Karbon yang telah dicuci, kemudian dikeringkan di dalam *oven* selama satu jam pada suhu  $110^\circ\text{C}$ . Setelah itu, karbon disaring dengan menggunakan *mesh* yang berukuran 60, sehingga diperoleh karbon yang siap untuk dikarakterisasi.

Karakterisasi karbon berpori dilakukan dengan menggunakan spektroskopi SEM -EDS SU3500 untuk mengetahui morfologi permukaan dan kandungan unsur dari karbon berpori, spektroskopi FTIR untuk mengetahui gugus-gugus fungsi dari karbon berpori dan BET (*Brunauer-Emmet-Teller*) *Quantachrome Quadrasorb-Evo Surface Area & Pore Size Analyzer* untuk mengetahui tingkat porositas (luas permukaan, volume total pori dan diameter rata-rata pori) dari karbon.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Variasi sampel dengan rasio massa *raw material*:KOH:doping S (1:1:0), (1:1:0,5), dan (1:1:1) selanjutnya diberi nama CS-0, CS-0,5 dan CS-1. Gambar 1 memperlihatkan foto karbon hasil sintesis. Hasil pengukuran EDS diperlihatkan pada Tabel 1. Kandungan sulfur (S) pada sampel CS-0,5 dan CS-1 masing-masing sebanyak 11,57% dan 33,46% atomik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa doping S telah berhasil dilakukan pada karbon, dimana semakin banyak sodium tiosulfat sebagai material doping S yang diberikan, semakin besar persen atomik yang terdeteksi pada karbon yang didoping.



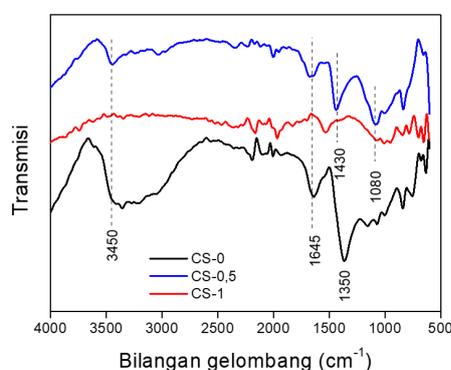
Gambar 1. Foto karbon hasil sintesis

Gambar 2 memperlihatkan spektra FTIR dari karbon. Tampak bahwa gugus fungsi C=S teridentifikasi pada bilangan gelombang  $1080\text{ cm}^{-1}$  untuk sampel CS-0,5 dan CS-1, yang menunjukkan bahwa doping S telah berhasil. Hal ini sesuai dengan studi kelompok lain, bahwa gugus yang diakibatkan oleh S dapat terdeteksi dengan FTIR pada bilangan gelombang  $710\text{-}570$

cm<sup>-1</sup> (C-S stretch) dan 1275-1030 cm<sup>-1</sup> (C=S stretch) [6]. Adapun gugus fungsi lain yang teridentifikasi pada sampel ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 1.** Kandungan unsur sampel karbon berpori hasil pengukuran EDS

No.	Sampel	Persen atomik (%)				Persen berat (%)			
		C	O	N	S	C	O	N	S
1	CS-0	61,28	38,41	0,31	0	54,32	45,36	0,32	0
2	CS-0,5	81,19	6,44	0,80	11,57	66,78	7,05	0,76	25,41
3	CS-1	0,54	66,00	0	33,46	0,30	49,45	0	50,24



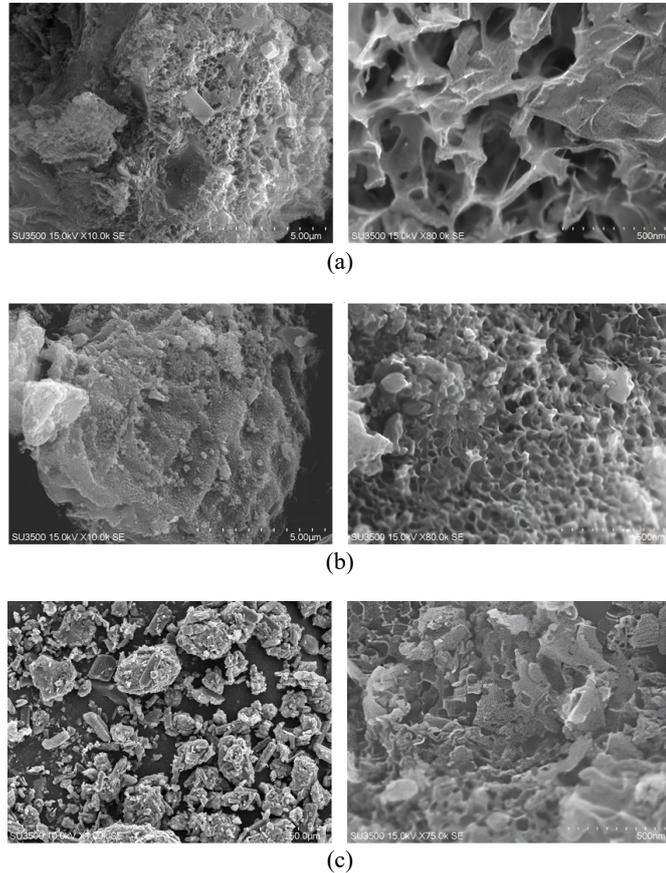
**Gambar 2.** Spektra FTIR dari sampel karbon CS-0, CS-0,5, dan CS-1

**Tabel 2.** Gugus-gugus fungsi dari sampel karbon hasil pengukuran FTIR

No.	Sampel	Gugus fungsi	Bilangan gelombang (cm <sup>-1</sup> )
1	CS-0	O-H	3450
		C=C	1645
		C-H	1350
2	CS-0,5	C=C	1546
		C=S	1080
3	CS-1	O-H	3450
		C=C	1645
		C-H	1430
		C=S	1080

Morfologi permukaan dari karbon berdasarkan hasil karakterisasi SEM ditunjukkan pada Gambar 3. Tampak bahwa semua sampel berongga atau berpori, sehingga semua sampel disebut karbon berpori. Sampel CS-0,5 dan CS-1 memiliki rongga dengan rentang ukuran yang lebih kecil daripada sampel CS-0, namun lebih homogen. Ukuran rongga dari sampel CS-0,5 dan CS-1 yang lebih kecil daripada sampel tanpa doping, diakibatkan oleh adanya sulfur pada sampel. Proses

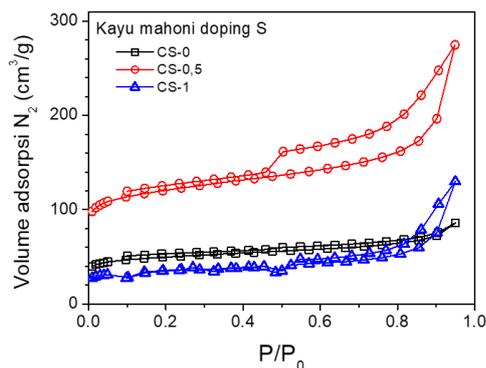
karbonisasi pada suhu 700oC, tidak menyebabkan sulfur menguap, sehingga terdapat banyak kandungan sulfur di permukaan sampel karbon berpori [7].



**Gambar 3.** Foto SEM permukaan karbon berpori dengan perbesaran yang berbeda (a). CS-0, (b). CS-0,5, dan (c). CS-1

Tingkat porositas (luas permukaan, volume total pori dan diameter pori) dari sampel karbon berpori diukur dengan BET. Gambar 4 memperlihatkan kurva isoterm dari sampel karbon berpori. Tampak bahwa semua sampel menunjukkan histerisis pada kurva adsorpsi dan desorpsi, yang menunjukkan bahwa sampel berpori. Hasil analisis kurva isoterm dari sampel berupa luas permukaan, volume total pori dan diameter pori ditunjukkan pada Tabel 3. Semua sampel memiliki diameter pori dalam rentang 3,3–7 nm, yang menunjukkan bahwa semua sampel dapat melewati gas CO<sub>2</sub>, karena lebih besar daripada ukuran molekul CO<sub>2</sub> yaitu 0,33 nm. Sampel CS-0,5 memiliki luas permukaan 385,814 m<sup>2</sup>/g dan volume total pori 0,425 cm<sup>3</sup>/g, yang lebih tinggi dibandingkan karbon berpori tanpa doping (sampel CS-0), yang memiliki luas permukaan 159,385 m<sup>2</sup>/g dan volume total pori 0,133 cm<sup>3</sup>/g. Doping S yang lebih tinggi pada sampel CS-1, mengakibatkan luas permukaan yang lebih kecil yaitu 115,235 m<sup>2</sup>/g dibandingkan dengan CS-0 dan CS-0,5, yang diakibatkan oleh atom S yang menutupi permukaan, sebagaimana ditunjukkan juga oleh foto SEM. Nilai luas permukaan semua sampel masih lebih rendah jika dibandingkan dengan hasil yang telah dilaporkan oleh kelompok lain [5,8]. Diperlukan optimasi rasio KOH dalam proses aktivasi, kalsinasi pasca karbonasi dan optimasi dalam proses pencucian. Proses

kalsinasi pada suhu 800°C dapat meningkatkan luas permukaan karbon dari biomassa eceng gondok [9]. Hasil pengukuran BET menunjukkan bahwa sampel CS-0,5 memiliki luas permukaan spesifik dan volume pori yang lebih besar dibandingkan dengan sampel CS-0 dan CS-1, sehingga sampel CS-0,5 memiliki potensi yang paling tinggi untuk diaplikasikan sebagai material penangkap karbon dioksida.



**Gambar 4.** Kurva isoterm BET dari sampel karbon CS-0, CS-0,5, dan CS-1.

**Tabel 3.** Karakteristik porositas karbon berpori hasil analisis BET.

No.	Sampel	Luas permukaan (m <sup>2</sup> /g)	Volume total pori (cm <sup>3</sup> /g)	Diameter rata-rata pori (nm)
1	CS-0	159,385	0,133	3,30
2	CS-0,5	385,814	0,425	4,40
3	CS-1	115,235	0,200	7,00

#### 4. Kesimpulan

Sintesis karbon berpori yang didoping S telah berhasil dilakukan, yang ditunjukkan dengan kandungan persentase atomik atom S pada pengukuran EDS dan teridentifikasinya gugus fungsi C=S pada bilangan gelombang 1080 cm<sup>-1</sup> dari pengukuran FTIR. Persentase atomik unsur S untuk sampel CS-0,5 dan CS-1 adalah 11,57% dan 33,46%. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan bahwa semua karbon memiliki rongga. Hal ini menunjukkan bahwa semua sampel adalah karbon berpori. Ukuran rongga semakin mengecil seiring dengan meningkatnya jumlah doping S, akibat tertutupnya rongga dengan sulfur. Hasil pengukuran BET menunjukkan bahwa sampel CS-0,5 memiliki luas permukaan tertinggi, yaitu 385,814 m<sup>2</sup>/g, dengan volume pori 0,425 cm<sup>3</sup>/g, dan diameter rata-rata pori 4,4 nm. Dengan demikian, sampel CS-0,5 memiliki potensi paling tinggi untuk diaplikasikan sebagai material penangkap karbon dioksida.

#### 5. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh Universitas Padjadjaran, melalui skema *Academic Leadership Grant* (ALG) dengan nomor kontrak 1549/UN6.3.1/PT.00/2023, Tanggal 27 Maret 2023.

### **Daftar Pustaka**

- [1] Y. Li, T. Zhang, Y. Wang, and B. Wang, "Transformation of waste cornstalk into versatile porous carbon adsorbent for selective CO<sub>2</sub> capture and efficient methanol adsorption," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 9, no. 5, (2021), p. 106149, doi: 10.1016/j.jece.2021.106149.
- [2] G. Nazir, A. Rehman, and S. J. Park, "Role of heteroatoms (nitrogen and sulfur)-dual doped corn-starch based porous carbons for selective CO<sub>2</sub> adsorption and separation," *J. CO<sub>2</sub> Util.*, vol. 51, (2021), p. 101641, doi: 10.1016/j.jcou.2021.101641.
- [3] C. Ma, T. Lu, J. Shao, J. Huang, X. Hu, and L. Wang, "Biomass derived nitrogen and sulfur co-doped porous carbons for efficient CO<sub>2</sub> adsorption," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 281, (2022), p. 119899, doi: 10.1016/j.seppur.2021.119899.
- [4] W. Shi, J. Yu, H. Liu, D. Gao, A. Yuan, and B. Chang, "Hierarchically nanoporous carbon for CO<sub>2</sub> capture and separation: Roles of morphology, porosity, and surface chemistry," *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 6, no. 9 (2023), pp. 7887–7900, doi: 10.1021/acsanm.3c01040.
- [5] D. Saha, G. Orkoulas, and D. Bates, "One-step synthesis of sulfur-doped nanoporous carbons from lignin with ultra-high surface area, sulfur content and CO<sub>2</sub> adsorption capacity," *Materials*, vol. 16, no. 1, (2023), p. 455, doi: 10.3390/ma16010455.
- [6] E. Handoyo, Y. Andriani, L. Rosmayati, A. Chairuna, dan E. Suhendi, "Optimalisasi metode aktivasi adsorben karbon aktif dengan sulfur, tembaga, sulfida, dan seng klorida serta uji kapasitas adsorpsi dengan variasi kondisi saturasi gas alam," *J. LPMG.*, vol. 54, no. 3 (2020), doi.org/10.29017/LPMGB.54.3.570
- [7] F. Aryani dan F. Mardiana, "Aplikasi metode aktivasi fisika dan aktivasi kimia pada pembuatan arang aktif dari tempurung kelapa (*Cocos nucifera* L)," *Indones. J. Labor.*, vol. 1, no. 2, (2019), pp. 16–20, doi.org/10.22146/ijl.v1i2.447431
- [8] J. Bai, J. Huang, Q. Yu, M. Demir, F.H. Gecit, B.N. Altay, L. Wang and X. Hu, "One-pot synthesis of self S-doped porous carbon for efficient CO<sub>2</sub> adsorption," *Fuel Process. Technol.*, vol. 244, (2023), p. 244, doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107700.
- [9] O. Nurhilal, Q. B. Salam, S. Hidayat dan Risdiana, "Pengaruh kalsinasi terhadap pembentukan porositas arang aktif dari limbah eceng gondok," *Pros. Sem. Nas. Fisika (e-Journal)*, vol. 10, no. 1, (2022), p. FA-7. doi.org/10.21009/03.SNF2022.01.FA.02..