

## Utilização de resíduos agroindustriais para síntese de material poroso e sua utilização para captura de CO<sub>2</sub>

Ingrid S. Pinto<sup>1,2</sup>; Leonardo M. Santos<sup>2</sup>; Evandro A. C. Duarte<sup>2</sup>; Franciele L. Bernard<sup>1,2</sup>; Sandra M. O. Einloft<sup>1,2</sup>.

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, Porto Alegre, Brasil;

<sup>2</sup> Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, Porto Alegre, Brasil.  
*Ingrid.selbach@acad.pucrs.br*

**Palavras-Chave:** Sorção; Porosidade; Metodologia;

### Introdução

Tem sido relatado na literatura que os impactos das mudanças climáticas sobre pessoas e o ecossistemas são mais severos do que o previsto[1].

O mês de julho de 2023 foi registrado como o mais quente da história, com temperaturas oceânicas atingindo níveis sem precedentes para a época, o que levou o secretário das Nações Unidas (ONU) a declarar que “a era do aquecimento global acabou, a era da “ebulição global” chegou” [2].

Houve um aumento de 2.94 ppm de CO<sub>2</sub> emitido entre maio de 2024 (423.95 ppm) e maio de 2025 (426.89 ppm) [3]. A Organização Mundial de Saúde (OMS) destaca que a queima de combustíveis fósseis se torna cada vez mais alarmante, tornando a mudança climática a maior ameaça a saúde que a humanidade enfrenta até então [4].

Este cenário destaca a importância de encontrar meios de absorção dos gases de efeito estufa presentes na atmosfera. A principal tecnologia utilizada para absorção química é através de soluções aquosas de aminas. Porém, esta tecnologia possui inconvenientes como a corrosão de equipamentos, alto custo energético, perdas de solventes e oxidação. A fim de contornar estes problemas e obter novas opções para a captura de CO<sub>2</sub>, vem sendo pesquisados materiais porosos que proporcionem boa capacidade de absorção de CO<sub>2</sub> [5].

A captura de CO<sub>2</sub> utilizando uma variedade de materiais porosos, incluindo zeólitas, sílica mesoporosa, estruturas metal-orgânicas, estruturas orgânicas covalentes (COFs) e materiais de carbono poroso são reconhecidos como um processo alternativo e atrativo em relação a outras técnicas de separação para a captura de CO<sub>2</sub> de gases de combustão, devido a sua economia energética, ser ecologicamente correto e de fácil reversibilidade [6].

Atualmente o carvão ativado apresenta as principais vantagens de todos os adsorventes sólidos, como baixo custo, alta disponibilidade, hidrofobicidade, capacidade de adaptação da interface, grande área superficial e fácil regeneração. Devido ao uso em larga escala de materiais de carbono porosos para captura de CO<sub>2</sub>, vem sendo apresentado na literatura o uso de biomassa natural para produzir tais adsorventes [6].

Resíduos sólidos descartados inadequadamente e a utilização contínua de reservas de combustíveis fósseis são os dois principais fatores poluentes que liberam subprodutos tóxicos e nocivos ao meio ambiente. Dentre os diversos resíduos sólidos, o descarte de resíduos agroindustriais é a principal preocupação devido a expansão das indústrias alimentícias, o que

é resultante do aumento populacional. Os resíduos incluem biomassa residual, cascas, sementes e outras partes de resíduos sólidos agrícolas [7].

A gestão e valorização de resíduos sólidos geram preocupações e desafios no mundo inteiro. Resíduos gerados pelas indústrias alimentares são encontrados em grande variedade, e são fontes essenciais de compostos extremamente valiosos que podem ser transformados em produtos uteis para diversas aplicações industriais [7].

Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo obter materiais porosos partindo de resíduos agroindustriais, como a borra de café, utilizando diferentes metodologias de obtenção, para fins de absorção de CO<sub>2</sub>.

### Material e Métodos

Os materiais utilizados no presente trabalho foram borra de café, carbonato de potássio (Dinâmica), ácido clorídrico (Neon), hidróxido de potássio (Vetec), estufa e mufla.

O resíduo (borra de café - SCG) obtido foi levado a estufa por 12h a 105°C para retirada de umidade. Após foi adicionado carbonato de potássio (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) em uma proporção de 1:1 para ativação do material e a mistura foi calcinada em mufla sob duas temperaturas (700 e 800°C), gerando assim dois produtos diferentes.

Após as calcinações os materiais (SCG700 e SCG800) foram divididos para aplicar dois métodos de síntese, com ácido clorídrico (HCl) (SCGH700 e SCGH800) e hidróxido de potássio (KOH) (SCGK700 e SCGK800). Na síntese utilizando HCl, o material foi imerso na solução durante 30 minutos e após lavado até neutralização do pH. Por fim, realizou-se a secagem em estufa a 105°C por 12h.

Na síntese utilizando KOH, o material foi misturado ao KOH em uma proporção de 1:6 em um reator que posteriormente foi colocado dentro da estufa a 150°C por 90 min. Após foi realizada lavagem até neutralização de pH e secagem em estufa a 105°C por 12h.

Para caracterização dos materiais obtidos foram utilizadas as análises de Espectroscopia de Infravermelho (FTIR KBr), Análise Termogravimétrica (TGA), Ressonância Magnética Nuclear (RMN MAS em <sup>13</sup>C e <sup>29</sup>Si), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV - FEG), Método de Brunauer-Emmett-Teller (BET), e avaliação da capacidade de Sorção de CO<sub>2</sub> do material a 25 °C e pressões de 1 a 30 bar.

### Resultados e Discussão

#### Espectroscopia de Infravermelho (FTIR)

A Figura 1 apresenta os espectros da análise de infravermelho dos materiais obtidos. Os picos apresentados em ~3379 cm<sup>-1</sup> e ~3651 cm<sup>-1</sup> correspondem a ligação simples O-H. Os picos em ~2816 cm<sup>-1</sup> e ~2896 cm<sup>-1</sup> correspondem a vibração de alongamento de ligação simples C-H<sub>2</sub>. Ligações aromáticas C-C são apresentadas em ~1543 cm<sup>-1</sup>. Outro pico localizado em ~1184 cm<sup>-1</sup> é atribuído a C-O. Enquanto em ~861 cm<sup>-1</sup> é atribuído a C-H aromático [8].

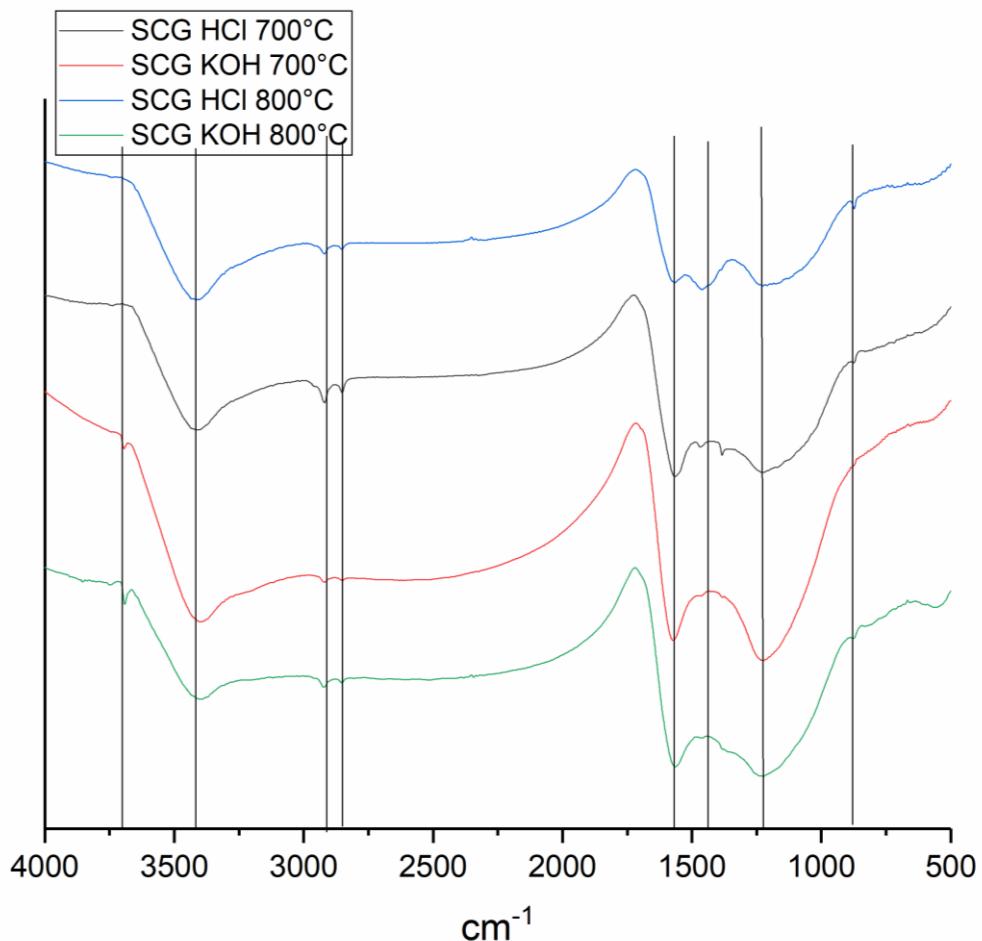


Figura 1. Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier das amostras de SCG.

### 1. Análise Termogravimétrica (TGA)

A Figura 2 apresenta os resultados de análise termogravimétrica, onde observa-se que todas as amostras possuem a mesma tendência de degradação apresentando em torno de três zonas de degradação. O primeiro decaimento de massa até 120°C é relacionado a vaporização de umidade. O material que foi submetido a queima em 700°C apresentou decaimento de massa entre 300 e 530°C, relacionado a decomposição térmica da hemicelulose e da celulose, as perdas de massa acima de 530°C é atribuído a degradação da lignina, que possui degradação

térmica lenta, como consequência da forte reticulação existente entre os três tipos de benzeno-propano dos quais é composta. [9]–[15].

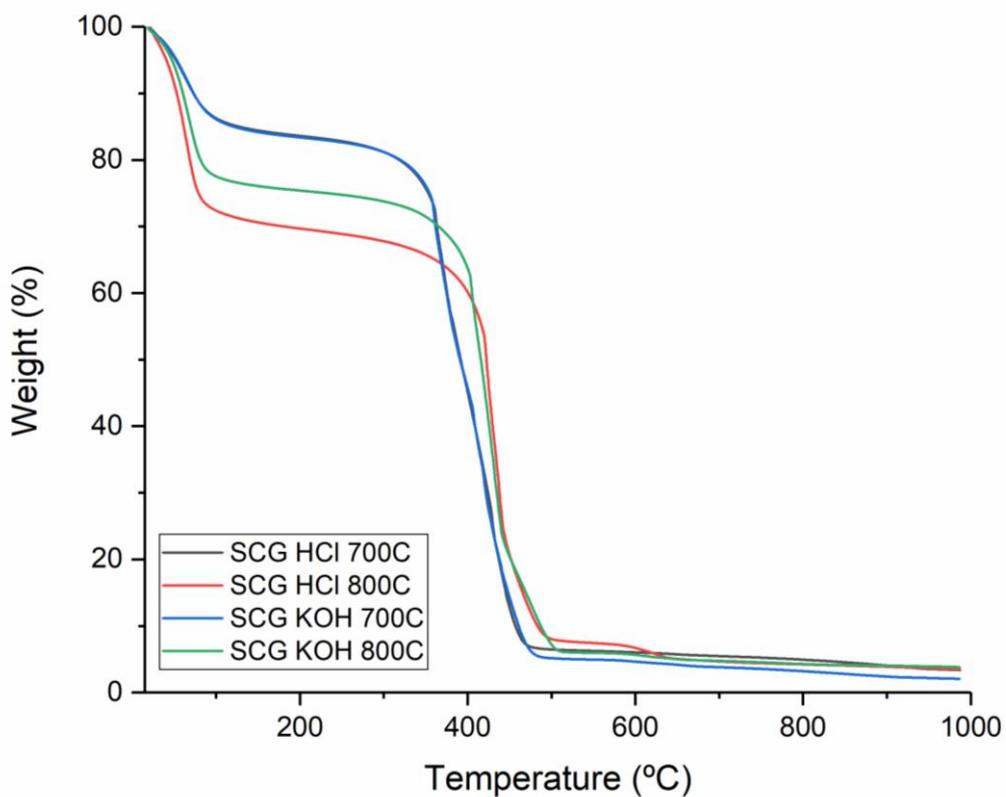


Figura 2. Análise termogravimétrica dos materiais.

## 2. Ressonância Magnética Nuclear (RMN-MAS)

Os espectros de RMN-MAS apresentados na Figura 4 demonstram que os materiais obtidos são predominantemente compostos por carbono, sem a presença de sílica. Os espectros do material apresentam um pico em ~127 ppm, podendo ser atribuído ao C aromático substituído por C e H, os picos próximos (~170 e ~87 ppm) também são relacionados a este pico. Sinais de C não aromático foram detectados em ~40 ppm na região de C alquila. O pico em ~208 ppm é atribuído a C de cetona e aldeído. E o pico em ~5 ppm indica a presença de C alifático[16][17].

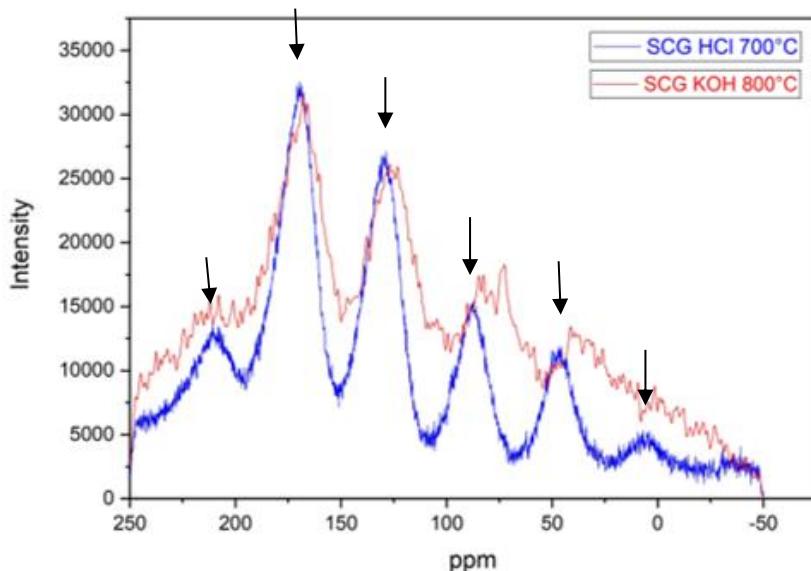


Figura 3. Gráficos de RMN-MAS das amostras de SCG em  $^{13}\text{C}$ .

### 3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 5 (A-E) apresentam as imagens de MEV de SCG e SCG ativado. A SCG (A), apresenta uma morfologia volumosa, de superfície lisa e sem poros. Enquanto nas amostras de SCG ativado, observa-se a presença de macroporos, que podem ser formados pela liberação de gases de pirólise durante a ativação química com  $\text{K}_2\text{CO}_3$ . Na amostra SCGH700°C, nota-se o início da formação de poros, que se apresentam mais evidenciados nos outros materiais. Mesmo com temperatura diferentes durante a ativação do material, não foi observado diferenças perceptíveis entre a morfologia dos materiais [18].

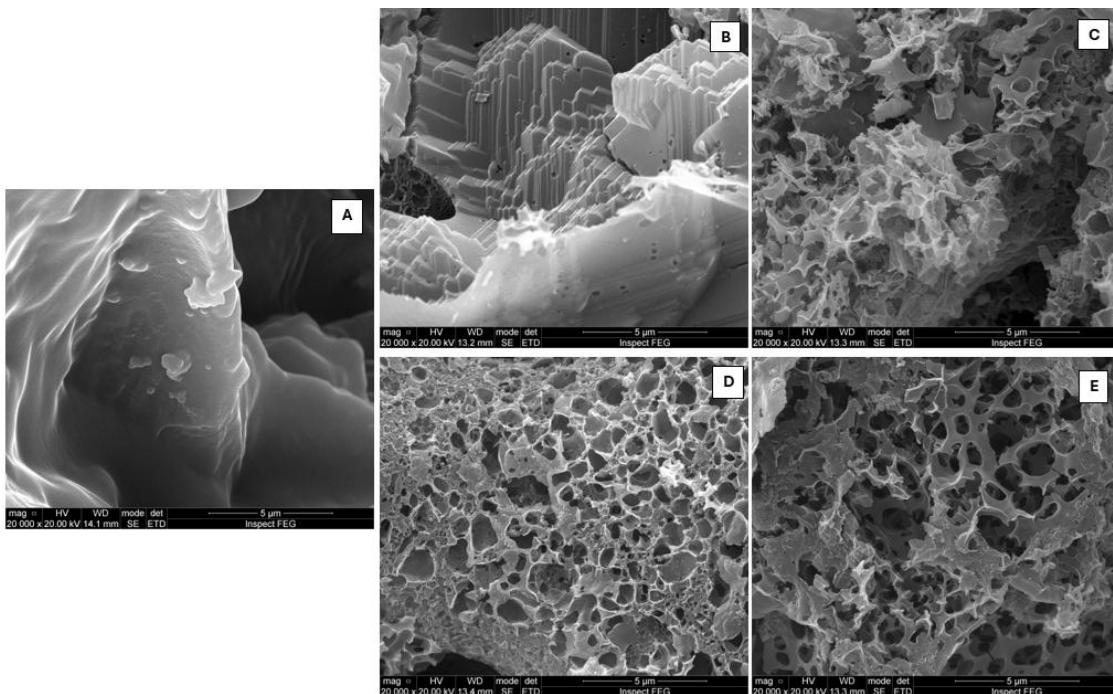


Figura 4. Imagens de MEV das amostras partindo da borra de café; a) SCG; b) SCGH700°C, c) SCG HCl 800°C, d) SCG KOH 700°C, e) SCG KOH 800°C

#### 4. Método Brunauer-Emmett-Teller (BET)

Como mostra a Tabela 1, a área superficial específica e o volume total de poros aumentaram conforme a temperatura de ativação aumentou. O SCG KOH 800°C apresentou maior área superficial e volume de total de poros respectivamente. Todas as amostras apresentaram macroporos, como visto anteriormente na análise de MEV, e também apresentaram microporos, conforme definido pela IUPAC [18]–[20].

Tabela 1. Análise de BET e densidade das SCG ativadas.

Amostra	BET	Volume de poro	Raio médio de poro	Densidade
SCG HCl 700°C	173	0,046	1,71	1,8287
SCG HCl 800°C	418	0,093	1,72	2,4062
SCG KOH 700°C	159	0,040	1,71	1,7979
SCG KOH 800°C	685	0,134	1,52	1,9092

#### 5. Sorção de CO<sub>2</sub>

A Figura 5 apresenta a capacidade de captura de CO<sub>2</sub> dos materiais a 25°C e diferentes pressões (1 e 30 bar). Os materiais que apresentaram melhor capacidade de sorção foram os ativados com KOH e queima a 800°C, o que pode estar relacionado a maior área superficial e volume de poro. Soltysik *et al.*, sintetizaram bioadsorventes a base de café para captura de

$\text{CO}_2$ , em baixa pressão obtiveram 123.6 mg  $\text{CO}_2/\text{g}$  (1 bar e 25°C). O presente trabalho obteve valores próximos ao descrito na literatura, alcançando uma captura de 108.09 mg  $\text{CO}_2/\text{g}$  em baixa pressão de equilíbrio. Em alta pressão de equilíbrio o material apresentou mais que o dobro de capacidade de captura de  $\text{CO}_2$  (280.96 mg  $\text{CO}_2/\text{g}$ ) [21].

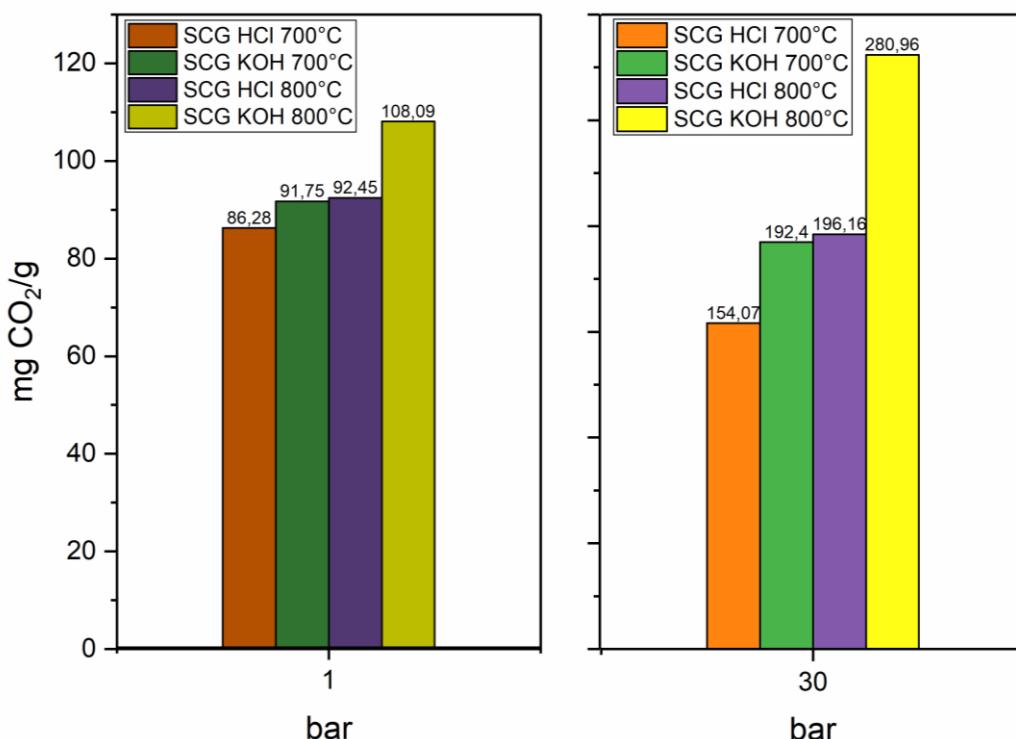


Figura 5. Sorção de  $\text{CO}_2$  dos materiais a 25 °C e pressões de 1 a 30 bar.

## Conclusões

A partir dos dados obtidos no presente trabalho, podemos concluir que os materiais sintetizados a partir de resíduos de café são predominantemente compostos de carbono, como visto nas análises de infravermelho e ressonância magnética nuclear.

Através das análises de microscopia eletrônica de varredura e BET, pode-se concluir que os materiais possuem macro e microporos o que facilita a adsorção de  $\text{CO}_2$ . Todos os materiais obtidos apresentaram boa capacidade de captura em pressões baixas e altas, sendo o melhor o material ativado em meio básico a 800°C, o qual apresentou maior área superficial e volume de poro.

Por fim, conclui-se que os materiais foram obtidos com sucesso, e que apresentam potencial para captura de  $\text{CO}_2$  e boa estabilidade térmica.

## Agradecimentos

Agradeço aos colegas de pesquisa que auxiliaram muito no processo, a PUCRS e a CAPES pela oportunidade de desenvolver a pesquisa apresentada neste trabalho.

## Referências

- [1] IPCC, “AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023,” 2023.
- [2] ONU, “Coletiva de imprensa do secretário-geral da ONU sobre o clima,” *Nações Unidas, Brasil*, Jul. 27, 2023.
- [3] G. M. Laboratory, “No Title,” *Global Monthly Mean CO2*.

- <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>
- [4] OMS, “Mudanças climáticas são a maior ameaça à saúde humana, afirma OMS,” Oct. .
- [5] B. B. Polesso, F. L. Bernard, H. Z. Ferrari, E. A. Duarte, F. D. Vecchia, and S. Einloft, “Supported ionic liquids as highly efficient and low-cost material for CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> separation process,” *Heliyon*, vol. 5, no. 7, p. e02183, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02183.
- [6] J. Serafin, M. Ouzzine, O. F. Cruz Junior, and J. Sreńscek-Nazzal, “Preparation of low-cost activated carbons from amazonian nutshells for CO<sub>2</sub> storage,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 144, p. 105925, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105925.
- [7] M. Saeed *et al.*, “Coconut waste valorization to produce biochar catalyst and its application in cellulose-degrading enzymes production via SSF,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 240, p. 124382, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124382.
- [8] J. Silvaraja, N. Y. Yahya, M. M. Zainol, and Y. S. Lee, “Preliminary investigations of sustainable magnetic catalyst-based biochar derived spent coffee ground for biodiesel production from waste cooking oil,” *Clean. Chem. Eng.*, vol. 11, p. 100148, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.clce.2025.100148.
- [9] D. Malagón-Romero, A. C. Torres-Velasquez, L. K. Tinoco-Navarro, and J. P. Arrubla-Vélez, “Pyrolysis of Colombian spent coffee grounds (SCGs), characterization of bio-oil, and study of its antioxidant properties,” *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 811–829, Dec. 2023, doi: 10.1080/14786451.2023.2235025.
- [10] J.-Y. Lin, P.-T. Chang, J.-R. Shi, F.-C. Liu, C.-Y. Wang, and N.-W. Tsao, “Sustainable Bio-Adsorbent Generated from Coffee Waste for Dual Application in Heavy Metal and Dye Removal,” *Processes*, vol. 13, no. 5, p. 1364, Apr. 2025, doi: 10.3390/pr13051364.
- [11] T. Suwunwong, N. Hussain, S. Chantrapromma, and K. Phoungthong, “Facile synthesis of corncob biochar via in-house modified pyrolysis for removal of methylene blue in wastewater,” *Mater. Res. Express*, vol. 7, no. 1, p. 015518, Jan. 2020, doi: 10.1088/2053-1591/ab6767.
- [12] C. Călin, E.-E. Sîrbu, M. Tănase, R. György, D. R. Popovici, and I. Banu, “A Thermogravimetric Analysis of Biomass Conversion to Biochar: Experimental and Kinetic Modeling,” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 21, p. 9856, Oct. 2024, doi: 10.3390/app14219856.
- [13] M. Nasir, T. Rahmawati, and F. Dara, “Synthesis and Characterization of Biochar from Crab Shell by Pyrolysis,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 553, no. 1, p. 012031, Nov. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/553/1/012031.
- [14] E. Hidayat *et al.*, “Optimization and comparative modelling of RSM and ANN for the adsorptive removal of Remazol Brilliant Blue R dye using spent coffee ground biochar,” *Chemosphere*, vol. 389, p. 144709, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.chemosphere.2025.144709.
- [15] S. Mehrotra *et al.*, “Functional biochar derived from *Desmostachya bipinnata* for the application in energy storage/conversion devices,” *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 14, no. 15, pp. 17263–17275, Aug. 2024, doi: 10.1007/s13399-023-03991-7.
- [16] A. Cervera-Mata, L. Lara-Ramos, J. A. Rufián-Henares, A. Fernández-Arteaga, J. Fernández-Bayo, and G. Delgado, “Characterization and Greenhouse Trial of Zn Bio-Chelates Derived from Spent Coffee Grounds,” *Agronomy*, vol. 14, no. 10, p. 2426, Oct. 2024, doi: 10.3390/agronomy14102426.
- [17] A. B. Fuertes *et al.*, “Chemical and structural properties of carbonaceous products obtained by pyrolysis and hydrothermal carbonisation of corn stover,” *Soil Res.*, vol. 48, no. 7, p. 618, 2010, doi: 10.1071/SR10010.
- [18] M.-J. Kim, S. W. Choi, H. Kim, S. Mun, and K. B. Lee, “Simple synthesis of spent coffee ground-based microporous carbons using K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> as an activation agent and their application to CO<sub>2</sub> capture,” *Chem. Eng. J.*, vol. 397, p. 125404, Oct. 2020, doi:

10.1016/j.cej.2020.125404.

- [19] H. Ying, C. Jia, G. Zeng, and N. Ai, “Turn Waste Golden Tide into Treasure: Bio-Adsorbent Synthesis for CO<sub>2</sub> Capture with K<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub> as Catalytic Oxidative Activator,” *Molecules*, vol. 29, no. 6, p. 1345, Mar. 2024, doi: 10.3390/molecules29061345.
- [20] “mesopore,” in *The IUPAC Compendium of Chemical Terminology*, Research Triangle Park, NC: International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), 2014. doi: 10.1351/goldbook.M03853.
- [21] M. Sołtysik, I. Majchrzak-Kucęba, and D. Wawrzyńczak, “A Coffee-Based Bioadsorbent for CO<sub>2</sub> Capture from Flue Gas Using VSA: TG-Vacuum Tests,” *Energies*, vol. 18, no. 15, p. 3965, Jul. 2025, doi: 10.3390/en18153965.