

Produção de Compostos Aromáticos por Pirólise Catalítica de *Arthrospira platensis* cultivada sob Diferentes Concentrações de CO₂

Guilherme Q. Calixto¹, Karine F. S. de Oliveira^{1*}, Leila L. S. Santos², Vítor Rodrigo M. Melo¹, Lídia G. R. de Souza¹, Dulce M.A. Melo¹, Sibele B. C. Pergher¹, Renata M. Braga^{1,2}

¹Laboratório de Tecnologia Ambiental - UFRN. *E-mail: karine935@gmail.com

²Laboratório de Bioenergia, Captura e Conversão de CO₂ – EAJ/UFRN

Resumo/Abstract

RESUMO - Este trabalho investigou a captura e o armazenamento de CO₂ por meio do cultivo da microalga *Arthrospira platensis* em diferentes concentrações de CO₂ (0,04%, 5%, 10% e 15%), simulando emissões industriais e utilizando meio de cultivo com fertilizante comercial de baixo custo. A biomassa foi caracterizada quanto ao teor de lipídios, composição elementar, poder calorífico, análise imediata e termogravimétrica. Em seguida, realizou-se a pirólise convencional e catalítica com o catalisador HZSM-5. Os resultados obtidos mostraram que a concentração de 10% de CO₂ destacou-se por apresentar maior taxa de biofixação (0,70 g·L⁻¹·d⁻¹), maior poder calorífico (17,7 MJ/kg), maior teor de carbono fixo e estabilidade térmica. A pirólise catalítica favoreceu a produção de compostos aromáticos (até 78%) e hidrocarbonetos (até 21,4%), com maior eficiência em cultivos com CO₂. Os resultados indicam que a modulação das condições de cultivo altera significativamente o perfil químico da biomassa, ampliando seu potencial como matéria-prima para biocombustíveis e insumos industriais por rotas termoquímicas catalíticas.

Palavras-chave: *Arthrospira platensis*, captura de CO₂, pirólise catalítica, HZSM-5, biocombustíveis.

ABSTRACT - This study investigated the capture and storage of CO₂ through the cultivation of the microalga *Arthrospira platensis* under different CO₂ concentrations (0.04%, 5%, 10%, and 15%), simulating industrial emissions and using a low-cost commercial fertilizer-based culture medium. The biomass was characterized in terms of lipid content, elemental composition, calorific value, proximate analysis, and thermogravimetric behavior. Subsequently, conventional and catalytic pyrolysis was carried out using the HZSM-5 catalyst. The results showed that cultivation with 10% CO₂ led to the highest biofixation rate (0.70 g·L⁻¹·d⁻¹), greater calorific value (17.7 MJ/kg), higher fixed carbon content, and enhanced thermal stability. Catalytic pyrolysis favored the production of aromatic compounds (up to 78%) and hydrocarbons (up to 21.4%), with greater efficiency under CO₂-enriched conditions. The findings indicate that modulating cultivation conditions significantly alters the chemical profile of the biomass, enhancing its potential as a feedstock for biofuels and industrial inputs via catalytic thermochemical routes.

Keywords: *Arthrospira platensis*, CO₂ capture, catalytic pyrolysis, HZSM-5, biofuels.

Introdução

As emissões de dióxido de carbono (CO₂) oriundas de atividades industriais são uma das principais fontes de Gases de Efeito Estufa (GEE), contribuindo significativamente para o aquecimento global (1). Desde 2015, essas emissões cresceram cerca de 10%, impulsionadas pela demanda energética e uso contínuo de combustíveis fósseis (2).

Diante desse cenário, diversas estratégias de sequestro de CO₂ têm sido investigadas, incluindo métodos físicos, químicos e termoquímicos. No entanto, processos biológicos, especialmente o biosequestro por microalgas, destacam-se como alternativa promissora por aliar eficiência na captura de carbono com geração de biomassa de valor agregado (3,4).

As microalgas são classificadas como biomassa de terceira geração para a produção de biocombustíveis e bioprodutos, destacando-se pelo elevado potencial de captura e utilização de CO₂. Seu cultivo apresenta diversas vantagens: crescimento rápido, não competição com terras agrícolas, potencial de remediação ambiental e capacidade de biofixação de CO₂ até 50 vezes superior à de plantas terrestres (5). Além disso, podem ser cultivadas utilizando efluentes industriais, tanto líquidos quanto gasosos, aproveitando nutrientes e os gases de exaustão como CO₂ proveniente de processos de diversas indústrias como cimentícia, aço e alumínio.

A biomassa gerada, rica em metabólitos de interesse, especialmente lipídios, pode ser direcionada para processos de pirólise, uma rota termoquímica eficiente para converter

materiais orgânicos, como biomassa, resíduos agroindustriais ou microalgas, em produtos de maior valor agregado, como biocombustíveis, bio-óleo, biochar e gases leves (6,7). No entanto, o bio-óleo obtido no processo apresenta limitações para uso como combustível, devido ao alto teor de oxigênio e nitrogênio, o que compromete sua estabilidade, aumenta a acidez e reduz o poder calorífico (8). Para superar essas limitações, a pirólise catalítica surge como uma alternativa promissora, promovendo reações de desoxigenação e desnitrificação, com melhoria significativa na qualidade do bio-óleo.

O uso de catalisadores sólidos, como as zeólitas HZSM-5, são amplamente utilizados por favorecerem reações de aromatização, isomerização e craqueamento, aumentando a fração dos compostos voláteis desejáveis (9). Contudo, o alto custo de catalisadores convencionais ainda é um entrave para a viabilização em escala industrial, o que reforça a necessidade de desenvolvimento de catalisadores alternativos, mais acessíveis e ambientalmente sustentáveis.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a captura e armazenamento de CO₂ por meio do cultivo da microalga *Arthrospira platensis* em diferentes concentrações de CO₂, simulando um gás de exaustão industrial, utilizando um meio de cultivo com fertilizante comercial de baixo custo. Em seguida, será avaliada a viabilidade do uso do catalisador HZSM-5 na pirólise catalítica da biomassa, com foco na produção de biocombustíveis avançados, visando alternativas sustentáveis para a valorização da biomassa e a mitigação dos impactos ambientais.

Experimental

Cultivo de microalgas

A cepa da *Arthrospira platensis* (D9Z) foi fornecida pelo banco de cepas do Laboratório LARBIM (UFPA). O cultivo foi conduzido em fotobiorreatores com capacidade de 4 L, sob condições controladas de temperatura (29 °C), intensidade luminosa de 1500 lux, fotoperíodo de 12 horas de luz/12 horas de escuro, e aeração contínua. O meio de cultivo foi formulado com base em adaptações do meio Zarrouk PA (Zarrouk, 1966), empregando fertilizantes agrícolas comerciais. A inoculação foi realizada com cultura em fase exponencial, correspondente a 10% do volume total. O delineamento experimental compreendeu cinco condições: cultivo com 0,04% (controle), 5%, 10% e 15% de CO₂, todos realizados em triplicata. O CO₂ utilizado apresentou pureza de 98% (grau industrial). Os dados para avaliar a eficiência de biofixação de CO₂ foi realizada durante o cultivo, e calculado conforme a Equação 01, descrita na Tabela 01. Portanto, após 13 dias de cultivo e com a biomassa em fase estacionária, a colheita foi realizada por filtração em malha de 20 µm. A

biomassa obtida foi armazenada em sacos plásticos e congelada a -20 °.

Para dar continuidade aos experimentos, a biomassa previamente congelada foi submetida à liofilização a -53 °C e 0,021 mbar, utilizando o liofilizador modelo Alpha 1-2 LDplus (Christ®), durante 48 horas. Ao final do processo, a biomassa seca foi acondicionada e armazenada na geladeira.

Caracterização das microalgas

A caracterização da biomassa visou avaliar seu potencial energético. As análises foram realizadas em triplicata, exceto o poder calorífico e a análise elementar. O teor de umidade foi determinado conforme a norma ASTM E871-82 (10), para verificar a estabilidade do material seco, conforme Equação 02. O teor de cinzas e de voláteis foi determinado segundo as normas ASTM E1755-01 e ASTM E872-82, respectivamente (11,12). O carbono fixo foi calculado por diferença conforme a Equação 03. A análise de lipídeos foi realizada por meio do método adaptado de *Schmid-Bondzynski-Ratzlaff*, que consiste em uma hidrólise ácida (HCl, 8M) de 0,3 g da biomassa, seguida por extração com solventes orgânicos na proporção de 1:1 de éter de petróleo e álcool etílico, por fim, foi realizada a quantificação pela diferença de massa (Equação 03). A análise termogravimétrica foi conduzida com aquecimento de 25 a 900 °C sob atmosfera de N₂, com taxa de aquecimento de 5 °C min⁻¹ utilizando uma balança termogravimétrica DTG-60 Shimadzu. O poder calorífico foi obtido em bomba calorimétrica da *Parr Instrument Company*, modelo Isoperibol 6400, conforme a metodologia descrita pela ASTM D5865-13, utilizando ácido benzóico como padrão. A composição elementar (CHNS) foi realizada utilizando um analisador elementar automático MACRO CUBE da empresa Elementar, por combustão a 1000 °C, e detecção dos gases resultantes por condutividade térmica.

$$PCO_2 = \frac{X_f}{t_{cultivo}} \times \left(\frac{C\%}{100} \right) \times \left(\frac{MCO_2}{MC} \right) \quad \text{Equação 01}$$

$$TU = \left[\frac{M_i - M_f}{M_i - M_r} \right] \times 100 \quad \text{Equação 02}$$

$$TL = \frac{m_{bal\tilde{a}o+extrato} - m_{bal\tilde{a}o}}{m_{amostra}} \times 100 \quad \text{Equação 03}$$

Onde: $t_{cultivo}$: tempo total de cultivo (dias); X_f : massa total de biomassa seca produzida (g); $C\%$: carbono obtido na análise elementar; MCO_2 e MC são as massas molares do CO₂ e carbono, respectivamente; M_i e M_f são a massa inicial e final da amostra, respectivamente, (g); M_r é a massa do recipiente, (g); $m_{bal\tilde{a}o+extrato}$ é a massa do balão juntamente com o extrato (g), $m_{bal\tilde{a}o}$ é a massa do balão, e $m_{amostra}$ é a massa da amostra.

Pirólise analítica convencional e catalítica (Py-CG-MS)

As análises de pirólise analítica foram realizadas em micropirolisador 5200 HP-R da CDS (CDS *Analytical*) para avaliar os compostos voláteis formados na pirólise rápida da biomassa. Aproximadamente 1 mg de amostra foi pirolisada a 500 °C por 20 segundos, com taxa de aquecimento de 10 °C ms⁻¹. Os vapores gerados foram arrastados por N₂ e dessorvidos de um trap de Tenax a 300 °C. A análise dos produtos foi feita por GC-MS (VARIAN 3900) acoplado a coluna VF-5ms, sob programação térmica de 40 a 280 °C. Em seguida, foi realizada a pirólise catalítica (arranjo *ex-situ*), e os voláteis foram direcionados para um leito recheado com o catalisador HZSM-5 a 500 °C, mantendo-se uma razão catalisador/biomassa de 5:1. A identificação dos compostos obtidos foi baseada na biblioteca NIST (similaridade ≥ 85%) e a quantificação realizada por porcentagem relativa de área. Todas as análises foram conduzidas em triplicata.

Resultados e Discussão

Caracterização das microalgas

Os resultados obtidos, Tabela 01, demonstram que a concentração de CO₂ exerce influência direta sobre as propriedades físico-químicas da biomassa de *Arthrospira plantis*, afetando desde o crescimento celular até as características termoquímicas relevantes para aplicações energéticas e ambientais.

Tabela 1. Caracterização para todos os cultivos em FBR 4L para a *Arthrospira plantis*.

Caracterização	0,04% CO ₂	5% CO ₂	10% CO ₂	15% CO ₂
P _{CO2} (g.L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,22	0,29	0,37	0,28
TU (%)	5,7	6,8	8,1	5,5
TV (%)	56,9	57,1	55,8	56,2
CF (%)	22,0	22,0	23,2	26,1
PC (MJ/kg)	17,1	15,7	17,7	16,1
TL (%)	10,5	11,2	11,7	10,7
C (%)	48,1	49,1	49,5	50,2
H (%)	6,2	6,9	6,6	6,4
N (%)	12,6	11,9	10,9	10,7
O (%)	33,1	32,0	33,0	32,7

Legenda: TU (teor de umidade); TC (teor de cinzas); TV (teor de voláteis); CF (carbono fixo); PC (poder calorífico); TL (teor de lipídios); C (carbono); H (hidrogênio); N (nitrogênio); O (oxigênio); P (Biofixação de CO₂)

Inicialmente, observou-se que a suplementação com CO₂ favoreceu o acúmulo de biomassa e o desempenho em biofixação, com destaque para a concentração de 10%, que proporcionou a maior taxa de biofixação (0,70 g.L⁻¹.d⁻¹) e o maior poder calorífico (17,7 MJ/kg). Isso sugere que concentrações intermediárias de CO₂ criam um ambiente propício ao crescimento celular eficiente, sem

comprometer o pH do meio, otimizando assim o metabolismo e a incorporação de carbono orgânico.

As características físico-químicas da biomassa também refletiram os efeitos das diferentes concentrações de CO₂. A baixa umidade residual (5,5–5,7%) indica viabilidade para processos industriais, como a secagem, com menor gasto energético (13,14). Quanto ao teor de cinzas, observou-se variação de 14,8 ± 0,2% a 12,2 ± 0,5%, com os maiores valores registrados na condição sem adição de CO₂. Esse resultado pode estar relacionado à menor taxa de crescimento celular nessa condição, o que favorece o acúmulo relativo de minerais na biomassa. Os compostos voláteis, que correspondem à fração orgânica suscetível à degradação térmica, apresentaram o maior teor na condição com 5% de CO₂ (57,1 ± 0,3%), alinhando-se aos valores reportados na literatura para microalgas, que variam entre 50% e 58% (13).

No que diz respeito à composição volátil, associada à fração orgânica suscetível à degradação térmica, os maiores teores foram observados na biomassa cultivada com 5% de CO₂ (57,1 ± 0,3%), resultado que se alinha à faixa de 50–58% relatada na literatura para diferentes espécies de microalgas (13). Em contrapartida, o teor de carbono fixo, representando a fração sólida remanescente após o processo de pirólise, aumentou com a elevação da concentração de CO₂, alcançando 26,1 ± 0,3% na biomassa exposta a 15% de CO₂. Esse acréscimo sugere o acúmulo de estruturas recalcitrantes à degradação térmica, o que é relevante para aplicações como a gaseificação e a produção de biochar, onde elevados teores de carbono fixo estão associados a maior estabilidade térmica e valor energético do material (15).

Complementando essas observações, o poder calorífico da *Arthrospira plantis* variou entre 15,7 e 17,7 MJ/kg, com o valor mais elevado registrado na condição de 10% de CO₂. Esses dados estão de acordo com os valores relatados por Zhang *et al.* (2023), que indicam uma faixa de 14,5 a 31,3 MJ/kg para diferentes cultivos do gênero *Arthrospira* (13). A variação no poder calorífico pode ser explicada pela composição bioquímica da biomassa, especialmente pelos teores de lipídeos e carboidratos, componentes determinantes para o conteúdo energético disponível.

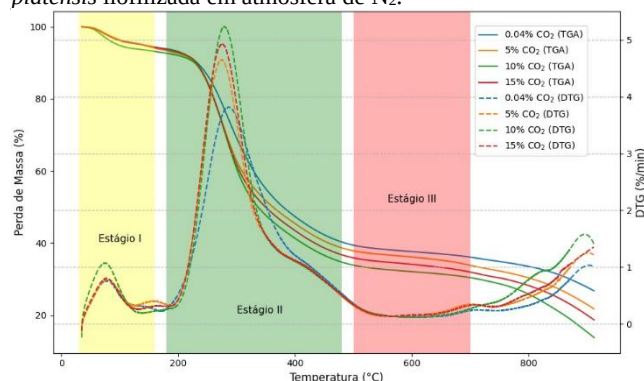
Apesar da contribuição energética dos lipídeos, seus teores na biomassa permaneceram relativamente baixos, com máximo de 11,7%. Essa baixa concentração de lipídios pode ser atribuída ao perfil bioquímico característico da espécie, que apresenta elevado teor proteico (16). Como consequência, a síntese de lipídios tende a ser menos expressiva, refletindo-se em menores acúmulos desse componente na biomassa.

Em relação ao carbono total, observou-se maior acúmulo na biomassa cultivada sob 15% de CO₂, atingindo 50,2%. Esse resultado está no limite superior dos valores descritos

por Ramirez-Perez *et al.* (2021), que relataram teores de carbono variando entre 36,29% e 50,2% para *Arthrospira platensis* (17). O aumento do teor de carbono na biomassa cultivada com maiores concentrações de CO₂ pode indicar uma intensificação na fixação de carbono orgânico, refletindo um metabolismo mais eficiente e contribuindo para o aumento do valor energético e do rendimento em compostos termoquimicamente relevantes.

A análise termogravimétrica (TGA) realizada em atmosfera inerte (N₂), Figura 1, permitiu avaliar o comportamento térmico da *Arthrospira platensis* e sua aplicabilidade em processos termoquímicos. O perfil de degradação térmica apresentou três estágios principais: (i) perda de umidade (30–180 °C), (ii) decomposição de compostos orgânicos voláteis (200–500 °C) e (iii) degradação dos resíduos sólidos. No primeiro estágio, as perdas de massa variaram entre 5,6% e 6,8%, refletindo o baixo teor hídrico característico do gênero *Arthrospira*, cuja parede celular composta por peptidoglicanos apresenta menor capacidade de retenção de água (18).

Figura 1. Curvas termogravimétricas (TG e DTG) da *Arthrospira platensis* liofilizada em atmosfera de N₂.



O segundo estágio, responsável pela liberação de voláteis, envolveu a degradação de lipídeos, proteínas e carboidratos. A *Arthrospira platensis* demonstrou alta produção de matéria volátil, com valores de 49,6% e 48,5% para cultivos com 10% e 15% de CO₂, respectivamente. Esse comportamento está relacionado ao elevado teor proteico da biomassa, favorecendo a liberação de compostos voláteis durante a pirólise. A fase final corresponde à decomposição dos resíduos sólidos, como carbono fixo e cinzas (18). Os valores de massa residual para *Arthrospira platensis* foram baixos, variando entre 11,6% e 11,7%, sugerindo maior eficiência na conversão térmica dos componentes orgânicos. Valores condizentes com os obtidos na análise do teor de cinzas.

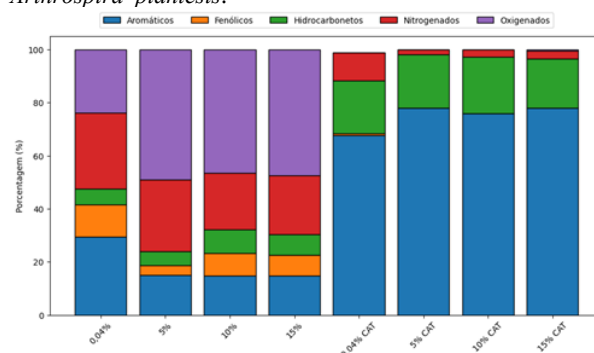
Os cultivos suplementados com CO₂ apresentaram maior teor de compostos voláteis, especialmente na condição de 10%, o que indica um bom equilíbrio entre assimilação de carbono e estrutura bioquímica da biomassa. Esses

resultados reforçam o potencial da *Arthrospira platensis* em aplicações como pirólise e gaseificação, voltadas à produção de bio-óleo, gás de síntese e biochar, conforme.

Pirólise analítica convencional e catalítica (Py-CG-MS)

A avaliação dos produtos gerados pela pirólise analítica da *Arthrospira platensis*, em suas modalidades convencional e catalítica, Figura 2, revelou a forte influência das condições de cultivo, especialmente da concentração de CO₂, sobre o perfil químico dos compostos voláteis formados.

Figura 2. Principais classes de compostos para as pirólises da *Arthrospira platensis*.



Na pirólise convencional, observou-se que a amostra cultivada sem adição de CO₂ apresentou um comportamento distinto em relação às demais, com menor teor de compostos oxigenados (24%) em comparação com as amostras cultivadas com CO₂ (46–49%). Este resultado sugere uma menor proporção de carboidratos e outros constituintes oxigenados na biomassa inicial, o que está em conformidade com achados de Hu *et al.* (2019) (19). Consequentemente, essa mesma amostra gerou um teor superior de compostos aromáticos (29%), valor significativamente mais elevado que o observado nas amostras cultivadas com CO₂ (14,8–15%). Tal evidência reforça a hipótese de que a composição inicial da biomassa, modulada pelas condições de cultivo, desempenha um papel determinante na qualidade dos produtos voláteis gerados por pirólise.

Na pirólise catalítica, utilizando a zeólita HZSM-5, todos os perfis das amostras de *A. platensis* convergiram para uma predominância de compostos aromáticos, confirmando a efetividade do catalisador na aromatização e desoxigenação dos compostos. No entanto, a amostra sem adição de CO₂ apresentou um rendimento de compostos aromáticos inferior (67,7%) em relação às amostras com CO₂ (76–78%). Adicionalmente, essa mesma amostra também apresentou o maior teor de compostos nitrogenados (10,4%), enquanto as demais variaram entre 1,8–2,8%. Essa diferença pode indicar uma menor eficiência do craqueamento catalítico para biomassa com

composição mais rica em nitrogênio e menor grau de oxigenação (16).

Em relação à geração de hidrocarbonetos, a pirólise convencional da *A. platensis* resultou em teores relativamente baixos, variando entre 5,27% e 8,74%. Entretanto, na pirólise catalítica, houve um aumento expressivo dessa fração, alcançando valores entre 18,65% e 21,39%. Os resultados sugerem que a estrutura química da *Arthrospira platensis* apresenta características que favorecem o craqueamento catalítico, fato que pode estar relacionado ao seu alto teor de carbono fixo (22,0–26,1%). Essa propriedade está diretamente relacionada ao poder calorífico da biomassa, que atingiu até 17,7 MJ/kg na condição de cultivo com 10% de CO₂ — a mesma condição que também apresentou o maior teor de hidrocarbonetos na pirólise convencional.

Em conjunto, os resultados demonstram que a *A. platensis* apresenta elevado potencial para conversão termoquímica em compostos aromáticos e hidrocarbonetos de interesse energético e químico, especialmente quando cultivada sob condições controladas de CO₂. Além disso, a utilização de catalisadores como a zeólita HZSM-5 se mostra estratégica para a valorização da biomassa microalgal, promovendo a formação de produtos com maior valor agregado e relevância industrial.

Conclusões

Os resultados obtidos evidenciam que a composição química da *Arthrospira platensis* pode ser modulada pelas condições de cultivo, especialmente pela concentração de CO₂, influenciando diretamente o rendimento e a qualidade dos produtos obtidos por pirólise. A presença de CO₂ durante o cultivo favoreceu a formação de compostos oxigenados na pirólise convencional, mas também resultou em maiores teores de aromáticos e hidrocarbonetos na pirólise catalítica, demonstrando a eficácia da zeólita HZSM-5 na conversão de compostos oxigenados em produtos de maior valor agregado. A elevada proporção de carbono fixo e o poder calorífico da biomassa reforçam sua viabilidade como matéria-prima para rotas termoquímicas. Assim, a integração entre estratégias de cultivo e processos catalíticos se apresenta como uma abordagem promissora para a valorização de microalgas na produção de biocombustíveis avançados e insumos químicos sustentáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio técnico e financeiro da Petrogal Brasil S.A. (Joint Venture Galp - Sinopec), a Agência de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - Processo n.º 407862/2022-6 e 303275/2023-5) e o Laboratório de

Ambientes Recifais e Biotecnologia com Microalgas (LARBIM) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

Referências

1. M. Filonchik, M. P. Michael, L. Zhang, V. Hurynovich, Y. He, *Sci. Total Environ.* **2024**, 935, 173359.
2. IEA, World Energy Outlook 2023, IEA, Paris, **2023**. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.
3. Y.K. Leong, J.S. Chang, *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2023**, 178, 113245.
4. M.A. Kassim, T.K. Meng, *Sci. Total Environ.* **2017**, 584–585, 1121–1129.
5. R. Pourjamshidian, H. Abolghasemi, M. Esmaili, H.D. Amrei, M. Parsa, S. Rezaei, *Braz. J. Chem. Eng.* **2019**, 36, 639–645.
6. M. Rodrigue, *Inter. J. of N. F and Sciences*, **2022**, 45–55.
7. G. M. Rosa, *Bioresource Technology*, (192) **2015**, 321.
8. S.I. Mustapha, I. Rawat, F. Bux, Y.M. Isa, *Renew. Energy*. **2021**, 179, 2036–2047.
9. W.N.A.W. Khalit, N. Asikin-Mijan, T.S. Marliza, M.S. Gamal, M.R. Shamsuddin, M.I. Saiman, Y.H. Taufiq-Yap, *Biomass Bioenergy*. **2021**, 154, 106248.
10. ASTM, E872-82, Annu. Book ASTM Stand. **2019**.
11. ASTM, E1755-01, Annu. Book ASTM Stand. **2019**.
12. ASTM, E872-82, Annu. Book ASTM Stand. **1982**.
13. J. Xu, X. Tian, W. Huang, L. Ke, L. Fan, Q. Zhang, X. Cui, Q. Wu, Y. Zeng, K. Cobb, Y. Liu, R. Ruan, Y. Wang, *Sci. Total Environ.* **2023**, 899, 165597.
14. L. Dai, Y. Wang, Y. Liu, R. Ruan, Z. Yu, L. Jiang, *Sci. Total Environ.* **2019**, 659, 95–100.
15. W.N.A.W. Khalit, N. Asikin-Mijan, T.S. Marliza, M.S. Gamal, M.R. Shamsuddin, M.I. Saiman, Y.H. Taufiq-Yap, *Biomass Bioenergy*. **2021**, 154, 106248.
16. I.M.S. Anekwe, E.E.S. Lora, K.A. Subramanian, A. Kozlov, S. Zhang, B. Oboirien, Y.M. Isa, *Energy Convers. Manag.* **2024**, 22, 100529.
17. J.C. Ramirez-Perez, H. Janes, *Eclética Quím.* **2021**, 46(1), 21–34.
18. J. Wang, B. Zhang, Z. Zhong, K. Ding, A. Deng, M. Min, P. Chen, R. Ruan, *Energy Convers. Manag.* **2017**, 222–231.
19. X. Hu, M. Gholizadeh, *J. Energy Chem.* **2019**, 109–143.