



AVALIAÇÃO TERMOANALÍTICA DE DIFERENTES ESPÉCIES DE MICROALGAS COMO FERRAMENTA PARA A SELEÇÃO DE BIOMASSAS COM POTENCIAL ENERGÉTICO

Níckolas A. B. Bento^{1,*}; Walter C. C. Bigui²; Débora P. Araújo³; Paulo S. S. Porto^{1,4}

¹ Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo.

² Programa de Pós-graduação em Química, Universidade Federal do Espírito Santo.

³ Departamento de Ciências Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo.

⁴ Departamento de Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal do Espírito Santo.

*e-mail: nicholas.berger@hotmail.com.

Palavras-Chave: Conversão termoquímica, Cinética térmica, Biocombustíveis.

Introdução

As microalgas têm despertado crescente interesse como uma das principais matérias-primas para a produção de biocombustíveis de terceira geração, devido à elevada eficiência fotossintética, ao rápido crescimento, à alta produtividade de biomassa e à capacidade de acumular lipídios, carboidratos e proteínas de interesse energético. Além disso, apresentam vantagens em relação às culturas oleaginosas convencionais, pois não competem diretamente com terras agrícolas, podem ser cultivadas em águas residuais ou salinas e ainda contribuem para a captura de dióxido de carbono. Essas características que reforçam seu potencial no contexto da transição energética e da bioeconomia sustentável (Sarwer et al., 2022; Wang et al., 2024).

Entretanto, o potencial energético das microalgas depende não apenas da quantidade de biomassa produzida, mas também de sua composição. A eficiência da conversão energética da biomassa microalgal está diretamente relacionada às suas propriedades físico-químicas da biomassa, uma vez que diferenças na composição bioquímica influenciam a estabilidade térmica, a cinética de degradação e o rendimento de processos termoquímicos, como combustão, pirólise, gaseificação e liquefação hidrotérmica (Arif et al., 2021; Krishnan et al., 2022). Nesse contexto, a caracterização termoanalítica torna-se uma etapa importante para compreender o comportamento da biomassa durante o aquecimento e fornecer informações que auxiliem na seleção de espécies com maior potencial para aplicações bioenergéticas.

Para essa finalidade, a análise termogravimétrica (TGA) e sua derivada (DTG) permitem avaliar as etapas de degradação térmica, a estabilidade dos materiais e a formação de resíduos. De forma complementar, a determinação da energia de ativação por modelos cinéticos fornece informações sobre a resistência da biomassa à decomposição térmica, enquanto a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) possibilita identificar os principais grupos funcionais presentes na biomassa e relacionar suas características estruturais



ao comportamento observado durante a degradação térmica. A utilização integrada dessas técnicas amplia a compreensão das propriedades energéticas das biomassas microalgais (Arif et al., 2021; Jacinto et al., 2023).

Estudos recentes demonstram a contribuição dessa abordagem integrada para a avaliação do potencial energético de microalgas. Osman et al. (2025) verificaram que as análises por FTIR e TGA/DTG permitiram diferenciar *Isochrysis* sp. de *Monoraphidium* c. quanto à composição bioquímica, ao comportamento térmico e ao potencial para bioenergia. De forma semelhante, Jacinto et al. (2023) observaram que o FTIR confirmou a natureza bioquímica das biomassas, enquanto o TGA evidenciou estabilidade e degradação térmica em faixas adequadas para conversão energética, destacando *Pediastrum boryanum* e *Desmodesmus subspicatus* como espécies promissas. Em outro estudo, Zhang et al. (2021) avaliaram *Nannochloropsis oceanica* sob diferentes condições de torrefação oxidativa e inerte, usando caracterização de combustível e TG-FTIR-MS para avaliar como a biomassa muda e qual rota gera melhor combustível sólido e melhor comportamento de pirólise. Por meio da técnica TG-FTIR-MS, os autores demonstraram que as condições de torrefação influenciam significativamente a reatividade da biomassa durante a pirólise e as características do combustível sólido obtido.

Apesar dos avanços observados na caracterização termoanalítica de biomassas microalgais, ainda são pouco os estudos que utilizam de forma integrada de parâmetros bioquímicos, termoanalíticos e cinéticos como ferramenta para subsidiar a seleção de espécies com potencial energético. Além disso, estudos comparativos envolvendo diferentes espécies microalgais sob uma mesma abordagem analítica continuam sendo importantes para ampliar a compreensão acerca da influência da composição da biomassa sobre seu comportamento térmico e sua adequação aos processos de conversão termoquímica.

Nesse desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo realizar uma avaliação termoanalítica de diferentes espécies de microalgas por meio da integração das análises de FTIR, TGA/DTG e energia de ativação, utilizando essas técnicas como ferramenta para a seleção de biomassas com potencial energético. Espera-se que os resultados contribuam para demonstrar o potencial da termoanálise, como ferramenta para a seleção preliminar de biomassas microalgais destinadas à conversão energética.

Material e Métodos

Quatro espécies de microalgas (*Nannochloropsis oculata*, *Isochrysis galbana*, *Phaeodactylum tricornutum* e *Tetraselmis chuii*) foram utilizadas nesse estudo. As culturas foram obtidas junto ao Banco de Microrganismos Aidar & Kutner, do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP). As espécies foram cultivadas em meio Guillard f/2 modificado (Guillard, 1975), sob temperatura de 22 ± 2 °C, aeração contínua de $1,5 \text{ L min}^{-1}$ e intensidade luminosa de aproximadamente 3000 lúmens. Após o período de cultivo, a biomassa



foi recuperada por centrifugação (6000 rpm, 4 min), seca em estufa com circulação forçada de ar a 40 °C até massa constante e armazenada para posterior caracterização.

A caracterização estrutural da biomassa foi realizada por FTIR, empregando a região espectral entre 4000 e 400 cm⁻¹. Os espectros foram utilizados para identificar os principais grupos funcionais associados aos constituintes orgânicos das microalgas e auxiliar na interpretação das diferenças estruturais entre as espécies (Daniyan et al., 2019; Verma, Sahu e Almutairi, 2024).

As análises termogravimétricas (TGA) foram realizadas em equipamento DTG-60 (Shimadzu), utilizando aproximadamente 15 mg de biomassa em cadinhos de platina, sob atmosfera inerte de nitrogênio. Os ensaios foram conduzidos na faixa de temperatura de 25 a 800 °C, empregando taxa de aquecimento constante de 10, 20 e 30 °C min⁻¹.

A energia de ativação (E_a) foi estimada pelo método de Kissinger (Vyazovkin, 2020), que relaciona a taxa de aquecimento (β) e a temperatura correspondente à máxima taxa de degradação (T_{max}), conforme apresentado na Equação (1):

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_{max}^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{E_a}\right) - \frac{E_a}{RT_{max}} \quad (1)$$

em que β representa a taxa de aquecimento (K·min⁻¹), T_{max} a temperatura de máxima degradação (K), A o fator pré-exponencial, R a constante universal dos gases (8,314 J·mol⁻¹·K⁻¹) e E_a a energia de ativação (J·mol⁻¹). Os valores de E_a foram obtidos a partir da inclinação da reta do gráfico $\ln(\beta/T_{max}^2)$ em função de $1/T_{max}$, e recomendado pelo ICTAC para estudos cinéticos de decomposição térmica.

Os parâmetros obtidos por FTIR, TGA/DTG e análise cinética foram avaliados de forma integrada, visando identificar diferenças estruturais e térmicas entre as espécies e seu potencial para aplicações em processos de conversão energética.

Resultados e Discussão

As micrografias apresentadas na Figura 1 evidenciam diferenças morfológicas entre as espécies avaliadas. Enquanto a *N. oculata* apresenta células esféricas, *P. tricornutum* possui formas fusiformes e *I. galbana* e *T. chuii* apresentam organismos flagelados. Essas diferenças refletem características fisiológicas e bioquímicas distintas que podem influenciar o comportamento térmico observado nas análises seguintes.

Os espectros FTIR das quatro espécies de microalgas (Figura 2) evidenciaram a presença de grupos funcionais característicos de biomassas microalgais. Foram identificadas bandas na região de 3200–3400 cm⁻¹, atribuídas ao estiramento O–H e N–H, associadas a proteínas, carboidratos e água adsorvida. Adicionalmente, bandas entre 2920 e 2850 cm⁻¹ foram



atribuídas ao estiramento C–H de cadeias alifáticas, indicando a presença de compostos lipídicos.

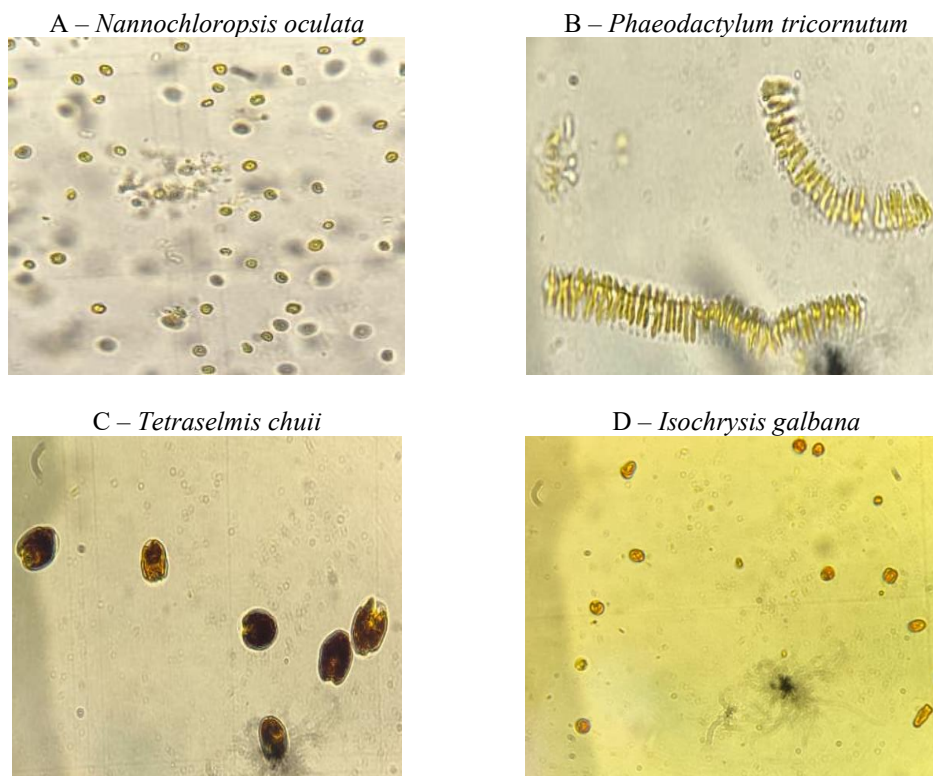


Figura 1 - Fotografia das microalgas estudadas.

A região compreendida entre 1700 e 1750 cm^{-1} apresentou bandas atribuídas ao estiramento C=O de grupos ésteres, frequentemente associados a lipídios, enquanto as bandas observadas em aproximadamente 1650 e 1540 cm^{-1} foram relacionadas às vibrações de Amida I e Amida II, características de constituintes proteicos. Na região entre 1000 e 1200 cm^{-1} , foram identificadas bandas atribuídas às ligações C–O e C–O–C, indicativas da presença de polissacarídeos.

Entre as espécies avaliadas, *Phaeodactylum tricornutum* apresentou as bandas mais intensas na região de 3200–3400 cm^{-1} e entre 1500–1750 cm^{-1} , sugerindo diferenças composicionais em relação às demais biomassas. Por outro lado, *Nannochloropsis oculata* apresentou bandas mais pronunciadas na região associada aos grupos carbonílicos, enquanto *Isochrysis galbana* e *Tetraselmis chuii* exibiram perfis intermediários. Essas diferenças estruturais observadas por FTIR corroboram a hipótese de que variações na composição da biomassa podem influenciar o comportamento térmico das espécies, sendo posteriormente investigadas por meio das análises de TGA/DTG e energia de ativação.

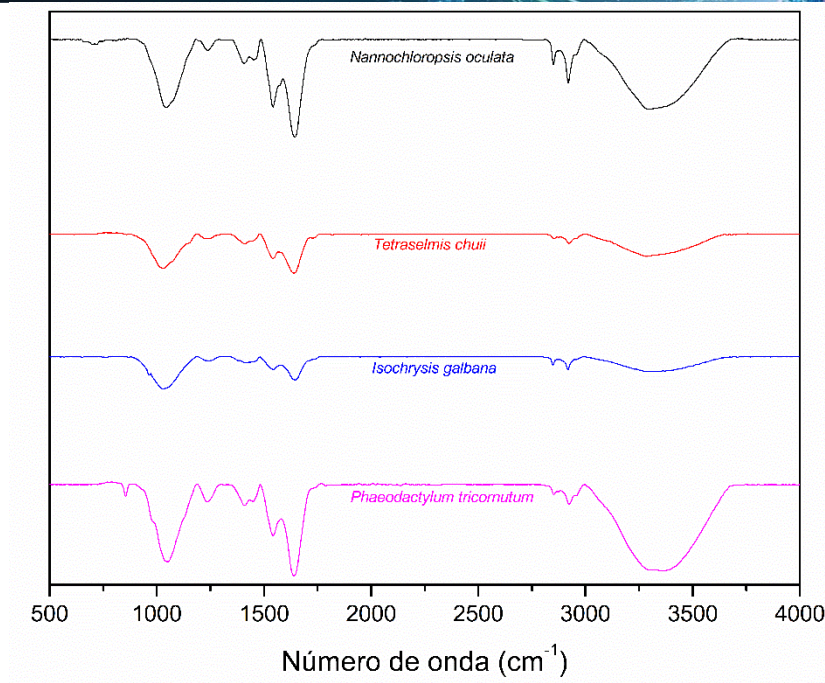


Figura 2 - Espectros de FTIR das espécies de microalgas avaliadas neste estudo.

As Figura 3 apresenta as curvas termogravimétricas (TGA) (Figura 3A) e suas respectivas derivadas (DTG) (Figura 3B) das espécies *Nannochloropsis oculata*, *Isochrysis galbana*, *Phaeodactylum tricornutum* e *Tetraselmis chuii*. Em todas as biomassas foram observadas três etapas principais de degradação térmica: a primeira, compreendida entre 25 e 150 °C, atribuída predominantemente à remoção de água adsorvida e compostos voláteis; a segunda, entre aproximadamente 150 e 400 °C, correspondente à degradação dos principais constituintes orgânicos da biomassa; e a terceira, acima de 400 °C, associada à decomposição de estruturas mais resistentes e à formação do resíduo carbonáceo.

Conforme observado na Figura 3A, as espécies apresentaram comportamentos térmicos distintos ao longo do aquecimento. *Nannochloropsis oculata* apresentou a maior perda de massa na principal etapa de degradação, resultando no menor teor residual ao final da análise (~30%), sugerindo maior susceptibilidade à conversão térmica. Por outro lado, *Isochrysis galbana*, *Phaeodactylum tricornutum* e *Tetraselmis chuii* apresentaram perfis semelhantes, com resíduos finais superiores, indicando maior estabilidade térmica relativa.

As curvas DTG (Figura 3B) permitiram identificar as temperaturas correspondentes às máximas taxas de degradação das biomassas. Observou-se que *Nannochloropsis oculata* e *Phaeodactylum tricornutum* apresentaram os picos mais pronunciados na faixa de 300–400 °C, evidenciando maior intensidade do processo de decomposição térmica nessa região. Em contrapartida, *Tetraselmis chuii* apresentou um evento mais intenso em temperaturas inferiores a 100 °C, indicando maior contribuição de umidade residual e compostos voláteis. *Isochrysis*

galbana apresentou comportamento intermediário, caracterizado por uma distribuição mais uniforme dos eventos de degradação ao longo da faixa de temperatura avaliada.

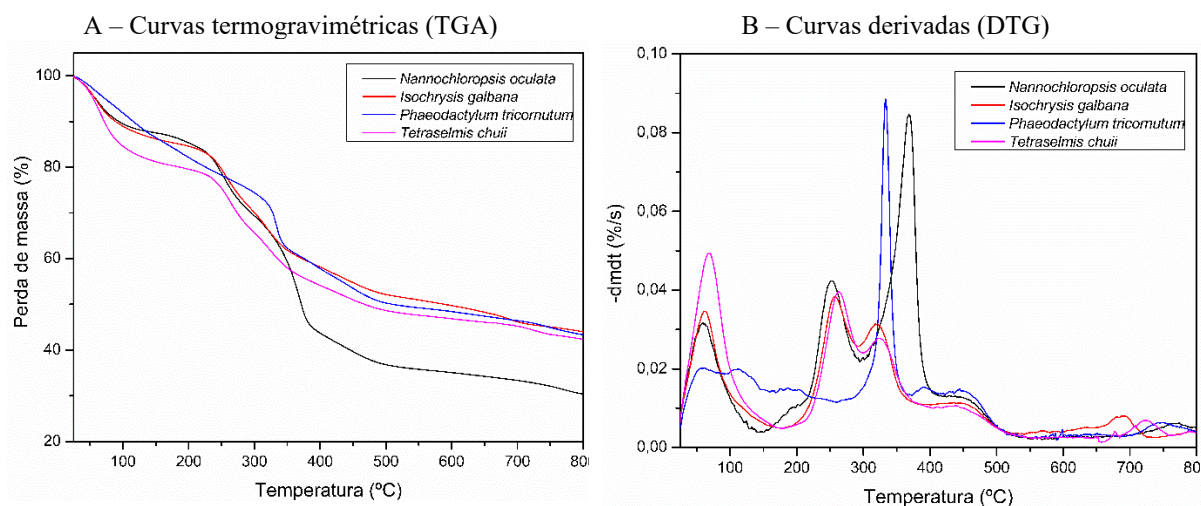


Figura 3 - (A) Curvas termogravimétricas (TGA) e (B) curvas derivadas (DTG) das biomassas de *Nannochloropsis oculata*, *Isochrysis galbana*, *Phaeodactylum tricornutum* e *Tetraselmis chuii*.

As curvas DTG (Figura 3B) permitiram identificar as temperaturas correspondentes às máximas taxas de degradação das biomassas. Observou-se que *Nannochloropsis oculata* e *Phaeodactylum tricornutum* apresentaram os picos mais pronunciados na faixa de 300–400 °C, evidenciando maior intensidade do processo de decomposição térmica nessa região. Em contrapartida, *Tetraselmis chuii* apresentou um evento mais intenso em temperaturas inferiores a 100 °C, indicando maior contribuição de umidade residual e compostos voláteis. *Isochrysis galbana* apresentou comportamento intermediário, caracterizado por uma distribuição mais uniforme dos eventos de degradação ao longo da faixa de temperatura avaliada.

As diferenças observadas nas curvas TGA/DTG corroboram os resultados obtidos por FTIR (Figura 2), que evidenciaram variações estruturais entre as biomassas. Em particular, as diferenças na intensidade das bandas associadas a grupos funcionais orgânicos sugerem que a composição das espécies influencia diretamente sua estabilidade térmica e seu comportamento durante a decomposição. De maneira geral, os resultados demonstram que as técnicas de TGA e DTG constituem ferramentas eficazes para a diferenciação de biomassas microalgais, permitindo identificar espécies com características mais favoráveis para aplicações em processos de conversão energética.

Os valores de energia de ativação apresentados na Tabela 1 evidenciam diferenças significativas entre as espécies de microalgas avaliadas, indicando distintos níveis de resistência à degradação térmica. Entre as monoculturas, *Phaeodactylum tricornutum* (1269,5 kJ·mol⁻¹) e *Isochrysis galbana* (1205,0 kJ·mol⁻¹) apresentaram os maiores valores de energia de ativação, sugerindo maior estabilidade térmica e maior demanda energética para o início do processo de decomposição.



Tabela 1 - Energia de ativação determinada pelo método de Kissinger.

	Experimento	Energia de ativação (kJ.mol ⁻¹)
1	<i>Nannochloropsis oculata</i>	525,0
2	<i>Isochrysis galbana</i>	1205,0
3	<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	1269,5
4	<i>Tetraselmis chuii</i>	405,1

Em contrapartida, *Nannochloropsis oculata* apresentou valor intermediário (525,0 kJ.mol⁻¹), enquanto *Tetraselmis chuii* exibiu a menor energia de ativação (405,1 kJ.mol⁻¹), indicando maior susceptibilidade à degradação térmica. Esses resultados corroboram as diferenças observadas nas curvas TGA/DTG (Figura 3), nas quais as espécies apresentaram distintos perfis de perda de massa e temperaturas de máxima degradação.

De maneira geral, os resultados demonstram que a energia de ativação constitui um parâmetro cinético relevante para a avaliação do comportamento termoanalítico de biomassas microalgais, permitindo distinguir espécies com diferentes graus de estabilidade térmica. Assim, a integração entre FTIR, TGA/DTG e parâmetros cinéticos reforça o potencial da termoanálise como ferramenta para a seleção preliminar de microalgas destinadas a aplicações em processos de conversão energética.

Em conjunto, os resultados obtidos demonstram que diferenças estruturais identificadas por FTIR refletem-se diretamente no comportamento térmico e cinético das espécies avaliadas. A integração entre FTIR, TGA/DTG e energia de ativação permitiu distinguir biomassas com diferentes níveis de estabilidade térmica, evidenciando o potencial da termoanálise como ferramenta para a seleção preliminar de microalgas destinadas a aplicações em processos de conversão energética.

Conclusões

Os resultados demonstraram que as quatro espécies de microalgas avaliadas apresentam diferenças significativas em suas características estruturais, térmicas e cinéticas. As análises de FTIR permitiram identificar grupos funcionais característicos das biomassas microalgais, enquanto as curvas TGA/DTG evidenciaram distintos perfis de degradação térmica. Adicionalmente, a determinação da energia de ativação pelo método de Kissinger possibilitou comparar a estabilidade térmica das espécies, destacando *Phaeodactylum tricornutum* e *Isochrysis galbana* como as biomassas mais resistentes à decomposição térmica. Dessa forma, a integração das técnicas empregadas demonstrou ser uma abordagem eficiente para a seleção preliminar de microalgas com potencial para aplicações em processos de conversão energética, corroborando o uso da termoanálise como ferramenta de apoio ao desenvolvimento de biocombustíveis de terceira geração.



Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES, à FAPES, ao Laboratório LACAFIMA e à UFES.

Referências

- ARIF, M.; LI, Y.; EL-DALATONY, M. M.; ZHANG, C.; LI, X.; SALAMA, E. S. A Complete Characterization of Microalgal Biomass Through FTIR/TGA/CHNS Analysis: An Approach for Biofuel Generation and Nutrients Removal. *Renew. Energy* 163, 1973–1982, 2021.
- DANIYAN, I. A.; BELLO, E. I.; OGEDENGBE, T. I.; MOGAJI, P. B. Gas Chromatography and Fourier Transform Infrared Analysis of Biodiesel from Used and Unused Palm Olein Oil. *Int. J. Eng. Res. Afr.* 42, 47–64, 2019.
- GUILLARD, R. R. L. Culture of Phytoplankton for Feeding Marine Invertebrates. In: SMITH, W. L.; CHANLEY, M. H. (Eds.). *Culture of Marine Invertebrate Animals*. New York: Plenum Press, p. 29–60, 1975.
- JACINTO, G. S. S.; CRUZ, G.; CABRAL, A. A.; BEZERRA, G. V. P.; PEÑA GARCIA, R. R.; MAGALHÃES, U. N.; GOMES, W. C. Biotechnological Investigation of *Pediastrum boryanum* and *Desmodesmus subspicatus* Microalgae Species for a Potential Application in Bioenergy. *Algal Res.* 75, 103266, 2023.
- KRISHNAN, R. Y.; MANIKANDAN, S.; SUBBAIYA, R.; KIM, W.; KARMEGAM, N.; GOVARTHANAN, M. Advanced Thermochemical Conversion of Algal Biomass to Liquid and Gaseous Biofuels: A Comprehensive Review of Recent Advances. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 52, 102211, 2022.
- OSMAN, N. B.; MOHD AMIN, U. S. B.; PATRICK, D. O.; BADIR NOON ZAMAN, N. A. B.; SAADON, S. Z. A. H.; YUSUP, S.; YAHYA, L. Pyrolysis and Kinetic Analysis of Marine (*Isochrysis* sp.) and Freshwater (*Monoraphidium* c.) Microalgae. *Energy Convers. Manag.* X 26, 100904, 2025.
- SARWER, A.; HAMED, S. M.; OSMAN, A. I.; JAMIL, F.; AL-MUHTASEB, A. H.; ALHAJERI, N. S.; ROONEY, D. W. Algal Biomass Valorization for Biofuel Production and Carbon Sequestration: A Review. *Environ. Chem. Lett.* 20(5), 2797–2851, 2022.
- VERMA, S.; SAHU, D.; ALMUTAIRI, B. O. Production and Characterization of Biodiesel Fuel Produced from Third-Generation Feedstock. *Front. Mater.* 11, 1454120, 2024.
- VYAZOVKIN, S. Kissinger Method in Kinetics of Materials: Things to Beware and Be Aware of. *Molecules* 25(12), 2813, 2020.
- WANG, M.; YE, X.; BI, H.; SHEN, Z. Microalgae Biofuels: Illuminating the Path to a Sustainable Future Amidst Challenges and Opportunities. *Biotechnol. Biofuels Bioprod.* 17(1), 10, 2024.
- ZHANG, C.; HO, S. H.; CHEN, W. H.; WANG, R. Comparative Indexes, Fuel Characterization and Thermogravimetric-Fourier Transform Infrared Spectrometer-Mass Spectrogram (TG-FTIR-MS) Analysis of *Nannochloropsis oceanica* Under Oxidative and Inert Torrefaction. *Energy* 230, 120824, 2021.