



**1º Encontro Interdisciplinar em Energia, Programa de Pós-graduação em Energia, Ufes**



**Pirólise catalítica da casca de café: estudo preliminar do rendimento líquido em diferentes condições operacionais**

*Catalytic pyrolysis of coffee husks: preliminary study of liquid yield under different operational conditions*

Talita Alves de Carvalho Tones<sup>1</sup>, Andressa Alves da Silva<sup>2</sup>, Érica Victor de Faria<sup>3</sup> Thiago Padovani Xavier<sup>4</sup> Vinícius Barroso Soares<sup>5</sup>, Taisa Shimosakai de Lira<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup> Aluno do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

<sup>2</sup> Aluno do Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

<sup>3</sup> Pós-doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

<sup>4</sup> Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

<sup>5</sup> Professor do Departamento de Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

\*Autor para correspondência, E-mail: taisa.lira@ufes.br

**Resumo:** Resíduos agroindustriais lignocelulósicos, como a casca de café, apresentam potencial para a produção de biocombustíveis via pirólise catalítica. Este estudo teve como objetivo caracterizar essa biomassa e avaliar o rendimento líquido da pirólise catalítica *in situ* em reator de leito fixo. A casca de café foi submetida a análises físico-químicas e termogravimétricas. Os ensaios foram realizados em reator tubular sob atmosfera inerte de nitrogênio, com duas concentrações de catalisador (3% e 17%) e duas temperaturas (480°C e 640°C). A biomassa apresentou baixo teor de umidade e elevado teor de voláteis, indicando bom potencial energético. A maior produção de líquido (49%) foi obtida a 480°C com 17% de catalisador, enquanto a 640°C, a concentração de 3% resultou em rendimento superior (45%), provavelmente devido à intensificação de reações secundárias em temperaturas mais elevadas.

**Palavras-chave:** Desoxigenação Catalítica; Biomassa lignocelulósica; Conversão termoquímica; Bioenergia sustentável; Melhoramento catalítico.

**Abstract:** Lignocellulosic agro-industrial residues, such as coffee husks, exhibit promising potential for biofuel production via catalytic pyrolysis. This study aimed to characterize this biomass and evaluate the liquid yield from *in situ* catalytic pyrolysis in a fixed-bed reactor. The coffee husk was subjected to physicochemical and thermogravimetric analyses. Pyrolysis experiments were conducted in a tubular quartz reactor under an inert nitrogen atmosphere, using two catalyst concentrations (3% and 17%) and two reaction temperatures (480 °C and 640 °C). The biomass showed low moisture content and high volatile matter, indicating favorable energy potential. The highest bio-oil yield (49%) was obtained at 480 °C with 17% catalyst loading, whereas at 640 °C, the 3% concentration resulted in a superior yield (45%), likely due to the intensification of secondary reactions at higher temperatures.

**Keywords:** Catalytic deoxygenation; Lignocellulosic biomass; Thermochemical conversion; Sustainable bioenergy; Catalytic upgrading.

## 1 Introdução

O uso intensivo de combustíveis fósseis tem contribuído para o aumento das emissões de gases de efeito estufa e para a intensificação das mudanças climáticas, reforçando a necessidade de alternativas energéticas sustentáveis (Setter et al., 2020). Nesse cenário, o aproveitamento de resíduos agroindustriais lignocelulósicos, como a casca de café, apresenta-se como uma opção promissora para a produção de biocombustíveis.

A pirólise, embora seja uma rota consolidada para a conversão de biomassa, apresenta limitações relacionadas ao alto teor de oxigênio dos produtos, em especial o bio-óleo. Nesse contexto, a pirólise catalítica surge como alternativa eficiente, capaz de reduzir compostos oxigenados e melhorar a qualidade do bio-óleo por meio da ação de catalisadores, como as zeólitas naturais (Hassan et al., 2020; Wang et al., 2018; Shafaghat et al., 2019). Sua aplicação em resíduos de café ainda é pouco explorada, sobretudo quanto às diferentes configurações reacionais. Entre estas, destaca-se o processo *in situ*, no qual o catalisador é inserido diretamente no leito reacional, aumentando o contato entre a biomassa em decomposição e o material catalítico. Essa configuração pode intensificar reações secundárias desejáveis, reduzir compostos indesejados e melhorar o rendimento e a qualidade do bio-óleo gerado (Shafaghat et al., 2019).

O bio-óleo é o produto de maior interesse na maioria dos processos de pirólise de biomassa, por seu potencial como substituto de combustíveis fósseis e como matéria-prima para refino químico, visando a obtenção de compostos de maior valor agregado, como aromáticos (Sánchez-Borrego et al., 2021). O rendimento líquido é, portanto, um indicador fundamental da eficiência do processo, pois concentra a fração de maior relevância energética e química para a geração de combustíveis renováveis. A avaliação desse rendimento permite verificar a influência do catalisador e da configuração reacional sobre a quantidade e a qualidade dos produtos gerados, fornecendo subsídios para a otimização do processo e sua aplicação em escala industrial.

Para compreender seu desempenho e orientar estratégias de conversão mais eficientes, é essencial caracterizar previamente a biomassa. Essa etapa permite avaliar seu potencial energético com base em propriedades físico-químicas que influenciam diretamente sua conversão em produtos de maior valor agregado. As análises imediata e termogravimétrica (TG) fornecem informações sobre composição química, teores de cinzas, voláteis e carbono fixo, além do perfil de degradação térmica (Basu, 2010; David et al., 2021).

A análise imediata permite estimar a reatividade térmica da biomassa, visto que o teor de voláteis influencia o rendimento líquido e o teor de cinzas pode atuar como catalisador indesejado durante o processo. Já a curva TG fornece informações essenciais sobre as temperaturas de degradação da hemicelulose, celulose e lignina, fundamentais para a definição da faixa ótima de operação do reator (El-Sayed et al., 2024; Shakor et al., 2025).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar a casca de café por meio das análises imediata e TG, além de avaliar o rendimento líquido da pirólise catalítica *in situ* em reator de leito fixo. Este estudo preliminar visa oferecer subsídios técnicos que sirvam de base para etapas experimentais futuras voltadas ao aproveitamento energético e ao desenvolvimento de rotas termoquímicas mais eficientes.

## 2 Metodologia

Neste estudo, a biomassa utilizada foi a casca de café (*Coffea canephora* – conilon), proveniente de uma propriedade rural localizada em Nova Venécia, Espírito Santo. As amostras foram obtidas por via seca, ou seja, após o processo de secagem mecânica dos grãos. O material foi submetido a etapas de secagem (105°C por 24 horas), moagem e peneiramento, de modo a obter frações granulométricas adequadas tanto para a caracterização quanto para os experimentos de pirólise.

O catalisador utilizado neste estudo é a clinoptilolita natural, com granulometria 90–250 µm, fornecida pela empresa Celta Brasil.

Para a análise imediata, utilizaram-se partículas com granulometria inferior a 212 µm, em conformidade com a NBR 6923/1981. Para os ensaios de pirólise, foram selecionadas frações entre 1,70 e 2,00 mm, compatíveis com o uso em reatores de leito fixo.

A análise imediata da biomassa foi conduzida segundo as normas ASTM E871-82, E872-82, E1755-01 e E870-82, determinando os teores de umidade (U%), materiais voláteis (MV%), cinzas (CZ%) e carbono fixo (CF%).

A análise termogravimétrica foi realizada em equipamento DTG-60 (Shimadzu), com taxa de aquecimento de 10°C/min, da temperatura ambiente até 900°C, sob atmosfera inerte de nitrogênio (50 mL/min), utilizando cadinho de platina. Em cada ensaio, foi registrada a variação de massa em função da temperatura.

Os experimentos de pirólise catalítica *in situ* foram realizados em um reator tubular de quartzo, instalado em forno bipartido com sistema PID para controle de temperatura. O reator operou sob atmosfera inerte de nitrogênio com vazão fixa de 100 mL/min, valor que, segundo Dechao et al. (2025), garante a completa remoção de oxigênio e o adequado transporte dos voláteis até a zona catalítica.

Na configuração *in situ*, biomassa e catalisador (clinoptilolita) foram introduzidos simultaneamente no leito reacional, permitindo que a decomposição térmica e as reações catalíticas ocorressem de forma integrada. A taxa de aquecimento foi mantida constante em 50 °C/min, conforme El Bari et al. (2024), por favorecer a fragmentação térmica da biomassa e reduzir a formação de biocarvão. Com base no volume útil do reator e na densidade da casca de café, determinou-se a massa de 10,26 g de biomassa, correspondente à metade do volume reacional. As proporções de catalisador foram fixadas em 3% e 17%, valores definidos conforme faixas reportadas para pirólise catalítica com zeólitas, entre 2 e 20%. Concentrações menores permitem observar o efeito catalítico sem causar excesso de sólidos no leito reacional, enquanto valores intermediários intensificam as reações de craqueamento e desoxigenação, conforme observado por Hematkah et al. (2023) e Rehan et al. (2017).

Os ensaios foram realizados em duas temperaturas representativas do processo térmico, 480 °C e 640 °C, permitindo avaliar a influência simultânea da temperatura e da carga catalítica sobre os produtos formados. Os vapores condensáveis foram coletados em condensadores de vidro imersos em banho de gelo e, ao final de cada ensaio, o líquido foi quantificado para o cálculo do rendimento líquido.

### 3 Resultados e discussões

A Tabela 1 apresenta os resultados da análise imediata da casca de café (*Coffea canephora* – conilon) proveniente do processamento por via seca, comumente denominada palha de café. Esses parâmetros de caracterização são fundamentais para demonstrar o potencial energético e a adequação dessa biomassa a processos termoquímicos.

Tabela 1. Análise imediata da casca de café.

Parâmetro	Teor (%)	Desvio padrão
U	1,21	0,10
MV	73,96	1,20
CZ	9,54	0,25
CF	15,29	0,90

O baixo teor de umidade (1,21%) é altamente desejável em processos de conversão térmica, pois reduz o consumo energético necessário para a secagem prévia e favorece a eficiência da pirólise (Gupta et al., 2025). De modo geral, biomassas com umidade inferior a 10% são consideradas ideais para esse tipo de aplicação (Kumar et al., 2022).

O alto teor de voláteis (73,96%) reflete a elevada fração de compostos orgânicos que se decompõem termicamente, contribuindo diretamente para a formação e rendimento de bio-óleo (Gupta et al., 2025; El-Sayed et al., 2024). Esse comportamento é semelhante ao observado em outras biomassas lignocelulósicas utilizadas em processos de pirólise, como bagaço de cana e casca de arroz (Dias et al., 2025; Tian et al., 2021).

O teor de cinzas (9,54%), embora moderado, merece atenção especial, pois pode influenciar reações secundárias indesejadas durante a pirólise. Certos minerais presentes nas cinzas podem atuar como catalisadores naturais, afetando a composição e a estabilidade do bio-óleo, além de contribuir para o acúmulo de depósitos no interior do reator (Gupta et al., 2025; Chan et al., 2014). Ainda assim, esse teor está dentro de limites aceitáveis para aplicações energéticas (El-Sayed et al., 2024).

O carbono fixo (15,29%) indica a fração sólida remanescente após a liberação dos voláteis, associada à formação de biocarvão (El-Sayed et al., 2024; Shakor et al., 2025). Esse valor é compatível com biomassas lignocelulósicas que apresentam bom equilíbrio entre produção de bio-óleo e de biocarvão, indicando viabilidade energética e estabilidade térmica adequadas (Gupta et al., 2025; Xu et al., 2025).

A casca de café, portanto, se posiciona como uma biomassa promissora para aplicações termoquímicas, apresentando propriedades favoráveis à produção eficiente de bio-óleo e ao aproveitamento do biocarvão como coproduto energético.

A Figura 1 apresenta os perfis de perda de massa (TG) e de taxa de perda de massa ( $-dm/dt$ ) da casca de café, em função da temperatura. Esse comportamento é característico de biomassas lignocelulósicas de origem agroindustrial, destacando o potencial de aproveitamento da casca de café em processos termoquímicos como a pirólise (Bridgwater, 2012).

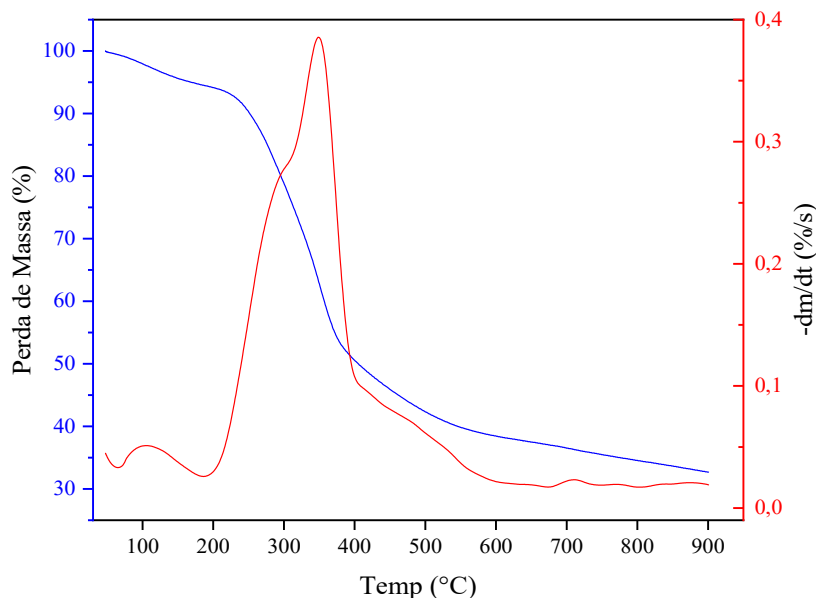


Figura 1. Percentual de perda de massa (TG) e de taxa de perda de massa (DTG) em função da temperatura.

Observa-se uma perda de massa total de aproximadamente 65%, com a identificação das três principais etapas de decomposição térmica da biomassa. Na primeira etapa (até cerca de 150°C), ocorre uma pequena perda de massa, em torno de 5%, atribuída à evaporação da água livre e de compostos voláteis leves fisicamente adsorvidos na biomassa.

A segunda etapa ocorre entre 200°C e 400°C, sendo considerada a principal fase de decomposição térmica da biomassa, relacionada à decomposição da hemicelulose e da celulose, refletindo o comportamento típico de degradação de biomassas lignocelulósicas (Yang et al., 2007; Hassan et al., 2020). A curva da taxa de perda de massa ( $-dm/dt$ ) reforça essa interpretação, apresentando um pico máximo (cerca de 0,38 %/s) em aproximadamente 350 °C, indicando intensa atividade térmica associada à decomposição da celulose.

A terceira etapa, com início em torno de 400°C e estendendo-se até aproximadamente 600°C, está associada à degradação progressiva da lignina. Segundo Yang et al. (2007), a lignina é um componente da biomassa que apresenta uma maior estabilidade térmica. Acima de 600°C, os resultados revelam uma perda de massa residual de baixa intensidade, indicando que a amostra de casca de café atingiu um estado de estabilização térmica, característico da carbonização final do material.

Os ensaios de pirólise catalítica *in situ* foram realizados em duas condições de concentração de catalisador (3% e 17%) e em duas temperaturas distintas (480°C e 640°C), permitindo avaliar a influência desses fatores no rendimento líquido (Figura 2).

Os resultados evidenciaram variações significativas no rendimento líquido em função da temperatura e da concentração de catalisador. Quantitativamente, observou-se que para a menor concentração de catalisador (3%), o rendimento aumentou de aproximadamente 41% (a 480°C) para cerca de 45% (a 640°C). Em contraste, a condição de maior concentração de catalisador (17%) resultou no rendimento máximo de 49% a 480°C, que foi reduzido para 43,5% ao elevar-se a temperatura para 640°C. Essa divergência de comportamento sinaliza uma interação significativa entre os parâmetros (temperatura e concentração do catalisador), conforme observado em estudos prévios como o de Chan et al. (2014), que corroboram essa observação, demonstrando a influência da interação desses dois fatores.

A menor concentração de catalisador (3%) foi favorecida pela elevação da temperatura devido à intensificação da fragmentação térmica da biomassa, resultando em maior liberação de voláteis condensáveis. Já na condição com maior concentração (17%), observou-se comportamento inverso. A

480°C, a presença mais intensa do catalisador proporcionou o maior rendimento entre todas as condições (~49%), sugerindo que, em temperaturas mais brandas, a ação catalítica favorece a desoxigenação e a estabilização dos vapores. Contudo, a 640 °C, essa mesma concentração promoveu a intensificação de reações secundárias, como craqueamento e gaseificação, que desviaram parte dos compostos da fase líquida para a formação de gases leves, resultando na queda observada no rendimento. Esse comportamento está em consonância com estudos que investigam a influência da carga catalítica em processos de pirólise (Gupta et al., 2025).

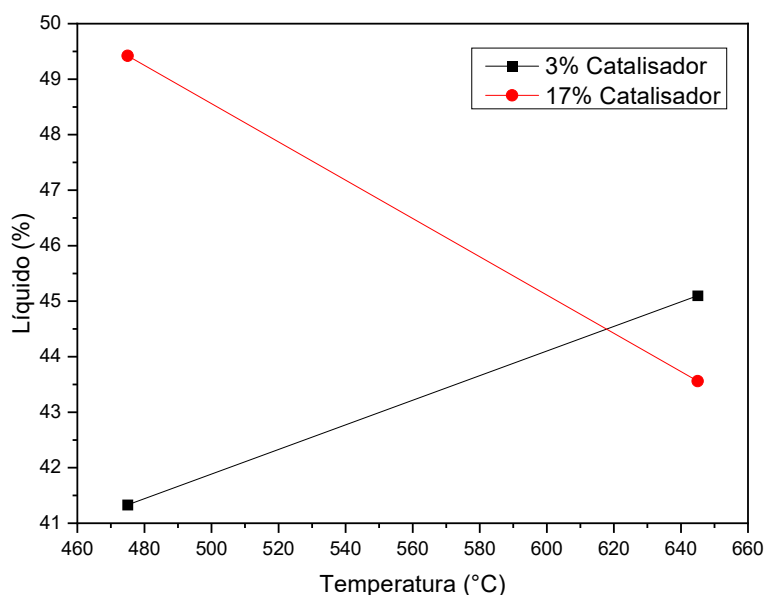


Figura 2. Rendimento líquido em função da temperatura para diferentes concentrações de catalisador.

O fenômeno de inversão no comportamento das curvas de rendimento líquido (Figura 2) é a principal evidência da complexa interação entre temperatura e catalisador. Em temperaturas mais baixas, a otimização catalítica prevalece, mas em temperaturas elevadas, a taxa de decomposição térmica e a alta atividade catalítica (e as reações secundárias) competem, resultando em menor produção líquida. Esse comportamento evidencia a interação entre os fatores avaliados e está em consonância com estudos prévios sobre pirólise catalítica de biomassa, que relatam que concentrações mais elevadas de catalisador podem ser vantajosas em condições de reação brandas, mas tendem a alterar os mecanismos de conversão térmica e intensificar reações indesejadas em temperaturas mais altas, reduzindo a fração líquida recuperada.

Esses resultados indicam o potencial da casca de café como biomassa promissora para aproveitamento energético sustentável. Além disso, reforçam que a otimização do rendimento líquido depende do equilíbrio entre carga catalítica e temperatura, fornecendo informações importantes para o planejamento de estratégias termoquímicas mais eficientes para a pirólise de biomassa. De maneira integrada, os achados deste estudo contribuem para orientar futuras otimizações em processos de pirólise, incluindo a maximização do bio-óleo, reforçando a relevância da casca de café para processos termoquímicos sustentáveis e de alto valor energético.

## 4 Conclusões

A casca de café demonstrou potencial energético significativo, conforme evidenciado pelas análises imediata e termogravimétrica, que indicaram baixos teores de umidade e elevada fração volátil. Nos ensaios de pirólise catalítica *in situ*, verificou-se que tanto a temperatura quanto a concentração do catalisador influenciaram diretamente o rendimento líquido. A concentração de 17% se mostrou mais favorável a 480°C, enquanto a 640°C, a condição com 3% de catalisador apresentou desempenho superior, atribuído à intensificação de reações secundárias em temperaturas mais elevadas.

O presente estudo fornece informações consistentes sobre a caracterização físico-química da casca de café, além de demonstrar experimentalmente o efeito combinado entre temperatura e concentração catalítica, ressaltando a importância da otimização conjunta desses parâmetros. Os resultados obtidos reforçam o potencial da casca de café como biomassa alternativa promissora, oferecendo subsídios técnicos para o aprimoramento de processos termoquímicos mais eficientes, sustentáveis e economicamente viáveis.

## Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

## Referências bibliográficas

- Basu, P (2010) *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Academic Press.
- Bridgwater, AV (2012) ‘Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading,’ *Biomass and Bioenergy*, 38, pp. 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Chan, YH, Dang, KV, Yusup, S, Lim, MT, Zain, AM and Uemura, Y (2014) ‘Studies on catalytic pyrolysis of empty fruit bunch (EFB) using Taguchi’s L9 Orthogonal Array,’ *Journal of the Energy Institute*, 87(3), pp. 227–234. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.03.008>
- David, GF et al. (2021) ‘Fast pyrolysis as a tool for obtaining levoglucosan after pretreatment of biomass with niobium catalysts,’ *Waste Management*, 126, pp. 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.016>
- Dias, S de A, Toscano Miranda, N, Maciel Filho, R, Sphaier, LA and Castillo Santiago, Y (2025) ‘Sugarcane Bagasse Fast Pyrolysis: Pilot Plant Challenges,’ *Processes*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/pr13072116>
- Dechao, W et al. (2025) ‘Ex-situ combined with in-situ catalytic pyrolysis: A strategic approach to enhancing furans production from biomass,’ *Renewable Energy*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122697>
- El Bari, H et al. (2024) ‘Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass: Recent advances and comprehensive overview,’ *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106390>
- El-Sayed, SA, Khass, TM and Mostafa, ME (2024) ‘Thermal degradation behaviour and chemical kinetic characteristics of biomass pyrolysis using TG/DTG/DTA techniques,’ *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(15), pp. 17779–17803. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-03926-2>
- Gupta, R et al. (2025) ‘Sustainable valorization of bamboo sawdust via catalytic pyrolysis into renewable liquid fuel and value-added chemicals,’ *Engineering Research Express*, 7(1). <https://doi.org/10.1088/2631-8695/adc0e8>
- Hassan, NS, Jalil, AA, Hitam, CNC, Vo, DVN and Nabgan, W (2020) ‘Biofuels and renewable chemicals production by catalytic pyrolysis of cellulose: a review,’ *Environmental Chemistry Letters*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 1625–1648. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01040-7>
- Hematkhah, R, Majidian, N, Hallajisani, A and Samipoorgiri, M (2023) ‘Investigation of catalytic pyrolysis of spirulina for bio-oil production,’ *Arabian Journal of Chemistry*, 16(5). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104691>
- Kumar Mishra, R (2022) ‘Pyrolysis of low-value waste switchgrass: Physicochemical characterization, kinetic investigation, and online characterization of hot pyrolysis vapours,’ *Bioresource Technology*, 347. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126720>
- Rehan, M et al. (2017) ‘Effect of zeolite catalysts on pyrolysis liquid oil,’ *International Biodeterioration and Biodegradation*, 119, pp. 162–175. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.11.015>

- Sánchez-Borrego, FJ, Álvarez-Mateos, P and García-Martín, JF (2021) ‘Biodiesel and other value-added products from bio-oil obtained from agrifood waste,’ *Processes*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/pr9050797>
- Setter, C et al. (2020) ‘Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: Characterization of the solid and liquid fractions,’ *Fuel*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116420>
- Shafaghat, H et al. (2019) ‘In-situ and ex-situ catalytic pyrolysis/co-pyrolysis of empty fruit bunches using mesostructured aluminosilicate catalysts,’ *Chemical Engineering Journal*, 366, pp. 330–338. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.055>
- Shakor, ZM, Tayib, YM, AbdulRazak, AA, Shnain, ZY and Al-Shafei, E (2025) ‘Thermogravimetric Analysis Integrated with Mathematical Methods and Artificial Neural Networks for Optimal Kinetic Modeling of Biomass Pyrolysis: A Review,’ *ACS Omega*. American Chemical Society, pp. 36750–36770. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c02250>
- Sheng, C and Azevedo, JLT (2005) ‘Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data,’ *Biomass and Bioenergy*, 28(5), pp. 499–507. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.008>
- Tang, X et al. (2024) ‘In-situ and ex-situ selective catalysis of biochar-based catalysts for the production of high-quality bio-oil and H<sub>2</sub>-rich gas from tobacco stem,’ *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(6). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114268>
- Tian, B, Xu, L, Jing, M, Liu, N and Tian, Y (2021) ‘A comprehensive evaluation on pyrolysis behavior, kinetics, and primary volatile formation pathways of rice husk for application to catalytic valorization,’ *Fuel Processing Technology*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106715>
- Wang, S, Persson, H, Yang, W and Jönsson, PG (2018) ‘Effect of H<sub>2</sub> as Pyrolytic Agent on the Product Distribution during Catalytic Fast Pyrolysis of Biomass Using Zeolites,’ *Energy and Fuels*, 32(8), pp. 8530–8536. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b01779>
- Xu, X, Chen, S, Wang, Y, Lv, P, Guo, W and Shu, Y (2025) ‘Investigation of the temperature influence on the catalytic hydrogenation upgrading of bio-oil using industrial nickel based catalyst RZ409,’ *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14087-9>
- Yang, H, Yan, R, Chen, H, Lee, DH and Zheng, C (2007) ‘Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis,’ *Fuel*, 86(12–13), pp. 1781–1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>