



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



Propriedades energéticas e térmicas de casca de cacau, polipropileno e clinoptilolita para co-pirólise catalítica

Energy and thermal properties of cocoa shell, polypropylene and clinoptilolite for catalytic co-pyrolysis

Vanielle Aparecida do Patrocínio Gomes¹, Germano Oliozi Marré², Érica Victor de Faria³,
Thiago Padovani Xavier⁴, Taisa Shimosakai de Lira^{4,*}

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

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

³ Pós-doutorando do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

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

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

Resumo: A pirólise, um processo termoquímico realizado em altas temperaturas e na ausência de oxigênio, é uma tecnologia promissora para a valorização de resíduos, como biomassa e plásticos, convertendo-os em produtos de alto valor como bio-óleo, gás e biocarvão. A co-pirólise consiste na conversão simultânea de diferentes resíduos, permitindo explorar efeitos sinérgicos entre biomassa e polímeros plásticos, o que pode resultar em maior rendimento energético e melhoria da qualidade dos produtos. Este estudo tem como objetivo caracterizar a casca de cacau, o polipropileno e a clinoptilolita, a fim de investigar parâmetros térmicos e energéticos que subsidiem o planejamento dos experimentos de co-pirólise catalítica. Busca-se identificar as principais faixas de degradação térmica, o potencial energético dos insumos e a estabilidade do catalisador, de modo a avaliar sinergias entre biomassa e plástico e a viabilidade da clinoptilolita como catalisador natural. A análise imediata e poder calorífico da casca de cacau, bem como a termogravimetria (TG/DTG) dos três materiais utilizados, forneceram informações essenciais sobre composição e comportamento térmico. A casca de cacau apresentou 9,03% de umidade, 65,78% de voláteis, 10,95% de cinzas e 14,24% de carbono fixo, além de PCS de 15,28 MJ/kg, valores próximos aos relatados para biomassas lignocelulósicas. As curvas TG/DTG mostraram degradação multietape da casca de cacau, monofásica do PP (400–500 °C) e elevada estabilidade da clinoptilolita até 900 °C. Os resultados servem como base para o desenvolvimento de rotas sustentáveis de valorização de resíduos e produção de energia. Palavras-chave: Análise Termogravimétrica, Biomassa Lignocelulósica, Caracterização Térmica, Co-pirólise Catalítica, Sinergia.

Abstract: Pyrolysis, a thermochemical process performed at high temperatures and in the absence of oxygen, is a promising technology for the valorization of waste materials, such as biomass and plastics, converting them into high-value products such as bio-oil, gas, and biochar. Co-pyrolysis involves the simultaneous conversion of different waste materials, allowing the exploration of synergistic effects between biomass and plastic polymers, which can result in higher energy yields and improved product quality. This study aims to characterize cocoa husks, polypropylene, and clinoptilolite in order to investigate thermal and energy parameters that support the planning of catalytic co-pyrolysis experiments. The aim is to identify the main thermal degradation ranges, the energy potential of the inputs, and the

stability of the catalyst, in order to evaluate synergies between biomass and plastic and the viability of clinoptilolite as a natural catalyst. The immediate analysis and calorific value of the cocoa shells, as well as thermogravimetry (TG/DTG) of the three materials used, provided essential information on their composition and thermal behavior. The cocoa shells presented 9.93% moisture, 65.7% volatiles, 10.94% ash, and 14.24% fixed carbon, in addition to a PCS of 15.06 MJ/kg, values close to those reported for lignocellulosic biomasses. The TG/DTG curves showed multistep degradation of the cocoa shells, single-phase degradation of PP (400–500 °C), and high stability of clinoptilolite up to 900 °C. The results serve as a basis for the development of sustainable routes for waste valorization and energy production.

Keywords: Thermogravimetric Analysis, Lignocellulosic Biomass, Thermal Characterization, Catalytic Co-pyrolysis, Synergy.

1 Introdução

A crescente demanda por alternativas energéticas sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas para a valorização de resíduos, entre as quais a pirólise se destaca pela capacidade de converter biomassa e plásticos em produtos energéticos de maior valor agregado, como bio-óleo, gás e biocarvão. Essa rota termoquímica configura-se como uma alternativa promissora, pois tem potencial para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, ao mesmo tempo em que contribui para a mitigação de impactos ambientais associados ao acúmulo de resíduos sólidos.

Nos últimos anos, a co-pirólise tem recebido atenção especial por possibilitar a conversão simultânea de diferentes tipos de resíduos, aproveitando os efeitos sinérgicos entre biomassa e polímeros plásticos. Estudos demonstram que a presença de plásticos pode aumentar o rendimento energético em relação à pirólise convencional e melhorar a qualidade do bio-óleo obtido, que se apresenta mais estável e com maior valor calorífico. Nesse contexto, enquanto a biomassa fornece oxigênio e contribui para a decomposição térmica do polímero (Rocha et al., 2020; Chang et al., 2025; Gomes et al., 2025), os polímeros plásticos, ricos em hidrocarbonetos, fornecem hidrogênio, favorecendo reações de desoxigenação, resultando na redução da acidez e aumento da estabilidade química do bio-óleo, melhorando seu valor calorífico. Esse equilíbrio entre os insumos reforça a eficiência energética do processo e favorece a utilização sustentável dos resíduos.

Além disso, o uso de catalisadores sólidos, como zeólitas naturais, tem mostrado potencial para direcionar a reação, promovendo maior seletividade para hidrocarbonetos de interesse energético (Sekyere et al., 2023; Vuppaladadiyam et al., 2023; Duanguppama et al., 2023; Gomes et al., 2025). Entre as zeólitas, a clinoptilolita destaca-se por sua disponibilidade, baixo custo e estabilidade térmica, podendo atuar como catalisador natural em sistemas de pirólise e co-pirólise (Ambrozova et al., 2017).

Apesar dos avanços, ainda são necessárias investigações preliminares voltadas à caracterização dos materiais a serem empregados na co-pirólise, a fim de compreender o comportamento térmico, a composição elementar e o potencial energético de cada insumo. Tais informações são essenciais para identificar possíveis sinergias, definir condições experimentais adequadas e avaliar a estabilidade térmica de catalisadores naturais de baixo custo.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo caracterizar a casca de cacau, o polipropileno e a clinoptilolita, com a finalidade de investigar parâmetros térmicos e energéticos que subsidiem o planejamento dos experimentos de co-pirólise catalítica. Busca-se identificar as principais faixas de degradação térmica, avaliar o potencial energético dos insumos e a viabilidade do uso da clinoptilolita como catalisador natural, contribuindo para o desenvolvimento de rotas termoquímicas sustentáveis voltadas à valorização energética de resíduos agroindustriais e plásticos.

2 Metodologia

As matérias-primas utilizadas foram a biomassa de casca de cacau (CC), o plástico polipropileno (PP) e o catalisador clinoptilolita. A biomassa foi seca a 105 °C até se obter massa constante. Tanto a biomassa quanto o plástico foram moídos utilizando um moinho de facas e peneirados para padronizar o tamanho das partículas para cada análise a ser realizada (0,212 mm – mesh 65) (NBR 6923:1981). O catalisador foi apenas peneirado sem necessidade de moagem adicional, apresentando partículas de 0,09 mm (mesh 170).

A análise imediata foi realizada para a biomassa, seguindo as normas ASTM E871-82, E872-82, E1755-01 e E870-82, determinando as frações de umidade (U%), materiais voláteis (MV%), cinzas (CZ%) e carbono fixo (CF%).

O poder calorífico superior (PCS) foi estimado para a biomassa, a partir de correlações baseadas nos resultados da análise imediata. Em que $PCS (MJ/kg) = 0,3536CF + 0,1559MV - 0,0078$, em que CZ, CF, MV e CZ estão expressos em % m/m em base seca) (Parikh et al., 2005).

A análise termogravimétrica (TGA/DTG) foi feita para a biomassa, o plástico e o catalisador em um equipamento DTG-60 (Shimadzu), com taxa de aquecimento de 10 °C/min, da temperatura ambiente até 900 °C, sob atmosfera inerte de N₂ (50 mL/min), em cadinho de platina. Em cada ensaio, registrou-se a variação de massa em função da temperatura.

3 Resultados e discussões

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos na análise imediata da casca de cacau. Essa análise fornece parâmetros fundamentais para a avaliação do potencial energético da biomassa, uma vez que o teor de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo influenciam diretamente sua degradação térmica e eficiência de conversão em processos termoquímicos.

Tabela 1. Análise imediata da casca de cacau.

Teores	(%)	Desvio Padrão (%)
U	9,029	0,06735
MV	65,782	0,015
CZ	10,945	0,00008
CF	14,244	-

A Tabela 2 traz valores correspondentes à análise imediata buscadas na literatura, em que foi possível verificar similaridades com os resultados obtidos neste trabalho.

Tabela 2. Análise imediata de matéria-prima.

Amostra	Umidade (m. %)	Cinzas (m. %)	Material volátil (m. %)	Carbono fixo (m. %)	Referência
Casca de cacau	-	6,77	70,89	22,34	(Mumbach et al., 2022)
Casca de vagem de cacau	11,07	16,24	61,73	10,96	(Adjin-Tetteh et al., 2018)
Casca de vagem de cacau	10,29	10,81	68,47	10,43	(Titiloye et al., 2013)
Casca de vagem de cacau	11,53	13,21	58,46	16,8	(Forero-Nuñez et al., 2015)

O teor de umidade (9,03%) está dentro da faixa recomendável para biomassas destinadas a processos termoquímicos, visto que valores muito elevados podem demandar maior gasto energético na etapa de secagem e reduzir a eficiência da pirólise (Martínez-Ángel et al., 2015; Yang et al., 2007). O alto teor de materiais voláteis (65,78%) indica que a casca de cacau possui boa capacidade de liberação de compostos gasosos e vapores durante a pirólise, característica favorável para a formação de bio-óleo e hidrocarbonetos leves (Martínez-Ángel et al., 2015; Yang et al., 2007; Tsai et al., 2018).

O teor de cinzas (10,95%) embora relativamente elevado em comparação a outras biomassas lignocelulósicas, está em conformidade com valores encontrados na literatura para o cacau (Tabela 2). A elevada quantidade de cinzas pode representar um desafio no processo de co-pirólise, pois a presença de minerais influencia a estabilidade térmica e pode afetar a qualidade do bio-óleo (Martínez-Ángel et al., 2015; Duanguppama et al., 2023; Tsai et al., 2018). No entanto, esses minerais também podem atuar como catalisadores naturais, favorecendo reações secundárias de craqueamento e desoxigenação que direcionam a formação de compostos de interesse energético (Rocha et al., 2020; Duanguppama et al., 2023).

O carbono fixo (14,24%) sugere a possibilidade de formação significativa de biocarvão, o que amplia o potencial de valorização da casca de cacau em rotas de aproveitamento energético e ambiental, como a produção de carvão ativado ou biocarvão para sequestro de carbono (Martínez-Ángel et al., 2015; Vuppaladadiyam et al., 2023; Tsai et al., 2018).

Esses resultados demonstram que a casca de cacau apresenta características compatíveis com o uso em processos de pirólise e co-pirólise, combinando alto teor de voláteis, quantidade moderada de carbono fixo e cinzas que podem contribuir com efeitos catalíticos durante a conversão termoquímica.

Foi calculado o valor do poder calorífico superior (PCS) da casca de cacau para evidenciar o potencial energético em processos de conversão térmica (Tabela 3). O cálculo foi realizado por meio de correlações empíricas baseadas nos resultados da análise imediata, amplamente aplicadas em estudos de pirólise e co-pirólise (Parikh et al., 2005). A Tabela 3 apresenta, para efeito de comparação, valores de PCS apresentados na literatura para a casca de cacau.

Tabela 3. PCS da casca de cacau e principais combustíveis.

Matéria-prima	PCS [MJ/kg]	Referências
Casca de cacau	15,28	Este trabalho
Casca de cacau	17,21	(Mumbach et al., 2022)
Casca de vagem de cacau	12,48	(Adjin-Tetteh et al., 2018)
Casca de vagem de cacau	17,08	(Titiloye et al., 2013)
Casca de vagem de cacau	18,10	(Forero-Nuñez et al., 2015)

O PCS da casca de cacau foi de 15,28 MJ/kg, valor compatível com os reportados na literatura para essa biomassa, que varia entre 15 e 18 MJ/kg (Martínez-Ángel et al., 2015; Hennessey-Ramos et al., 2024; Tsai et al., 2018), mas sendo possível valores menores (Adjin-Tetteh et al., 2018). Esse resultado indica que a casca de cacau apresenta menor densidade energética em comparação aos combustíveis fósseis (Gasolina = 42,5 MJ/kg e Diesel = 43,0 MJ/kg (Ahmad et al., 2015)), mas mantém viabilidade para aproveitamento termoquímico. Seu elevado teor de materiais voláteis (65,782%) favorece a liberação de gases e vapores durante a pirólise, enquanto o teor moderado de carbono fixo (14,244%) indica potencial para formação de biochar. Além disso, o conteúdo de cinzas (10,945%), embora relativamente alto, pode contribuir com efeitos catalíticos naturais, promovendo reações secundárias que melhoram a conversão térmica e a qualidade dos produtos obtidos. Assim, a combinação entre composição elementar, teor energético e comportamento térmico confirma o potencial da casca de cacau como matéria-prima sustentável para processos de pirólise.

Ressalta-se também a sinergia esperada na co-pirólise com o polipropileno (PP), que apresenta PCS geralmente superior a 40 MJ/kg (Ahmad et al., 2015), valor típico de polímeros da classe das poliolefinas, (Anuar Sharuddin et al., 2016; Lopez et al., 2017; Zhao et al., 2025), próximo ao PCS dos principais combustíveis fósseis. A comparação entre as matérias-primas evidencia sua complementaridade: enquanto a casca de cacau apresenta alto teor de oxigênio e minerais, que podem favorecer a decomposição térmica e a formação de bio-óleo mais oxigenado, além da síntese de gases como monóxido e dióxido de carbono e água provenientes de reações de craqueamento que aumentam o valor energético dos produtos, o polipropileno contribui com alto poder calorífico, elevando o rendimento energético do processo explicado pelo baixo teor de oxigênio, o que favorece reações de desoxigenação que melhoram o poder calorífico e a estabilidade do bio-óleo derivado apenas de biomassa. Essa sinergia justifica o uso combinado dos dois materiais em co-pirólise, permitindo equilibrar o desempenho energético com a qualidade dos produtos obtidos.

A Figura 1 apresenta as curvas de perda de massa (TG) em função da temperatura para a casca de cacau (preto), o polipropileno – PP (azul) e a clinoptilolita (vermelho). A Figura 2 exhibe as respectivas curvas de taxa de decomposição (DTG). Os ensaios foram conduzidos sob atmosfera inerte de N₂ (50 mL·min⁻¹), a 10 °C·min⁻¹, de temperatura ambiente a 900 °C.

Para a casca de cacau (curva preta), observa-se uma etapa inicial de perda de massa (< 150 °C), atribuída à remoção de umidade física. Em seguida, ocorrem múltiplas etapas de degradação: (i) um primeiro evento amplo entre ~200–320 °C, associado principalmente à hemicelulose, e (ii) um pico principal próximo de ~350–380 °C, característico da celulose. A lignina decompõe-se de forma mais lenta e distribuída, estendendo-se aproximadamente de ~200 até > 500–600 °C, o que explica o comportamento prolongado observado na DTG. Esses comportamentos são típicos de biomassas lignocelulósicas e estão em acordo com a literatura (Yang et al., 2007; Chen et al., 2021).

Em contraste, o PP (curva azul) apresenta perfil de decomposição térmica monofásico, com início abrupto em torno de ~400–420 °C e pico de máxima taxa próximo de ~460–480 °C na DTG, seguido de conversão praticamente completa até ~500 °C, deixando traço de resíduo. Esse comportamento, dominado

por cisão aleatória das cadeias, é consistentemente reportado para poliolefinas, refletindo o alto teor de voláteis e a baixa fração de minerais do polímero (Tomaszewska et al., 2010).

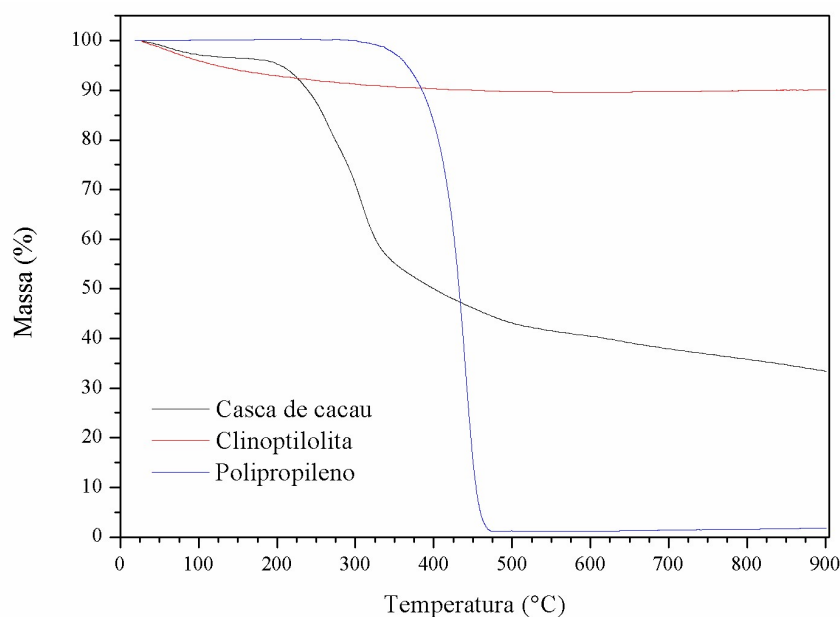


Figura 1. Percentual de perda de massa em função do aumento da temperatura.

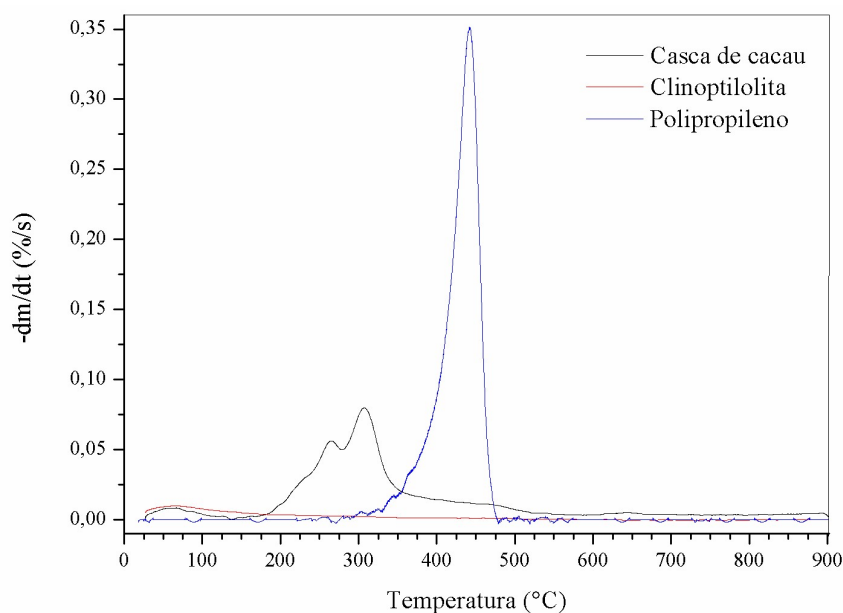


Figura 2. DTG em função da temperatura.

Por outro lado, a zeólita natural (curva vermelha) apresenta elevada estabilidade térmica: uma pequena perda inicial < 150 °C é atribuída à dessorção de água e, acima dessa faixa, variações mínimas de massa são observadas ao longo do aquecimento, mantendo cerca de ~89–90% da massa inicial a 900 °C. Esse comportamento confirma que a clinoptilolita suporta as condições operacionais da pirólise sem degradação relevante, comportamento esperado para zeólitas naturais (Król et al., 2024).

Do ponto de vista de co-pirólise, a justaposição desses perfis indica potenciais sinergias: a biomassa fornece oxigênio e espécies minerais (evidenciadas pelo resíduo/cinzas), que podem atuar como catalisadores naturais em reações secundárias, enquanto o PP contribui com alta densidade energética e decomposição rápida em uma faixa de temperatura relativamente estreita. A clinoptilolita, por sua vez, mostra-se termicamente estável em toda a janela de interesse operacional (até 900 °C), favorecendo sua utilização como catalisador sólido sem perdas massivas, o que é relevante para evitar contaminação de produtos e desativação por sinterização em temperaturas moderadas. Essas características reforçam a adequação dos materiais estudados para aplicação conjunta em processos de co-pirólise, evidenciando sua estabilidade e complementaridade térmica sob as condições avaliadas.

4 Conclusões

A caracterização da casca de cacau, do polipropileno e da clinoptilolita permitiu reunir informações fundamentais sobre composição, potencial energético e comportamento térmico dos insumos. A casca de cacau apresentou teor de umidade adequado, alto percentual de voláteis e carbono fixo, além de cinzas relativamente elevadas que, embora possam impactar a qualidade do bio-óleo, também sugerem possível atuação catalítica. O valor de PCS calculado (~15,28 MJ/kg) mostrou-se compatível com a literatura, confirmando sua viabilidade energética.

O polipropileno, por sua vez, possui elevado poder calorífico, como mostra a literatura, e perfil de degradação monofásico com conversão quase completa, reforçando sua função como reforço energético na co-pirólise. Já a clinoptilolita demonstrou alta estabilidade térmica, com perdas mínimas de massa, validando seu uso como catalisador natural sob as condições de operação do processo.

De forma integrada, os resultados indicam que a combinação entre biomassa lignocelulósica e resíduo plástico, com suporte de um catalisador natural estável, pode favorecer efeitos sinérgicos na co-pirólise, equilibrando rendimento energético, composição de produtos e sustentabilidade do processo. Além disso, o teor moderado de carbono fixo da casca de cacau sugere potencial adicional para a geração de biocarvão, contribuindo para rotas de aproveitamento ambientalmente relevante. Assim, a caracterização preliminar realizada neste estudo fornece subsídios relevantes para o planejamento de experimentos futuros e para o desenvolvimento de rotas sustentáveis de valorização de resíduos em aplicações energéticas.

Agradecimentos

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

Referências bibliográficas

- Adjin-Tetteh M, Asiedu N, Dodoo-Arhin D, Karam A and Amaniampong PN (2018) ‘Thermochemical conversion and characterization of cocoa pod husks a potential agricultural waste from Ghana’, *Industrial Crops and Products*, 119(October 2017):304–312, doi:10.1016/j.indcrop.2018.02.060.
- Ahmad I, Ismail Khan M, Khan H, Ishaq M, Tariq R, Gul K and Ahmad W (2015) ‘Pyrolysis study of polypropylene and polyethylene into premium oil products’, *International Journal of Green Energy*, 12(7):663–671, doi:10.1080/15435075.2014.880146.
- Ambrozova P, Kynicky J, Urubek T and Nguyen VD (2017) ‘Synthesis and modification of clinoptilolite’, *Molecules*, 22(7):1–13, doi:10.3390/molecules22071107.
- Anuar Sharuddin SD, Abnisa F, Wan Daud WMA and Aroua MK (2016) ‘A review on pyrolysis of plastic wastes’, *Energy Conversion and Management*, 115:308–326, doi:10.1016/j.enconman.2016.02.037.
- Chang W, Wang X, Xie X, Xing L, Li H, Liu M, Miao L and Huang Y (2025) ‘Recent progress on the synergistic preparation of liquid fuels by co-pyrolysis of lignocellulosic biomass and plastic wastes’, *Journal of the Energy Institute*, 119, doi:10.1016/j.joei.2025.102019.
- Chen Y, Wang L, Zhao M, Ma H, Chen D, Zhang Y and Zhou J (2021) ‘Comparative Study on the Pyrolysis Behaviors of Pine Cone and Pretreated Pine Cone by Using TGA-FTIR and Pyrolysis-GC/MS’, *ACS Omega*, 6(5):3490–3498, doi:10.1021/acsomega.0c04456.
- Duanguppama K, Pannucharoenwong N, Echaroj S, Pham LKH, Samart C and Rattanadecho P (2023) ‘Integrated catalytic pyrolysis and catalytic upgrading of *Leucaena leucocephala* over natural catalysts’, *Journal of the Energy Institute*, 106(December 2022):101155, doi:10.1016/j.joei.2022.101155.
- Forero-Núñez CA, Jochum J and Vargas FES (2015) ‘Effect of particle size and addition of cocoa pod husk on the properties of sawdust and coal pellets’, *Ingeniería e Investigación*, 35(1):17–23, doi:10.15446/ing.investig.v35n1.46157.
- Gomes VA do P, Bacelos MS, Xavier TP and Lira TS De (2025) ‘Catalytic Copyrolysis of Lignocellulosic Biomass and Polyolefins: A Review on Catalysts for Enhancing Bio-Oil Production’,

doi:10.1021/acsengineeringau.5c00023.

Hennessey-Ramos L, Murillo-Arango W and Vasco-Correa J (2024) ‘Use of Cacao Pod Husks Under Different Pretreatments for Bioenergy Production’, *Acta Technologica Agriculturae*, 27(1):17–22, doi:10.2478/ata-2024-0003.

Król M, Dechnik J, Szymczak P, Handke B, Szumera M and Stoch P (2024) ‘Thermal Behavior of Clinoptilolite’, *Crystals*, 14(7), doi:10.3390/cryst14070646.

Lopez G, Artetxe M, Amutio M, Bilbao J and Olazar M (2017) ‘Thermochemical routes for the valorization of waste polyolefinic plastics to produce fuels and chemicals. A review’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73(January):346–368, doi:10.1016/j.rser.2017.01.142.

Martínez-Ángel JD, Villamizar-Gallardo RA and Ortíz-Rodríguez OO (2015) ‘Caracterización y evaluación de la cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao* L.) como fuente de energía renovable’, *Agrociencia*, 49(3):329–345.

Mumbach GD, Alves JLF, Silva JCG da, Domenico M Di, Sena RF de, Marangoni C, Machado RAF and Bolzan A (2022) ‘Pyrolysis of cocoa shell and its bioenergy potential: evaluating the kinetic triplet, thermodynamic parameters, and evolved gas analysis using TGA-FTIR’, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12:723–739, doi:10.1016/j.tca.2022.179187.

Parikh J, Channiwala SA and Ghosal GK (2005) ‘A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels’, *Fuel*, 84(5):487–494, doi:10.1016/j.fuel.2004.10.010.

Rocha M V., Vinuesa AJ, Pierella LB and Renzini MS (2020) ‘Enhancement of bio-oil obtained from co-pyrolysis of lignocellulose biomass and LDPE by using a natural zeolite’, *Thermal Science and Engineering Progress*, 19(March):100654, doi:10.1016/j.tsep.2020.100654.

Sekyere DT, Zhang J, Chen Y, Huang Y, Wang M, Wang J, Niwamanya N, Barigye A and Tian Y (2023) ‘Production of light olefins and aromatics via catalytic co-pyrolysis of biomass and plastic’, *Fuel*, 333(P2):126339, doi:10.1016/j.fuel.2022.126339.

Titiloye JO, Abu Bakar MS and Odetoeye TE (2013) ‘Thermochemical characterisation of agricultural wastes from West Africa’, *Industrial Crops and Products*, 47:199–203, doi:10.1016/j.indcrop.2013.03.011.

Tomaszewska K, Kałuzna-Czaplińska J and Jóźwiak W (2010) ‘Thermal and thermo-catalytic degradation of polyolefins as a simple and efficient method of landfill clearing’, *Polish Journal of Chemical Technology*, 12(3):50–57, doi:10.2478/v10026-010-0034-x.

Tsai CH, Tsai WT, Liu SC and Lin YQ (2018) ‘Thermochemical characterization of biochar from cocoa pod husk prepared at low pyrolysis temperature’, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 8(2):237–243, doi:10.1007/s13399-017-0259-5.

Vuppaladadiyam AK, Vuppaladadiyam SSV, Sahoo A, Murugavelh S, Anthony E, Bhashkar T, Zheng Y, Zhao M, Duan H, Zhao Y, Antunes E, Sarmah AK and Leu SY (2023) ‘Bio-oil and biochar from the pyrolytic conversion of biomass: A current and future perspective on the trade-off between economic, environmental, and technical indicators’, *Science of the Total Environment*, 857(September 2022):159155, doi:10.1016/j.scitotenv.2022.159155.

Yang H, Yan R, Chen H, Lee DH and Zheng C (2007) ‘Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis’, *Fuel*, 86(12–13):1781–1788, doi:10.1016/j.fuel.2006.12.013.

Zhao N, Low SS, Law CL, Wu T and Pang CH (2025) ‘Co-pyrolysis of polymers: Recent advances, challenges and perspectives’, *Fuel Processing Technology*, 274(January):108239, doi:10.1016/j.fuproc.2025.108239.