

BIOELASTÓMERO TERMOPLÁSTICO A PARTIR DE CÁSCARA DE PIÑA

W. Pardavé Livia¹, N. Castro Castro², P. Mendoza Rojas³

¹Universidad de Santander UDES 1, wal.pardave@mail.udes.edu.co

Resumen: La cáscara de piña constituye hasta el 20% del peso total del fruto y es uno de los subproductos más abundantes generados por su procesamiento industrial. A pesar de que suele desecharse como residuo, presenta un color amarillo anaranjado con tonalidades verdes, una textura fibrosa y resistente, así como una composición química rica en compuestos funcionales. La variedad de piña cultivada en el departamento de Santander (Colombia) posee características nutricionales y fitoquímicas distintivas que convierten a su cáscara en un recurso con alto potencial para aplicaciones sostenibles. En Colombia la industria procesadora genera aproximadamente 5,50 millones de toneladas anuales de este subproducto. En este estudio se evaluaron las propiedades térmicas, mecánicas y de estabilidad de la cáscara de piña para determinar su aptitud como bioelastómero termoplástico. Se realizó un análisis de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) bajo atmósfera inerte siguiendo la norma ASTM D3418-15, identificando transiciones térmicas y calculando la capacidad calorífica específica (Cp) conforme a ASTM E2716-23. La dureza del material se determinó mediante cinco mediciones con durómetro Shore D, según ASTM D2240. Asimismo, se llevó a cabo un análisis Termogravimétrico (TGA) para evaluar su estabilidad térmica y cuantificar humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas, de acuerdo con ASTM E1131-20. Se complementó con un estudio de vida útil basado en las normas ASTM E1641-18 y ASTM E1877-21, y con un análisis Dinámico-Mecánico (DMA) en modo de tensión a 30 °C para caracterizar su comportamiento esfuerzo-deformación.

Palabras clave: Piña, biomaterial, bioelastómero, termoplástico, sostenibilidad.

1. INTRODUCCIÓN.

La piña (*Ananas comosus*) es el tercer fruto tropical más cultivado a nivel mundial y, en 2019, alcanzó una producción de 29,4 millones de toneladas [1]. Aproximadamente el 20% de cada fruto corresponde a su cáscara, un subproducto que, pese a su potencial, es mayoritariamente descartado. Cerca del 80% de la producción global de piña es destinada a la industria procesadora, la cual genera alrededor de 5,50 millones de toneladas anuales de cáscara. Este residuo agroindustrial se descompone con facilidad y su degradación bacteriana produce compuestos volátiles, metano, dióxido de carbono y sustancias como sulfuro de hidrógeno, ésteres y diferentes hidrocarburos; estos productos no solo ocasionan olores desagradables y afectan la salud humana, sino que también contribuyen al calentamiento global.

La cáscara de piña posee una composición química rica en fibra dietaria, pectinas, azúcares, polifenoles, vitaminas y minerales, además de presentar actividad antioxidante, antimicrobiana y efectos protectores gastrointestinales. Su alto contenido de compuestos fenólicos la convierte en un recurso atractivo para el desarrollo de materiales con valor agregado. En Colombia, los departamentos de Santander, Valle del Cauca y Meta concentran la mayor producción de piña, siendo Santander el principal productor con el 43%. Esta alta disponibilidad de materia prima evidencia la necesidad de implementar estrategias de aprovechamiento sostenible que permitan mitigar los problemas ambientales derivados de la acumulación del residuo.

En este contexto, la cáscara de piña perolera utilizada en este estudio fue recolectada en la plaza San Francisco de Bucaramanga, en el punto de procesamiento Delipiña. Para la obtención del biomaterial, la cáscara se sometió a un procedimiento que incluyó recepción, refrigeración, selección, lavado, separación manual, trituración, extracción y concentración del jugo, mezclado con aditivos y deshidratación controlada en horno. Este proceso permitió obtener una matriz sólida basada en compuestos naturales propios del fruto.

El desarrollo de materiales derivados de residuos agroindustriales constituye una alternativa sostenible con potencial para aplicaciones industriales, al disminuir la carga ambiental y aprovechar recursos renovables subutilizados. El presente trabajo describe el proceso de obtención del biomaterial a partir de la cáscara de piña y presenta su caracterización térmica, mecánica y composicional, con el fin de evaluar su viabilidad como bioelastómero termoplástico.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Para el desarrollo del biomaterial se emplearon cáscaras de piña frescas provenientes de fruta en buen estado. Como insumos adicionales se utilizaron agua potable para el proceso de lavado, tela tipo lienzo para la filtración manual y una mezcla de aditivos codificados como A, B, C y D. Asimismo, se empleó equipamiento básico de laboratorio, incluyendo recipientes de acero inoxidable, espátulas, guantes, cocina eléctrica o parrilla de calentamiento, horno de secado con control de temperatura y superficies antiadherentes resistentes a altas temperaturas.

El proceso de obtención del biomaterial a partir de cáscara de piña se llevó a cabo siguiendo las etapas (Ver figura 1) descritas a continuación.

Recepción y pretratamiento de la materia prima. Las cáscaras de piña fueron recibidas, refrigeradas y almacenadas bajo condiciones controladas hasta su procesamiento. Previamente al tratamiento, se realizó una selección manual para descartar cáscaras en mal estado o con degradación visible.

Lavado y separación. Las cáscaras seleccionadas fueron lavadas manualmente con agua potable para eliminar impurezas superficiales. Posteriormente, se efectuó la separación manual de los “ojos” de la cáscara, retirando restos de pulpa adherida y bordes no aptos para el procesamiento.

Trituración y extracción del jugo. Los ojos de la cáscara fueron triturados mecánicamente y se seleccionó una porción del material triturado para su prensado manual empleando tela tipo lienzo. El extracto líquido obtenido se calentó gradualmente hasta alcanzar aproximadamente 60 °C, manteniendo una temperatura constante y evitando llegar a ebullición.

Preparación de la mezcla. Con el extracto estabilizado a 60 °C, se preparó la mezcla de aditivos (A + B + C + D), la cual fue incorporada de forma manual al jugo base. La mezcla se agitó suavemente y de manera continua, conservando la temperatura a 60 °C hasta obtener una consistencia más densa y homogénea.

Moldeado y secado. La mezcla obtenida se extendió de manera uniforme sobre una superficie antiadherente y resistente al calor. Posteriormente, se introdujo en un horno de secado y se mantuvo a 60 °C durante 13 horas, permitiendo eliminar la humedad y favorecer la formación del biomaterial sólido final.

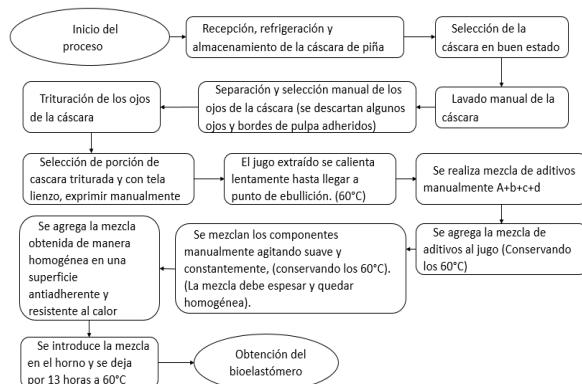


Figura 1. Proceso para el desarrollo del bioelastómero a partir de la cascara de piña.

1. RESULTADOS.

El conjunto de análisis térmicos, mecánicos y compositacionales realizados sobre el biomaterial permitió establecer una caracterización completa de su comportamiento físico-químico y su estabilidad en diversas condiciones. En la figura 2 se muestra los resultados de los ensayos de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) que evidenciaron tres transiciones térmicas fundamentales [2].

En primer lugar, se identificó una transición vítrea (T_g) alrededor de 63,9 °C, indicando el paso de un estado rígido a uno más flexible. En segundo lugar, el material presentó un pico endotérmico bien definido a 148,67 °C ($\Delta H = 52,0$ J/g), atribuido a la temperatura de fusión (T_m). Finalmente, se observó un evento endotérmico adicional cerca de 275,6 °C, relacionado con el inicio de procesos de degradación térmica o con la fusión de una fracción minoritaria del polímero. Estas transiciones sugieren que el biomaterial posee una estructura semicristalina con una fase amorfica dominante.

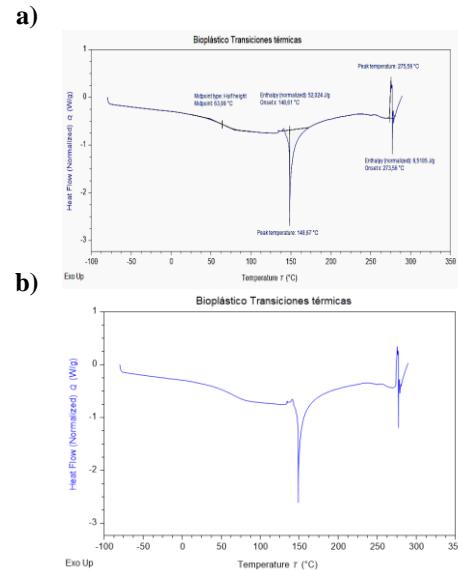


Figura 2. a) Termograma DSC de la muestra Biomaterial. b) Análisis DSC transiciones térmicas de la muestra Biomaterial.

Complementariamente, los resultados obtenidos mediante Calorimetría Diferencial de Barrido Modulada (MDSC) confirmaron (Ver figura 3) los eventos detectados en el DSC convencional [3]. Tras la calibración del equipo mediante zafiro y la corrección de la capacidad calorífica específica (C_p), se observó una disminución marcada del C_p alrededor de 148 °C, coincidente con la temperatura de fusión, así como una caída más pronunciada hacia los 250 °C, asociada al umbral de degradación térmica. El comportamiento térmico obtenido respalda la transición endotérmica mayor identificada previamente y reafirma el carácter semicristalino del material.

Por otra parte, la tabla 1 presenta los resultados de la medición de dureza mediante el ensayo Shore D, realizado según norma ASTM D2240, el cual arrojó un valor promedio de 29,8. Este valor ubica al biomaterial en el límite inferior de la escala Shore D, indicando baja resistencia al indentador y un carácter relativamente flexible. El coeficiente de variación cercano al 6 % evidenció buena repetitividad de las mediciones y homogeneidad en la superficie de la muestra.

Tabla 1. Mediciones Dureza Shore D.

Nombre Muestra	Mediciones				
	1	2	3	4	5
Bioplástico	30	32,5	27,5	29	30
Valor promedio				29,8	

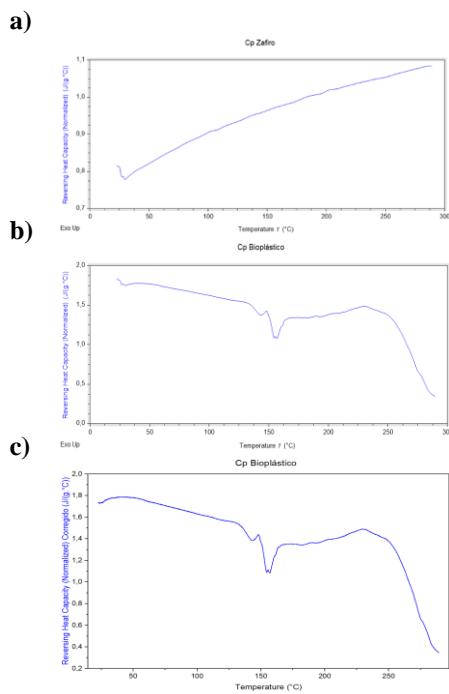


Figura 3. a) Cp del material de referencia. b) Cp Muestra Biomaterial. c) Cp Muestra Biomaterial con corrección.

En la figura 4 se presenta los resultados del análisis termogravimétrico (TGA); el estudio dinámico mostró tres etapas de pérdida de masa claramente diferenciadas [4]. La primera, entre 30 y 170 °C, correspondió a la eliminación de humedad y compuestos ligeros (12.25 %). La segunda, entre 170 y 380 °C, representó el principal proceso de degradación térmica, con una pérdida del 57.79 %. Finalmente, entre 389 y 800 °C, el material perdió un 28.45 % adicional, asociado a la descomposición de fracciones carbonosas más estables. Al finalizar la prueba, se obtuvo un residuo del 1.56 %, propio de materiales con bajo contenido inorgánico. Este comportamiento fue coherente con el análisis isotérmico a 300 °C, donde la muestra perdió un 26.9 % durante el calentamiento inicial y un 39.1 % bajo condiciones isotérmicas, estabilizándose posteriormente con un residuo cercano al 33 %. Este ensayo permitió corroborar la sensibilidad del biomaterial a temperaturas superiores a los 250–300 °C, así como su tendencia a formar residuos carbonosos bajo condiciones prolongadas de calentamiento [5].

Adicionalmente, la tabla 2 muestra los resultados del análisis composicional por TGA, el cual permitió diferenciar las fracciones de humedad (5.8 %), materia volátil (92.26 %) y cenizas (1.86 %). No se evidenció la presencia de carbono fijo, ya que no se registró pérdida de masa tras el cambio de atmósfera a 900–950 °C. Estos resultados indican que el biomaterial está constituido mayoritariamente por compuestos orgánicos termolábiles.

Por otra parte, en la figura 5 se presenta la estimación del tiempo de vida mediante el método de Ozawa-Flynn-Wall (ASTM E1641-18) que nos permite calcular la energía de activación del proceso de degradación, obteniéndose un valor de 47.749 kJ/mol. Con base en este parámetro, se determinó que a bajas temperaturas (50–

100 °C) el biomaterial puede permanecer estable durante decenas de horas; sin embargo, por encima de 150 °C la vida útil disminuye a escalas menores a una hora, mostrando una marcada dependencia térmica típica de biopolímeros susceptibles a degradación acelerada [6].

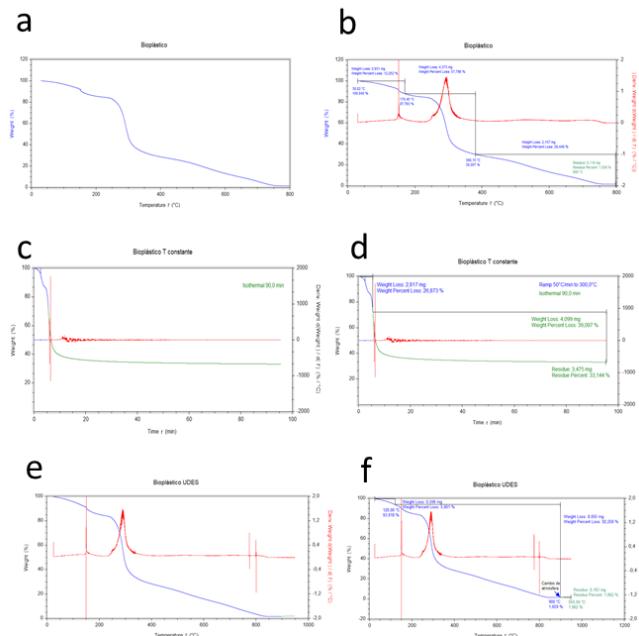


Figura 4. (a) Termograma TGA de la muestra Biomaterial (b) Análisis Termograma TGA de la muestra Biomaterial (c) TGA isotérmico del Biomaterial a 300 °C (d) Análisis TGA isotérmico del Biomaterial a 300 °C (e) TGA para análisis composicional de la muestra Biomaterial (f) Análisis Composicional de la muestra Biomaterial.

Tabla 2. Resultados Análisis Composicional de la muestra Biomaterial.

Pérdida de peso	Rango de Temperatura (°C)	Rango de pérdida de peso (%)	Porcentaje (%)
Primera: Humedad	25 – 120	100 – 93.92	5.8
Segunda y Tercera: Materia volátil	120 – 900	93.92-1.68	92.26
Material combustible (carbono fijo)	900 – 950	-	0
Cenizas	-	-	1.86

Finalmente, la figura 6 presenta los ensayos de Análisis Dinámico-Mecánico (DMA) que permiten caracterizar el comportamiento mecánico en función del esfuerzo y la deformación [7]. Las probetas mostraron módulos de Young de 98.19 y 70.56 MPa, evidenciando un material relativamente flexible en comparación con polímeros sintéticos. La tabla 3 muestra el esfuerzo máximo alcanzado con valores de 2.62 y 2.21 MPa, mientras que la deformación a la rotura se situó entre 45.59 % y 52.97 %, lo que confirma una buena ductilidad y capacidad de deformación antes de la fractura. Estos resultados son coherentes con los valores bajos de dureza Shore D [8] y con el carácter semicristalino observado en los análisis térmicos.

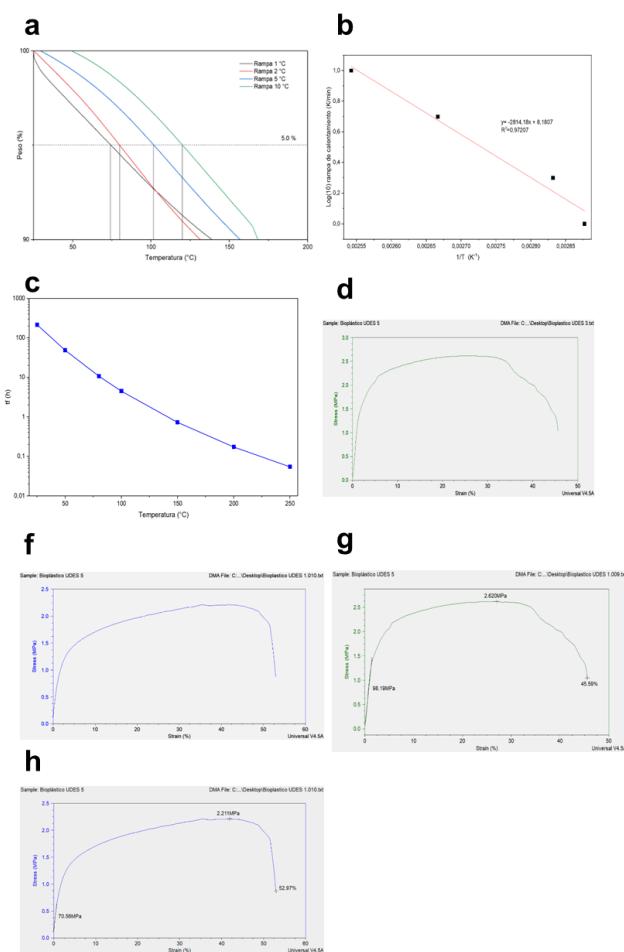


Figura 5. (a) Curvas de pérdidas de masa de la muestra Biomaterial a las siguientes rampas de calentamiento: 1°C/min, 2°C/min, 5°C/min, 10°C/min. (b) Logaritmo de la rampa de calentamiento vs 1/T a conversión constante (c) Tiempo de vida estimado para la muestra Biomaterial para una conversión del 5 % (d) Esfuerzo-deformación para la muestra Biomaterial A (e) Esfuerzo-deformación para la muestra Biomaterial B (f) Análisis Esfuerzo-deformación para la muestra Biomaterial A (g) Análisis Esfuerzo-deformación para la muestra Biomaterial B.

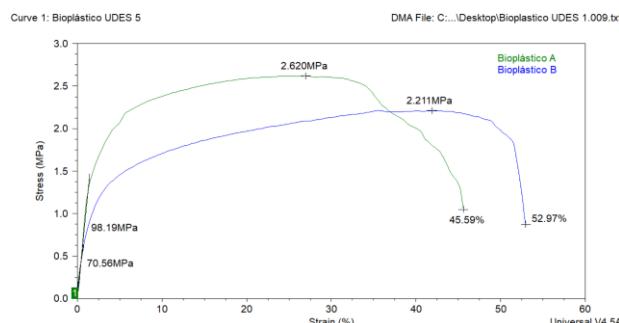


Figura 6. Comparación de las dos probetas de la muestra Biomaterial.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que el biomaterial evaluado corresponde a un biopolímero de baja dureza, elevada ductilidad y comportamiento térmico típico de matrices orgánicas semicristalinas. El biomaterial muestra estabilidad moderada a bajas y medias temperaturas, pero una

degradación progresiva significativa a partir de los 150–250 °C. Su composición altamente volátil y su respuesta mecánica flexible sugieren que podría emplearse en aplicaciones donde se requiera elasticidad y baja rigidez, siempre que no exista exposición prolongada a temperaturas elevadas.

Tabla 3. Resultados propiedades mecánicas de la muestra Biomaterial.

Muestra	Módulo de Young, E (MPa)	Esfuerzo máx, σmáx (MPa)	Deformación a la rotura, εf (%)
A	98.19	2.62	45.59%
B	70.56	2.21	52.97%
Promedio	84.38 ± 13.82	2.42 ± 0.21	49.28 3.69

2. CONCLUSIONES.

La caracterización térmica, mecánica y composicional del Biomaterial permitió establecer una comprensión detallada de su comportamiento frente a distintas solicitudes, evidenciando su naturaleza semicristalina, su alta volatilidad y su limitada estabilidad térmica.

Los análisis térmicos mediante DSC revelaron tres transiciones fundamentales [9]: una transición vítreo a 63,9 °C, que marca el paso del material de un estado rígido a uno más flexible; un pico endotérmico de fusión a 148,7 °C, asociado a la fase cristalina dominante; y un segundo evento endotérmico a 275,6 °C, relacionado con el inicio de la degradación térmica o con la presencia de una fase minoritaria. Estas transiciones fueron coherentes con las variaciones obtenidas en la capacidad calorífica (Cp), cuyo comportamiento confirmó la existencia de regiones amorfas y cristalinas en el material.

Los resultados mecánicos mostraron un biomaterial de baja rigidez y alta deformabilidad. La dureza Shore D promedio de 29,8 HD, junto con un módulo de Young promedio de 84,4 MPa y deformaciones a la rotura cercanas al 50 %, indican que el material presenta una matriz flexible, con buena capacidad de elongación y baja resistencia al impacto o esfuerzos elevados. Las diferencias entre probetas se mantuvieron dentro de rangos aceptables y son características típicas de materiales biopoliméricos sometidos a variaciones en composición, historia térmica y grado de cristalinidad.

El análisis TGA dinámico y composicional mostró que el biomaterial posee un elevado contenido de materia volátil (92,3 %) y una mínima fracción de cenizas (1,9 %), lo cual explica su fuerte pérdida de masa (98,4 %) bajo calentamiento. La ausencia de carbono fijo refuerza su carácter orgánico y biodegradable. El ensayo isotérmico a 300 °C evidenció que el material no resiste condiciones térmicas sostenidas, perdiendo el 66 % de su masa en menos de 90 minutos, lo que confirma su susceptibilidad térmica y su limitada aplicabilidad en entornos de alta temperatura.

Desde el punto de vista cinético, la energía de activación calculada (47,7 kJ/mol) demostró una degradación relativamente rápida conforme aumenta la temperatura. La estimación de vida útil indicó estabilidad por varias horas a 50–100 °C, pero una drástica reducción por encima de 150 °C, lo que restringe su uso a aplicaciones de temperatura moderada.

En conjunto, la integración de los resultados confirma que el Biomaterial es un sistema polimérico semicristalino, de baja dureza y alta ductilidad, químicamente volátil y térmicamente inestable. Estas características lo hacen adecuado para aplicaciones donde se privilegie la flexibilidad, el carácter biobasado y la biodegradabilidad, pero limitan su desempeño en condiciones donde se requiera alta estabilidad térmica, rigidez o resistencia estructural prolongada.

3. REFERENCIAS.

- [1] Hernández Chaverri, R. A., & Prado Barragán, L. A. Impact and biorefinery opportunities for agricultural waste of the cultivation of pineapple (Ananas comosus) in Costa Rica. *UNED Research Journal* 10 (2). DOI: 10.22458
- [2] Oliver, I.; Conesa, J. A.; Fullana, A. Thermal Decomposition of Bio-Based Plastic Materials. *Molecules* 2024, 29(13), 3195. <https://doi.org/10.3390/molecules29133195>
- [3] Wolf, M. H.; Gil-Castell, O.; Cea, J.; et al. Degradation of Plasticised Poly(lactide) Composites with Nanofibrillated Cellulose in Different Hydrothermal Environments. *Journal of Polymers and the Environment* 2023 (accepted 2022). <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02711-y>
- [4] Chrysafi, I.; Ainali, N. M.; Xanthopoulou, E.; Zamboulis, A.; Bikaris, D. N. Thermal Degradation Mechanism and Decomposition Kinetic Studies of Poly(Ethylene Succinate)/Hemp Fiber Composites. *Journal of Composites Science* 2023, 7(6), 216. <https://doi.org/10.3390/jcs7060216>
- [5] Rahim, E. A.; et al. Preparation and Physicochemical Characterization of Bioplastics from Vegetables Waste/PVA and Coating with Polyeugenol. *Journal of the Turkish Chemical Society A: Chemistry* 2024, 11(3), 925–932. <https://doi.org/10.18596/jotcsa.1366723>
- [6] The Effect of Mechanical Recycling on the Thermal, Mechanical, and Chemical Properties of Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) (PBAT), Poly(Butylene Succinate) (PBS), Poly(Lactic Acid) (PLA), PBAT-PBS Blend and PBAT-TPS Biocomposite. *Journal of Polymers and the Environment*, 32, 2644–2659.
- [7] An Insight into Thermal, Chemical, and Structural Characterization of Biopolymers. *Discover Applied Sciences*.
- [8] Thermogravimetric Study on Thermal Degradation Kinetics and Polymer Interactions in Mixed Thermoplastics. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 150, 211–229.
- [9] Pooja, N.; Shashank, S.; Singh, B. N.; Mazumder, N. Advancing Sustainable Bioplastics: Chemical and Physical Modification of Starch Films for Enhanced Thermal and Barrier Properties. *RSC Advances* 2024, 14, 23943–23951. <https://doi.org/10.1039/D4RA04263H>.