

Thermochemical Characterization and Pyrolysis Study of Disposable Gloves with Different Polymeric Compositions

Williams Ramos¹; Nicole Blas²; Dennzel Ramirez³; Carlin Mendoza⁴

^{1,2,3,4}Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, wramosv@uni.edu.pe, nicole.blas.m@uni.pe, dennzel.ramirez.r@uni.pe,
carlin.mendoza.a@uni.edu.pe

Abstract—The intensive use of disposable gloves in sanitary and laboratory applications has led to a significant increase in polymeric waste that is difficult to manage, motivating the search for alternative valorization pathways. In this work, the thermochemical characterization and pyrolysis of disposable latex, nitrile, and 50 wt.% latex–50 wt.% nitrile gloves were investigated in order to evaluate the effect of polymer composition on their thermal behavior, energy potential, and product distribution. Raw material characterization was carried out by thermogravimetric analysis (TGA), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and higher heating value (HHV) determination. TGA results evidenced a higher thermal stability of nitrile gloves compared to latex gloves and allowed the selection of 600 °C as the operating temperature for the pyrolysis experiments. FTIR spectra confirmed the structural differences between the materials and the coexistence of both polymeric matrices in the blended sample. HHV results showed a higher energy potential for nitrile gloves compared to latex gloves, with intermediate values for the blend. During pyrolysis at 600 °C, pure nitrile gloves favored liquid production, whereas latex gloves exhibited a greater tendency toward gas formation; the 50/50 blend showed a non-linear behavior, with a significant increase in the gaseous fraction. Overall, the results demonstrate that raw material composition plays a decisive role in the pyrolysis of disposable gloves and that prior characterization is a key step to guide thermochemical valorization strategies.

Keywords— Disposable gloves, pyrolysis, latex and nitrile, thermochemical characterization, Energy valorization

Caracterización termoquímica y estudio de pirólisis de guantes desechables con diferente composición polimérica

Williams Ramos¹; Nicole Blas²; Dennzel Ramirez³; Carlin Mendoza⁴

^{1,2,3,4}Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, wramosv@uni.edu.pe, nicole.blas.m@uni.pe, dennzel.ramirez.r@uni.pe, carlin.mendoza.a@uni.edu.pe

Resumen– El uso intensivo de guantes desechables en aplicaciones sanitarias y de laboratorio ha generado un incremento significativo de residuos poliméricos de difícil gestión, lo que motiva la búsqueda de alternativas de valorización. En este trabajo se estudió la caracterización termoquímica y la pirólisis de guantes desechables de látex, nitrilo y una mezcla 50 % látex–50 % nitrilo, con el objetivo de evaluar el efecto de la composición polimérica sobre su comportamiento térmico, potencial energético y distribución de productos. La caracterización de la materia prima se realizó mediante análisis termogravimétrico (TGA), espectroscopía FTIR y determinación del poder calorífico superior (PCS). Los resultados de TGA evidenciaron una mayor estabilidad térmica del nitrilo respecto al látex y permitieron seleccionar 600 °C como temperatura de operación para los ensayos de pirólisis. Los espectros FTIR confirmaron las diferencias estructurales entre los materiales y la coexistencia de ambas matrices poliméricas en la mezcla. Los valores de PCS mostraron un mayor potencial energético para el nitrilo en comparación con el látex, con valores intermedios para la mezcla. En los experimentos de pirólisis a 600 °C, el nitrilo puro favoreció la producción de líquidos, mientras que el látex mostró una mayor tendencia a la formación de gases; la mezcla 50/50 presentó un comportamiento no lineal, con un incremento significativo de la fracción gaseosa. En conjunto, los resultados demuestran que la composición de la materia prima influye de manera determinante en la pirólisis de guantes desechables y que la caracterización previa es una etapa clave para orientar estrategias de valorización termoquímica.

Palabras clave– Guantes desechables, pirólisis, látex y nitrilo, caracterización termoquímica, valoración energética

I. INTRODUCCIÓN

El uso intensivo de productos poliméricos desechables ha generado un incremento significativo en la cantidad de residuos sólidos de difícil gestión, particularmente en aplicaciones sanitarias y de laboratorio. A nivel global, se ha estimado que la pandemia de COVID-19 generó aproximadamente 8.4 millones de toneladas de residuos plásticos adicionales, asociados principalmente al uso masivo de equipos de protección personal (PPE), entre los cuales los guantes desechables constituyen una fracción relevante debido a su elevado consumo y corta vida útil [1]. Estos materiales, fabricados principalmente a partir de elastómeros como el látex natural y el nitrilo, presentan baja biodegradabilidad y limitado aprovechamiento posterior, lo que ha intensificado su acumulación como residuo sanitario [2], [3].

Esta problemática también se manifiesta a escala local; estudios desarrollados en entornos académicos han reportado

la generación de cientos de unidades de guantes desechables en periodos cortos de operación, evidenciando que los laboratorios y centros de enseñanza contribuyen de manera significativa a la generación de este tipo de residuos poliméricos de origen sanitario[4].

Los guantes desechables son fabricados principalmente a partir de polímeros elastoméricos como el látex natural y el caucho nitrilo. El látex natural corresponde mayoritariamente a cis-1,4-poliisopreno, un biopolímero altamente elástico con enlaces insaturados que le confieren capacidad de deformación reversible característica del caucho natural [5]. Por otro lado, el caucho nitrilo (*nitrile butadiene rubber*, *NBR*) es un copolímero sintético de acrilonitrilo y butadieno, cuya proporción de monómeros determina sus propiedades físico-químicas, incluyendo resistencia a aceites, combustibles y ciertos productos químicos [6]. Estas diferencias en la estructura química y en la composición polimérica influyen directamente en el comportamiento térmico y en los mecanismos de degradación de estos materiales cuando son sometidos a procesos termoquímicos, como la pirólisis, ya que la estabilidad térmica y las rutas de descomposición dependen de la presencia de enlaces insaturados y grupos funcionales en la cadena polimérica [7].

Las estrategias convencionales de gestión de residuos de guantes desechables, como la disposición en rellenos sanitarios o la incineración, presentan limitaciones ambientales asociadas a la ocupación de espacio, la generación de emisiones y la pérdida del valor energético del material. En este contexto, la pirólisis ha sido ampliamente estudiada como una alternativa de valorización termoquímica para residuos poliméricos, ya que permite su conversión en productos líquidos, gaseosos y sólidos bajo condiciones controladas y en ausencia de oxígeno, reduciendo el impacto ambiental y posibilitando la recuperación de energía y compuestos de interés industrial [8]–[10].

Diversos estudios han demostrado la viabilidad de la pirólisis aplicada a residuos elastoméricos y plásticos, incluyendo guantes desechables, tanto en condiciones no catalíticas como catalíticas [2], [11]. Investigaciones previas han reportado la obtención de productos líquidos con características comparables a combustibles comerciales, así como la influencia de la temperatura y del uso de catalizadores en la distribución de productos y en la formación de compuestos aromáticos [2], [8]. Asimismo, se han desarrollado estudios cinéticos y termogravimétricos que evidencian

diferencias en la estabilidad térmica y en las energías de activación asociadas a la degradación de guantes de látex y otros materiales elastoméricos [3].

En trabajos desarrollados a escala de laboratorio, se ha evaluado la co-pirólisis de residuos de guantes desechables generados en entornos académicos, demostrando la factibilidad del proceso para la obtención de combustibles líquidos con propiedades fisicoquímicas similares al diésel comercial, a partir de mezclas de guantes de látex y nitrilo [4]. Estudios relacionados también han encontrado que residuos médicos que incluyen guantes nitrilo pueden producir productos líquidos pirolíticos con características de combustible cuando son sometidos a pirólisis en condiciones controladas [12], y que la co-pirólisis de guantes de nitrilo en combinación con otros residuos plásticos puede mejorar el rendimiento y la calidad del aceite pirolítico generado, aumentando el contenido de hidrocarburos útiles para energía [13].

No obstante, estos estudios se han centrado principalmente en la caracterización de los productos obtenidos tras el proceso de pirólisis, mientras que la información relacionada con la caracterización termoquímica previa de la materia prima y con el efecto específico de la composición polimérica sobre su comportamiento térmico y energético sigue siendo limitada [2], [3], [8].

La caracterización de la materia prima constituye una etapa clave para comprender y optimizar los procesos de pirólisis, ya que permite evaluar la estabilidad térmica, identificar los grupos funcionales presentes y estimar el potencial energético de los materiales antes de su conversión. En este sentido, técnicas como el análisis termogravimétrico (TGA), la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y la determinación del poder calorífico superior (PCS) proporcionan información fundamental para establecer relaciones entre la composición polimérica y el desempeño del proceso termoquímico [3], [8], [14], [15].

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo caracterizar termoquímicamente la materia prima proveniente de guantes desechables con diferente composición polimérica (látex 100 %, mezcla 50 % látex–50 % nitrilo y nitrilo 100 %) mediante el TGA, espectroscopía FTIR y determinación del PCS, así como evaluar su comportamiento durante el proceso de pirólisis. Los resultados obtenidos buscan aportar información relevante sobre la influencia de la composición polimérica en la degradación térmica y en el potencial energético de los guantes desechables, contribuyendo al desarrollo de estrategias de valorización termoquímica más eficientes y sostenibles para este tipo de residuos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Muestras de guantes desechables

Para el presente estudio se adquirieron 20 cajas de guantes de látex y 20 cajas de guantes de nitrilo, con 100 unidades por caja. Los guantes de látex correspondieron a la marca MEDIGLOVES Profesional, talla M, mientras que los guantes

de nitrilo correspondieron a la marca NAME Marketto, talla M.

Las muestras correspondieron a productos nuevos, sin uso previo. Para los ensayos de caracterización de la materia prima, los guantes de látex y los guantes de nitrilo fueron analizados por separado, con el fin de evaluar sus propiedades termoquímicas individuales. Para ello, los guantes fueron cortados manualmente en pequeños fragmentos y mezclados de manera homogénea hasta completar la masa requerida por cada técnica analítica, conforme a las especificaciones de cada ensayo.

Para los experimentos de pirólisis, se evaluaron tres tipos de alimentación: látex 100 %, nitrilo 100 % y una mezcla 50 % látex–50 % nitrilo, preparada en base másica. En cada experimento, los guantes fueron seleccionados aleatoriamente y utilizados directamente hasta completar una masa de muestra aproximada de 50 g por ensayo, sin aplicar tratamientos adicionales de lavado, secado o modificación química.

B. Caracterización de muestras de guantes desechables

La caracterización termoquímica de las muestras de guantes desechables se realizó mediante TGA, espectroscopía FTIR y determinación del PCS mediante bomba calorimétrica.

El análisis termogravimétrico se llevó a cabo utilizando una balanza termogravimétrica modelo TGA 4000 de la marca PerkinElmer, con el objetivo de evaluar la estabilidad térmica y el comportamiento de degradación de los guantes de látex y nitrilo analizados de forma independiente. Los ensayos de TGA se realizaron bajo una atmósfera inerte de nitrógeno, empleando una velocidad de calentamiento de 20 °C min⁻¹. A partir de las curvas termogravimétricas obtenidas, se identificaron los rangos de temperatura asociados a la degradación térmica de los materiales, los cuales fueron utilizados como criterio para la selección de las condiciones de temperatura empleadas en los experimentos de pirólisis. El procesamiento de los datos experimentales y la generación de la curva termogravimétrica (TG) y de la curva de la derivada termogravimétrica (DTG) se realizaron utilizando el software PyrisManager.

La identificación de los grupos funcionales presentes en las muestras se realizó mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), utilizando un equipo PerkinElmer modelo Spectrum Two. El procesamiento de los espectros y el análisis de los datos se llevaron a cabo mediante el software Spectrum 10, lo que permitió analizar la estructura química de los materiales poliméricos y complementar la información obtenida a partir del análisis térmico.

El PCS de las muestras se determinó utilizando una bomba calorimétrica marca Parr, modelo 1341, empleando el principio de combustión total en atmósfera controlada. El procedimiento experimental fue adaptado a partir del método ASTM D240, considerando la naturaleza sólida del material analizado.

C. Pirólisis de guantes desechables

Los experimentos de pirólisis de las muestras de guantes desechables se realizaron por triplicado bajo las mismas

condiciones operativas, con el fin de asegurar la reproducibilidad experimental. Estos se llevaron a cabo en un reactor tubular vertical de acero inoxidable a escala de laboratorio, con un diámetro interno de 2 pulgadas y una longitud de 60 cm. En cada experimento se colocó una masa aproximada de 50 g de guantes desechables en el fondo del reactor.

El reactor se encuentra alojado en el interior de un horno tipo mufla con una velocidad de calentamiento de 20 °C/min, cuya rampa y temperatura de *Set Point* fue controlada mediante un controlador proporcional-integral-derivativo (PID) marca Autonics, permitiendo mantener condiciones térmicas estables durante el proceso. El sistema cuenta con una salida lateral ubicada en la parte superior del reactor, por donde se evacuaron los productos de pirólisis en fase vapor, así como con un termopozo donde se instaló una termocupla tipo K para el monitoreo continuo de la temperatura interna del reactor.

Los vapores generados durante la pirólisis fueron conducidos hacia un sistema de condensación, operado a una temperatura aproximada de 0 °C, el cual consistió en un tren de recipientes introducidos en un baño de hielo-gel y contenidos dentro de un recipiente hermético, donde se recuperaron los productos condensables en forma líquida. Los gases no condensables fueron liberados a través de un sistema de venteo.

Previo a cada experimento, el sistema fue evacuado durante 30 min utilizando una bomba de vacío, alcanzando una presión aproximada de 0.35 bar, con el fin de generar una atmósfera libre de aire. La bomba de vacío se mantuvo en operación durante todo el experimento de pirólisis, el cual tuvo una duración de 3 h, así como 30 min adicionales posteriores al proceso, con el objetivo de asegurar la completa evacuación de los productos generados. Bajo estas condiciones, el sistema operó a presión reducida sin suministro externo de gas inerte, favoreciendo la extracción continua de los vapores generados y estableciendo un régimen de bajo tiempo de residencia de los productos en fase vapor.

El esquema del equipo experimental de pirólisis se presenta en la Fig. 1, donde se identifican el reactor tubular, la línea de salida de vapores, el sistema de condensación y la línea de venteo de gases no condensables.

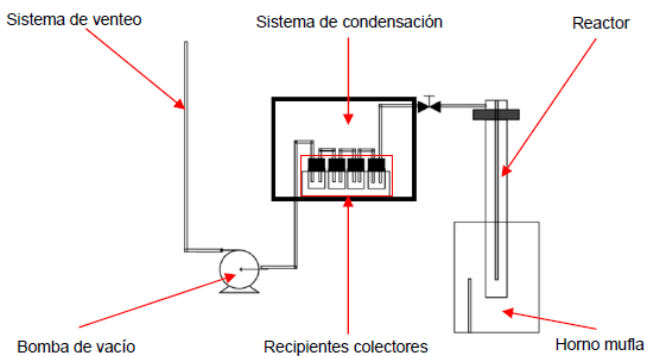


Fig. 1 Diagrama de equipo de pirólisis

Fuente: [16]

Luego de los experimentos de pirólisis, se calculó el rendimiento de cada uno de los productos obtenidos (líquidos, sólidos y gaseosos) mediante un balance de masa.

Previo a los experimentos, se registró la masa inicial de cada una de las partes del reactor y del sistema de condensación utilizando una balanza de laboratorio. Posteriormente, una vez finalizado el experimento, se determinó nuevamente la masa de cada componente del sistema. Los productos sólidos se recuperaron del interior del reactor, mientras que los productos líquidos se recolectaron en los recipientes del sistema de condensación. La masa de los productos gaseosos se calculó por diferencia, considerando la masa total alimentada y las masas de los productos líquidos y sólidos recuperados.

Para la determinación de la masa de la materia prima, así como de los productos líquidos y sólidos, se utilizó una balanza analítica, garantizando la precisión de las mediciones empleadas en el cálculo de los rendimientos. Se reconoce que pueden existir pérdidas menores de masa asociadas a gases no condensables, fugas o condensación incompleta, las cuales fueron consideradas indirectamente en el balance de masa.

III. RESULTADOS

A. Resultados de caracterización de muestras de guantes desechables

Se realizó el TGA a cada una de las muestras analizadas: guantes de látex 100 %, guantes de nitrilo 100 % y una mezcla 50 % látex–50 % nitrilo, con el fin de evaluar su estabilidad térmica y su comportamiento de degradación bajo atmósfera inerte.

En las Fig.2, 3 y 4 se presentan las curvas TG Y DTG correspondientes a las muestras de látex, nitrilo y mezcla 50/50, respectivamente. En general, las curvas muestran una región inicial de estabilidad térmica a bajas temperaturas, seguida de una etapa de pérdida de masa significativa asociada a la degradación térmica del material polimérico, y finalmente la formación de un residuo sólido a altas temperaturas.

Las diferencias observadas en los perfiles de degradación térmica entre las muestras reflejan el efecto de la composición polimérica sobre el comportamiento termoquímico de los guantes desechables, evidenciándose variaciones en los rangos de temperatura de degradación y en el porcentaje de residuo final.

Se realizaron los análisis FTIR a las muestras de guantes desechables de látex, nitrilo y a la mezcla 50 % látex–50 % nitrilo, con el objetivo de identificar los principales grupos funcionales presentes en cada material. En las Figuras 5, 6 y 7 se presentan los espectros FTIR correspondientes a cada una de las muestras analizadas, donde se observan las bandas características asociadas a la estructura química de los polímeros constituyentes. Estos resultados permiten complementar la información obtenida a partir del análisis termogravimétrico, aportando evidencia sobre las diferencias en la composición química entre los distintos tipos de guantes desechables.

Se determinó el PCS de cada una de las muestras analizadas. En la Tabla I se presentan los valores de PCS correspondientes a los guantes de látex, guantes de nitrilo y a la mezcla 50 % látex–50 % nitrilo, los cuales fueron obtenidos por triplicado mediante ensayos de bomba calorimétrica .

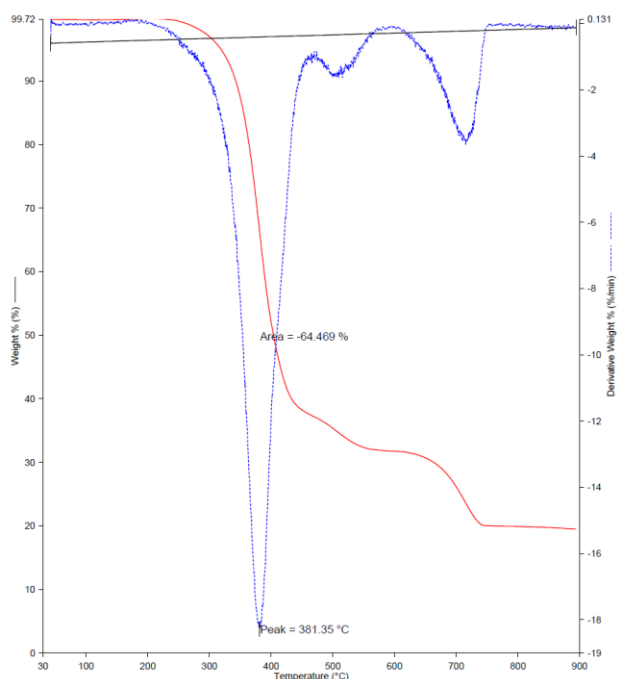


Fig. 2 TGA de muestra de guantes de látex

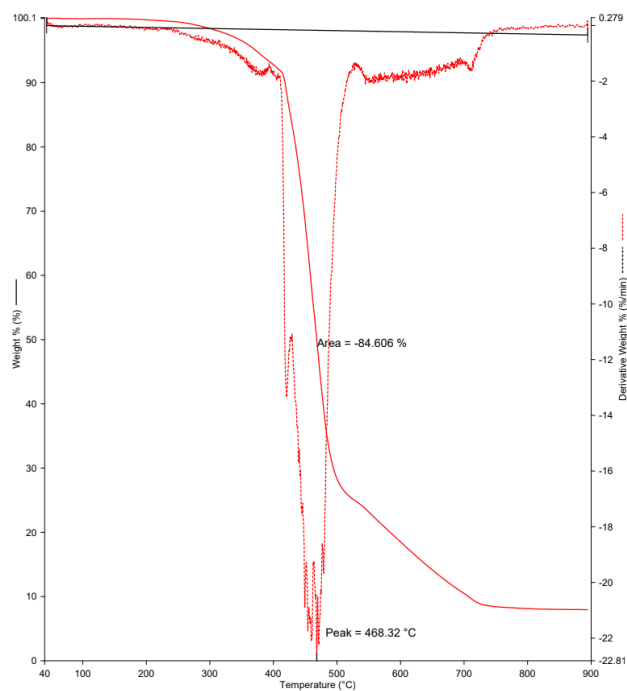


Fig. 3 TGA de muestra de guantes de nitrilo

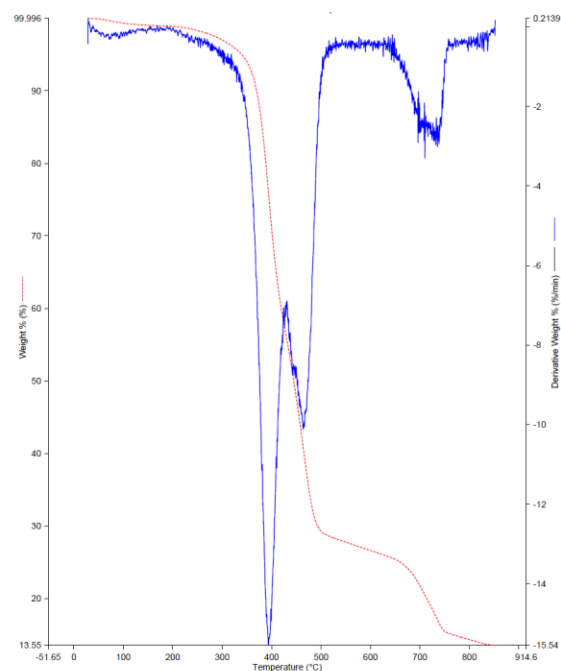


Fig. 4 TGA de muestra de mezcla 50 % látex–50 % nitrilo.

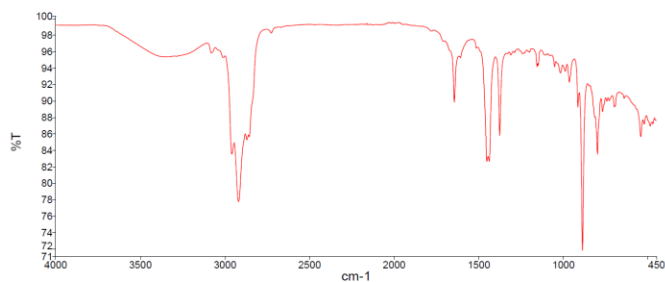


Fig. 5 FTIR de muestra de guantes de látex

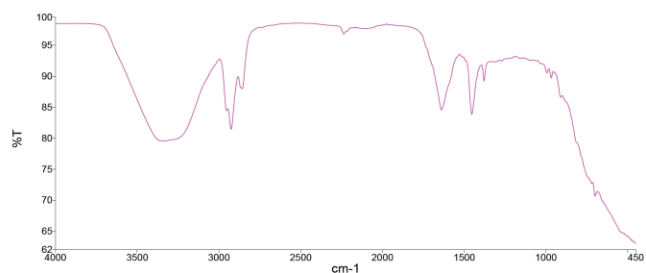


Fig. 6 FTIR de muestra de guantes de nitrilo

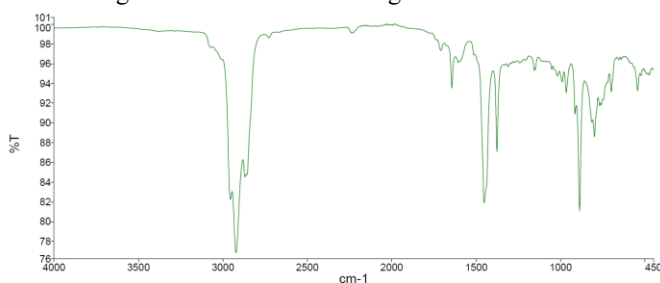


Fig. 7 FTIR de muestra de mezcla 50 % látex–50 % nitrilo.

TABLA I
PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS) DE LAS MUESTRAS DE GUANTES
DESECHABLES

Muestra	PCS (MJ/kg)
Guantes de látex (100 %)	28.10
Guantes de nitrilo (100 %)	33.84
Mezcla 50 % látex–50 % nitrilo	32.47

B. Resultados de pirólisis de muestras de guantes desechables

A partir del TGA, se identificó que la degradación térmica principal de las muestras ocurre por debajo de 600 °C, por lo que esta temperatura fue seleccionada como condición de operación para los experimentos de pirólisis. En consecuencia, los ensayos de pirólisis se realizaron a 600 °C para cada una de las muestras evaluadas: guantes de látex (100 %), guantes de nitrilo (100 %) y mezcla 50 % látex–50 % nitrilo.

Luego de cada experimento, se determinaron los rendimientos de los productos líquidos, sólidos y gaseosos mediante balance de masa. En la Tabla II se presentan los rendimientos obtenidos para cada tipo de muestra, reportados como valores promedio de los ensayos realizados por triplicado, expresados en porcentaje en masa respecto a la cantidad inicial de material alimentado al reactor.

TABLA II
RENDIMIENTOS DE PRODUCTOS OBTENIDOS POR PIRÓLISIS DE GUANTES
DESECHABLES A 600 °C

Muestra	Composición látex/nitrilo (% masa)	Rendimiento de líquidos (% masa)	Rendimiento de gases (% masa)	Rendimiento de sólidos (% masa)
Guantes de látex	100 / 0	41.2 ± 0.3	28.8 ± 0.3	30.0 ± 0.3
Guantes de nitrilo	0 / 100	56.6 ± 0.3	15.2 ± 0.3	28.2 ± 0.3
Mezcla látex–nitrilo	50 / 50	35.4 ± 0.3	41.0 ± 0.3	23.6 ± 0.3

Los experimentos se realizaron por triplicado y los resultados se presentan como valores promedio ± desviación estándar. La baja dispersión entre las repeticiones indica una adecuada reproducibilidad del procedimiento experimental.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. Discusión de resultados de TGA de muestras de guantes desechables

El TGA permitió establecer diferencias claras en el comportamiento de degradación térmica de los guantes desechables en función de su composición polimérica. Las curvas TG y DTG correspondientes a los guantes de látex, nitrilo y a la mezcla 50 % látex–50 % nitrilo (Fig. 2–4) evidencian que la estabilidad térmica y los mecanismos de descomposición están directamente relacionados con la

naturaleza química de los elastómeros que conforman cada muestra.

En el caso de los guantes de látex (100 %), la degradación térmica ocurre predominantemente en una sola etapa principal, con un máximo de velocidad de pérdida de masa (Temperatura máxima de 381 °C aprox.). Este comportamiento es característico de materiales basados en caucho natural (cis-1,4-poliisopreno), cuya descomposición térmica bajo atmósfera inerte se ha reportado mayoritariamente en el intervalo de 350–450 °C, asociado a la ruptura de las cadenas poliméricas y a la formación de compuestos volátiles[2], [3]. A temperaturas superiores, la pérdida de masa se vuelve más gradual, lo que se atribuye a la degradación secundaria del residuo carbonoso y a la posible presencia de aditivos no volátiles típicos de formulaciones comerciales de guantes [17].

Por su parte, los guantes de nitrilo (100 %) presentan un desplazamiento significativo del evento principal de degradación hacia temperaturas más elevadas, con un máximo de degradación localizado alrededor de 468 °C. Este incremento en la temperatura de degradación refleja una mayor estabilidad térmica del caucho nitrilo (NBR) en comparación con el látex natural, lo cual ha sido ampliamente documentado y se asocia a la estructura copolimérica del NBR y a la presencia de grupos nitrilo, que incrementan la resistencia térmica del material[17], [18]. Asimismo, la mayor intensidad del evento de degradación observado en la curva DTG sugiere una volatilización más pronunciada de la fracción orgánica durante la descomposición térmica.

La mezcla 50 % látex–50 % nitrilo exhibe un comportamiento térmico intermedio, en el cual la curva TG muestra una degradación que se inicia en un rango similar al del látex, pero se extiende hacia temperaturas comparables a las observadas para el nitrilo. La curva DTG correspondiente presenta un perfil más amplio, lo que indica la superposición de los mecanismos de degradación asociados a ambos polímeros. Este comportamiento no lineal con la composición es consistente con lo reportado para sistemas elastoméricos multicomponente, donde la interacción entre fases poliméricas y la presencia de aditivos pueden modificar la forma y el ancho de los eventos de degradación térmica [3], [4].

De manera general, las curvas TG–DTG muestran que la degradación primaria de las tres muestras ocurre mayoritariamente por debajo de 600 °C, mientras que a temperaturas superiores predominan procesos de degradación secundaria y transformación del residuo sólido. En este contexto, la selección de 600 °C como temperatura de operación para los experimentos de pirólisis resulta técnicamente adecuada, ya que permite asegurar una conversión térmica elevada de los materiales poliméricos, incluso en matrices comerciales complejas. El uso del análisis termogravimétrico como criterio para la definición de condiciones de pirólisis ha sido ampliamente empleado en estudios previos sobre guantes desechables y residuos elastoméricos, constituyendo una práctica aceptada para el diseño de procesos de valorización termoquímica [2]–[4].

B. Discusión de resultados de espectroscopia FTIR de muestras de guantes desechables

Los espectros obtenidos por FTIR (Fig. 5–7) permiten identificar los grupos funcionales dominantes de las muestras y confirmar la diferencia de composición entre guantes de látex y nitrilo, así como la coexistencia de ambas firmas espectrales en la mezcla 50/50. Esta caracterización química es relevante porque complementa el análisis térmico (TGA/DTG) al evidenciar diferencias estructurales que influyen en la estabilidad térmica y en las rutas de degradación en procesos termoquímicos.

En la muestra de guantes de látex (100 %) (Fig. 5), el espectro presenta las bandas típicas del caucho natural, cuya matriz polimérica corresponde mayoritariamente a *cis*-1,4-poliisopreno. En literatura se reporta que las bandas características del *cis*-1,4-poliisopreno incluyen señales intensas asociadas a vibraciones de estiramiento C–H alifático (región 2960–2850 cm^{-1}), así como bandas vinculadas al doble enlace C=C y deformaciones C–H del esqueleto del poliisopreno (por ejemplo, alrededor de 1660 cm^{-1} y 840 cm^{-1} , entre otras). Estas asignaciones han sido documentadas para películas de látex natural y materiales basados en NRL, lo que respalda que la muestra analizada corresponde a un elastómero tipo poliisopreno, consistente con un guante comercial de látex [19], [20].

En contraste, el espectro de guantes de nitrilo (100 %) (Fig. 6) muestra la firma distintiva del caucho nitrilo al evidenciar una banda característica en la región 2230–2250 cm^{-1} , asociada al estiramiento del grupo nitrilo (C≡N). La presencia de esta banda es un criterio ampliamente utilizado para identificar materiales basados en NBR (copolímero de acrilonitrilo y butadieno) y distinguirlos del caucho natural, cuya estructura no contiene dicho grupo funcional. Estudios recientes sobre composición de guantes de nitrilo mediante FTIR (incluyendo evaluación de guantes comerciales) emplean precisamente esta señal como marcador químico del material nitrílico [21], [22].

Para la mezcla 50 % látex–50 % nitrilo (Fig. 7), el espectro refleja una combinación de señales atribuibles a ambas matrices elastoméricas: se mantiene el patrón de absorciones alifáticas (región de estiramientos C–H) propio de cadenas hidrocarbonadas, y se observa simultáneamente la contribución del grupo nitrilo (C≡N) característica del NBR. Este comportamiento es coherente con lo reportado para mezclas y sistemas elastoméricos donde el espectro FTIR suele mostrar una superposición de bandas de cada componente, sin necesidad de la aparición de nuevas señales (salvo que existan reacciones químicas específicas o compatibilización reactiva). En ese sentido, la señal nitrilo en la mezcla constituye evidencia directa de la fracción NBR, mientras que la presencia de las bandas asociadas al poliisopreno respalda la contribución del látex [19].

La lectura conjunta de FTIR y TGA/DTG permite interpretar de forma consistente las diferencias observadas en estabilidad térmica: la muestra de nitrilo, al contener grupos nitrilo (estructura más polar y distinta arquitectura del

copolímero), presenta una firma química diferenciada respecto al poliisopreno del látex, lo que concuerda con el desplazamiento del evento principal de degradación a temperaturas más altas observado en el análisis termogravimétrico. Así, FTIR confirma que las muestras corresponden efectivamente a composiciones poliméricas distintas (látex vs nitrilo) y respalda que el comportamiento térmico diferenciado responde a su química estructural [19], [23].

C. Discusión de resultados de PCS de muestras de guantes desechables

Los valores de PCS obtenidos para los guantes desechables evidencian una dependencia directa con la composición polimérica. Los guantes de nitrilo (100 %) presentan el mayor PCS (33.84 MJ/kg), seguidos por la mezcla 50 % látex–50 % nitrilo (32.47 MJ/kg), mientras que los guantes de látex (100 %) muestran el menor valor (28.10 MJ/kg). Esta jerarquía es coherente con la literatura sobre materiales elastoméricos, donde los valores de PCS se ubican típicamente en rangos altos debido al predominio de enlaces C–C y C–H y al bajo contenido de oxígeno estructural, siendo comunes intervalos globales de aproximadamente 29–40 MJ/kg para residuos de caucho dependiendo de formulación, cargas y cenizas [24], [25].

El mayor PCS medido para nitrilo puede justificarse comparándolo con reportes directos de NBR. Se ha documentado un PCS de 36.81 MJ/kg para un residuo de NBR, valor que confirma el alto potencial energético de este elastómero sintético y respalda que el nitrilo tienda a ubicarse en la parte alta del rango energético observado para cauchos [26]. En ese contexto, el PCS de 33.84 MJ/kg para guantes 100 % nitrilo encontrado en la investigación resulta plenamente consistente, considerando que los guantes comerciales pueden contener aditivos (plastificantes, cargas, pigmentos) que modulan el valor final.

En contraste, el PCS menor del látex (28.10 MJ/kg) puede interpretarse como una señal de diferencias de formulación del producto comercial respecto a “caucho puro”, así como de posibles contribuciones de cargas o fracciones no combustibles que tienden a reducir el poder calorífico efectivo. Esto es coherente con la variabilidad reportada para materiales elastoméricos reales (no ideales), donde el HHV depende de la composición elemental y del contenido de cenizas/aditivos [24], [25].

La mezcla 50 % látex–50 % nitrilo presenta un PCS intermedio (32.47 MJ/kg), lo que concuerda con el comportamiento esperado para mezclas de polímeros/elastómeros, donde el potencial energético suele reflejar una contribución ponderada de cada componente cuando no existen reacciones previas que alteren sustancialmente la estructura del material. En términos de valorización termoquímica, los valores obtenidos (28–34 MJ/kg) confirman que los guantes desechables constituyen una materia prima con potencial energético comparable al de otros residuos de caucho frecuentemente evaluados en procesos de conversión termoquímica [24], [25].

D. Discusión de resultados de pirólisis de muestras de guantes desechables

A partir del TGA, se identificó que la degradación térmica principal de las muestras ocurre por debajo de 600 °C, por lo que esta temperatura fue seleccionada como condición de operación para los experimentos de pirólisis. En consecuencia, los ensayos de pirólisis se realizaron a 600 °C para cada una de las muestras evaluadas: guantes de látex (100 %), guantes de nitrilo (100 %) y mezcla 50 % látex–50 % nitrilo.

Luego de cada experimento, se determinaron los rendimientos de los productos líquidos, sólidos y gaseosos mediante balance de masa. En la Tabla 2 se presentan los rendimientos obtenidos para cada tipo de muestra, expresados en porcentaje en masa respecto a la cantidad inicial de material alimentado al reactor. Los rendimientos de pirólisis a 600 °C mostrados en la Tabla II muestran un efecto claro de la composición látex/nitrilo sobre la distribución de productos. En los extremos de composición, los guantes de nitrilo (0/100) presentan el mayor rendimiento de líquidos (56.6 % masa) y el menor de gases (15.2 %), mientras que los guantes de látex (100/0) muestran un rendimiento de líquidos menor (41.2 %) y un incremento notable de gases (28.8 %). La mezcla 50/50 se comporta de forma marcadamente distinta a una interpolación simple entre los extremos: exhibe el menor rendimiento de líquidos (35.4 %) y el mayor rendimiento de gases (41.0 %), además del menor residuo sólido (23.6 %). Este comportamiento indica que, a igual temperatura, la composición afecta directamente en rendimiento de productos.

Al discutir los resultados con la referencia [4] donde también se trabaja la pirólisis a 600 °C, se refuerza lo indicado anteriormente respecto a la composición. En dicha investigación, la muestra global correspondió a 75 % látex / 25 % nitrilo da cercano al valor del látex puro (41.2 %), como es esperable por su dominancia másica; pero el rendimiento de gases (30.6 %) es más alto que el observado para látex puro (28.8 %) y, a la vez, mucho más alto que nitrilo puro (15.2 %). Se observa que al pasar de un sistema puro a mezclas (75/25 y 50/50), aparece una tendencia a incrementar gases y disminuir sólidos respecto de lo que se esperaría por mezcla simple, lo cual sugiere que la co-presencia de ambos elastómeros favorece rutas de ruptura hacia moléculas ligeras, además de reducir la permanencia como residuo sólido.

Desde la perspectiva química, esta tendencia es compatible con diferencias en rutas de degradación y productos primarios de cada matriz elastomérica. En guantes de látex (poliisopreno), se ha reportado que la pirólisis produce compuestos como limoneno y otros hidrocarburos insaturados, y que condiciones que favorecen reacciones secundarias (por ejemplo, mayor severidad o incluso catalizadores) incrementan la conversión de compuestos primarios hacia fracciones más livianas/aromáticas, aumentando gases y reduciendo condensables[2]. En paralelo, en estudios recientes de pirólisis de residuos de PPE que incluyen fracciones nitrilo, se observa que la distribución de productos depende fuertemente de la temperatura y del grado de craqueo, con máximos de condensables alrededor de 600

°C y aumento de gases cuando se intensifica la ruptura secundaria [27]. Así, en el presente trabajo, el nitrilo puro (0/100) favorece condensables, pero al mezclarse con látex (50/50 o 75/25) se incrementa el rendimiento hacia gases, lo cual apunta a un efecto a la producción de volátiles.

Si bien el presente estudio incluye caracterización termoquímica mediante TGA, FTIR y determinación del poder calorífico superior, se reconoce como limitación la ausencia de análisis elemental (CHNSO) y análisis inmediato (proximal) de la materia prima. La incorporación de estos análisis permitiría una descripción más completa de la composición del material, así como el desarrollo de modelos predictivos del comportamiento durante la pirólisis, incluyendo la estimación del potencial energético teórico y la formación de subproductos. No obstante, las técnicas empleadas en este trabajo permiten evaluar de manera adecuada la estabilidad térmica, la estructura química y el potencial energético de los materiales analizados, constituyendo una base experimental válida para el análisis comparativo del efecto de la composición polimérica en la distribución de productos.

CONCLUSIONES

La caracterización termoquímica y los ensayos de pirólisis realizados a guantes desechables de látex, nitrilo y su mezcla permitieron evidenciar la influencia determinante de la composición polimérica sobre la estabilidad térmica, el potencial energético y la distribución de productos en procesos de valorización termoquímica. El análisis TG/DTG mostró que el guante de nitrilo presenta una mayor estabilidad térmica que el látex, con un desplazamiento del evento principal de degradación hacia temperaturas más elevadas, mientras que la degradación primaria de todas las muestras ocurre mayoritariamente por debajo de 600 °C, lo que justificó la selección de esta temperatura para los experimentos de pirólisis. Los espectros FTIR confirmaron las diferencias estructurales entre los materiales, identificando la presencia del grupo nitrilo en los guantes de NBR y la coexistencia de ambas firmas químicas en la mezcla 50/50. Los valores de PCS evidenciaron un mayor potencial energético del nitrilo en comparación con el látex, situándose la mezcla en un valor intermedio, lo que respalda el interés de estos materiales como materia prima para recuperación energética. En los ensayos de pirólisis a 600 °C, el nitrilo puro favoreció la producción de líquidos, mientras que el látex mostró una mayor tendencia a la formación de gases; por su parte, la mezcla 50/50 presentó un comportamiento no lineal, con una marcada reducción de la fracción líquida y un incremento significativo de gases, lo que sugiere un aumento del craqueo en sistemas mixtos. La comparación con las referencias a la misma temperatura confirma que pequeñas variaciones en la proporción látex/nitrilo pueden modificar de manera significativa la distribución de productos. En conjunto, los resultados demuestran que la caracterización previa de la materia prima es esencial para interpretar y optimizar la pirólisis de guantes desechables, y que la composición de alimentación constituye una variable clave para orientar el proceso hacia la producción

preferencial de líquidos o gases en estrategias de valorización termoquímica.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería por el financiamiento otorgado para su participación en la conferencia. Asimismo, expresan su agradecimiento a la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica de la Universidad Nacional de Ingeniería por el apoyo financiero brindado para la ejecución del proyecto que dio origen a los resultados presentados en este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] N. U. Benson, D. E. Bassey, and T. Palanisami, "COVID pollution: impact of COVID-19 pandemic on global plastic waste footprint," *Heliyon*, vol. 7, no. 2, p. e06343, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06343>.
- [2] W. J. Hall, N. Zakaria, and P. T. Williams, "Pyrolysis of latex gloves in the presence of Y-zeolite," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 2, pp. 797–803, 2009, doi: [10.1016/j.wasman.2008.06.031](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.031).
- [3] J. Wang and H. Zhao, "Thermogravimetric Analysis of Rubber Glove Pyrolysis by Different Iso-conversional Methods," *Waste and Biomass Valorization*, 2015, doi: [10.1007/s12649-015-9372-5](https://doi.org/10.1007/s12649-015-9372-5).
- [4] W. Ramos, Y. Condori, D. Ramirez, R. Castillejo, and C. Ubillas, "Obtaining and Characterization of Liquid Fuels Obtained from Co-Pyrolysis of Disposable Glove Waste," in *Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2024): "Sustainable Engineering for a Diverse, Equitable, and Inclusive Future at the Service of Education, Research, and Industry for a Society"*, 2024, pp. 1–7, doi: [10.18687/LACCEI2024.1.1.1423](https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.1423).
- [5] "Natural Latex - an overview | ScienceDirect Topics." https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/natural-latex?utm_source=chatgpt.com (accessed Jan. 28, 2026).
- [6] H. Ismail and H. S. Ahmad, "The Properties of Acrylonitrile-Butadiene Rubber (NBR) Composite with Halloysite Nanotubes (HNTs) and Silica or Carbon Black," *Polym. Plast. Technol. Eng.*, vol. 52, no. 12, pp. 1175–1182, Sep. 2013, doi: [10.1080/03602559.2013.769577](https://doi.org/10.1080/03602559.2013.769577).
- [7] "Polyisoprene Rubber | Encyclopedia MDPI." https://encyclopedia.pub/entry/50750?utm_source=chatgpt.com (accessed Jan. 28, 2026).
- [8] S. D. Anuar Sharuddin, F. Abnisa, W. M. A. Wan Daud, and M. K. Aroua, "A review on pyrolysis of plastic wastes," *Energy Convers. Manag.*, vol. 115, pp. 308–326, 2016, doi: [10.1016/j.enconman.2016.02.037](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037).
- [9] G. Garcia-Garcia, M. Á. Martín-Lara, M. Calero, and G. Blázquez, "Environmental impact of different scenarios for the pyrolysis of contaminated mixed plastic waste," *Green Chem.*, vol. 26, no. 7, pp. 3853–3862, 2024, doi: [10.1039/d3gc04396g](https://doi.org/10.1039/d3gc04396g).
- [10] W. U. Eze, R. Umunakwe, H. C. Obasi, M. I. Ugboja, C. C. Uche, and I. C. Madufor, "Plastics waste management: A review of pyrolysis technology," *Clean Technol. Recycl.*, vol. 1, no. 1, pp. 50–69, 2021, doi: [10.3934/ctr.2021003](https://doi.org/10.3934/ctr.2021003).
- [11] T. A. Aragaw and B. A. Mekonnen, "Current plastics pollution threats due to COVID-19 and its possible mitigation techniques: a waste-to-energy conversion via Pyrolysis," *Environ. Syst. Res.*, vol. 10, no. 1, p. 8, Dec. 2021, doi: [10.1186/s40068-020-00217-x](https://doi.org/10.1186/s40068-020-00217-x).
- [12] M. A. Al-Mamun, M. M. Al-Mueed, and M. H. Ali, "Experimental evaluation of product yield by pyrolysis of medical waste: a way of energy recovery," *South African J. Chem. Eng.*, vol. 54, no. July, pp. 10–19, 2025, doi: [10.1016/j.sajce.2025.07.001](https://doi.org/10.1016/j.sajce.2025.07.001).
- [13] R. Kumar Mishra and K. Mohanty, "Co-pyrolysis of waste biomass and waste plastics (polystyrene and waste nitrile gloves) into renewable fuel and value-added chemicals," *Carbon Resour. Convers.*, vol. 3, no. June, pp. 145–155, 2020, doi: [10.1016/j.crcon.2020.11.001](https://doi.org/10.1016/j.crcon.2020.11.001).
- [14] L. Cafiero, D. Fabbri, E. Trinca, R. Tuffi, and S. Vecchio Cipriotti, "Thermal and spectroscopic (TG/DSC-FTIR) characterization of mixed plastics for materials and energy recovery under pyrolytic conditions," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 121, no. 3, pp. 1111–1119, 2015, doi: [10.1007/s10973-015-4799-2](https://doi.org/10.1007/s10973-015-4799-2).
- [15] T. Bhaskar, N. M. M. Mitani, J. A. Onwudili, A. Muto, P. T. Williams, and Y. Sakata, "Effect of polyethylene terephthalate (PET) on the pyrolysis of brominated flame retardant-containing high-impact polystyrene (HIPS-Br)," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 12, no. 4, pp. 332–340, 2010, doi: [10.1007/s10163-010-0306-9](https://doi.org/10.1007/s10163-010-0306-9).
- [16] W. Ramos, J. Nahui-Ortiz, R. Erazo, and V. Pretell, "Pirólisis catalítica de cubrebocas de polipropileno desechables para la obtención de combustibles líquidos," *Inf. tecnológica*, vol. 34, no. 1, pp. 1–10, Feb. 2023, doi: [10.4067/S0718-07642023000100001](https://doi.org/10.4067/S0718-07642023000100001).
- [17] F. Chen and J. Qian, "Studies of the thermal degradation of waste rubber," *Waste Manag.*, vol. 23, no. 6, pp. 463–467, Jan. 2003, doi: [10.1016/S0956-053X\(03\)00090-4](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(03)00090-4).
- [18] C. She, F. Zeng, L. Dai, L. Li, Q. Yao, and J. Tang, "Degradation Behaviors and Mechanism of Nitrile Butadiene Rubber Caused by Insulating Medium C5F10O," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 10, 2023, doi: [10.3390/polym15102282](https://doi.org/10.3390/polym15102282).
- [19] N. M. Sarih, N. S. Dzulkafly, S. Maher, and A. A. Rashid, "Wearable Natural Rubber Latex Gloves with Curcumin for Tom Glove Detection in Clinical Settings," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 15, 2022, doi: [10.3390/polym14153048](https://doi.org/10.3390/polym14153048).
- [20] Y. Li, S. Ma, M. Luo, and Y. He, "Optimization of Natural Rubber Latex Formulation via Spherical Symmetric Design and Silica Reinforcement for Enhanced Mechanical Performance," *Polym. Adv. Technol.*, vol. 36, no. 8, Aug. 2025, doi: [10.1002/pat.70288](https://doi.org/10.1002/pat.70288).
- [21] J. P. Pires *et al.*, "Natural freshwater degradation of polypropylene blends with additives of a distinct nature," *Polym. Bull.*, vol. 78, no. 4, pp. 2025–2042, Apr. 2021, doi: [10.1007/s00289-020-03200-9](https://doi.org/10.1007/s00289-020-03200-9).
- [22] A. Herkins, S. Dey, D. Conroy, and K. Comish, "Nitrile glove composition and performance—Substandard properties and inaccurate packaging information," *PLoS One*, vol. 19, no. 10, pp. 1–13, 2024, doi: [10.1371/journal.pone.0312891](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0312891).
- [23] R. Andler, A. -L. Altenhoff, F. Mäsing, and A. Steinbüchel, "In vitro studies on the degradation of poly(cis -1,4-isoprene)," *Biotechnol. Prog.*, vol. 34, no. 4, pp. 890–899, Jul. 2018, doi: [10.1002/btpr.2631](https://doi.org/10.1002/btpr.2631).
- [24] P. Soprych, G. Czarski, and P. Grzywacz, "Studies on the Thermochemical Conversion of Waste Tyre Rubber—A Review," *Energies*, vol. 17, no. 1, 2024, doi: [10.3390/en17010014](https://doi.org/10.3390/en17010014).
- [25] A. Rowhani and T. J. Rainey, "Scrap tyre management pathways and their use as a fuel - A review," *Energies*, vol. 9, no. 11, pp. 1–26, 2016, doi: [10.3390/en9110888](https://doi.org/10.3390/en9110888).
- [26] K. Pathiraja, H. Nirmalgoda, I. Wijethunga, and K. Koswattage, "Sustainable Management of Nitrile Butadiene Rubber Waste Through Pyrolysis," *Sustain.*, vol. 17, no. 3, pp. 1–16, 2025, doi: [10.3390/su17030846](https://doi.org/10.3390/su17030846).
- [27] R. Baird, R. Ocone, and A. Sanna, "Pyrolysis of Polypropylene and Nitrile PPE Waste: Insights into Oil Composition, Kinetics, and Steam Cracker Integration," *Molecules*, vol. 30, no. 16, p. 3351, Aug. 2025, doi: [10.3390/molecules30163351](https://doi.org/10.3390/molecules30163351).