

A Systematic Review of Hydrogen Production via Co-Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass and Plastic Waste: Current State and Challenges for Industrial Scaling

Victor Pretell, Dr¹; Maria Viera-Palacios, MSc¹; Williams Ramos, MSc¹

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, vpretellh@uni.edu.pe, mviaera@uni.edu.pe, wramosv@uni.edu.pe

Abstract– This systematic review examines hydrogen production via co-pyrolysis of lignocellulosic biomass and plastic waste, a promising technology for mitigating the environmental impact of these residues. Using the PRISMA methodology, 50 articles published between 2015 and 2025 were selected and analyzed to identify synergistic effects, reactor configurations, and optimal operating parameters. Co-pyrolysis exploits synergistic interactions in which plastics act as hydrogen donors, increasing the effective hydrogen index (H/C_{eff}) of biomass, which is inherently deficient in this element. The results indicate that hydrogen yield is maximized within a temperature range of 600 °C to 850 °C, promoting secondary cracking and reforming reactions. The use of catalysts, primarily nickel-based (Ni), zeolites (HZSM-5), and calcium oxide (CaO), is crucial for reducing activation energy and minimizing tar formation. Hydrogen yields of up to 115.33 mmol H₂/g and gas-phase concentrations of up to 86% v/v have been reported, depending on the biomass-to-plastic ratio (commonly 1:1 or 3:1). The most commonly employed reactor types are fixed-bed and fluidized-bed systems. Critical gaps are identified in studies on agro-industrial fruit seeds (such as avocado and mango) and on the behavior of real, contaminated plastic mixtures. It is concluded that co-pyrolysis represents a viable pathway for the circular economy; however, further research is required on predictive modeling and industrial-scale implementation to enable global deployment.

Keywords– co-pyrolysis, plastics, waste, biomass, catalyst.

Revisión Sistemática de la Producción de Hidrógeno por Copirólisis de Biomasa Lignocelulósica y Residuos Plásticos: Estado Actual y Retos para el Escalamiento Industrial

Victor Pretell, Dr¹; Maria Viera-Palacios, MSc²; Williams Ramos, MSc³

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, vpretellh@uni.edu.pe, mviaera@uni.edu.pe, wramosv@uni.edu.pe

Resumen— Esta revisión sistemática examina la obtención de hidrógeno mediante la copirólisis de biomasa lignocelulósica y residuos plásticos, una tecnología prometedora para mitigar el impacto ambiental de estos desechos. Utilizando la metodología PRISMA, se seleccionaron y analizaron 50 artículos publicados entre 2015 y 2025 para identificar sinergias, configuraciones de reactores y parámetros óptimos. La copirólisis aprovecha efectos sinérgicos donde los plásticos actúan como donadores de hidrógeno, elevando el índice de hidrógeno efectivo (H/C_{eff}) de la biomasa, que es inherentemente deficiente en este elemento. Los resultados indican que el rendimiento de hidrógeno se maximiza en un rango de temperatura entre 600 °C y 850 °C, favoreciendo el craqueo secundario y las reacciones de reformado. El uso de catalizadores, principalmente a base de níquel (Ni), zeolitas (HZSM-5) y óxido de calcio (CaO), resulta crucial para reducir la energía de activación y minimizar la formación de alquitranes. Se han reportado rendimientos de hasta 115.33 mmol H₂/g y concentraciones gaseosas de hasta 86 % v/v, dependiendo de la relación biomasa:plástico (comúnmente 1:1 o 3:1). Los tipos de reactores más empleados son los de lecho fijo y fluidizado; se identifican brechas críticas en el estudio de semillas de frutas agroindustriales (como aguacate y mango) y en el comportamiento de mezclas plásticas reales contaminadas. Se concluye que la copirólisis es una vía viable para la economía circular, aunque requiere mayor investigación en modelos predictivos y escalado industrial para su implementación global.

Palabras clave— copirólisis, plásticos, residuos, biomasa, catalizador.

I. INTRODUCCIÓN

Los residuos de biomasa y los residuos plásticos generan problemas ambientales significativos debido a su manejo inadecuado [1], [2]. La biomasa lignocelulósica, aunque renovable, genera graves problemas ambientales si está mal gestionada. Su quema a cielo abierto libera contaminantes atmosféricos perjudiciales y su disposición en campo genera metano (gas de efecto invernadero) por descomposición que contribuye al cambio climático [3], [4]. La acumulación masiva de plásticos en océanos y vertederos constituye un problema global, ya que estos materiales persisten por siglos, fragmentándose en microplásticos que dañan la salud humana y pueden liberar sustancias dañinas como los ftalatos, BPA, retardantes de llama y metales pesados (Pb, Cd) a los ecosistemas acuáticos [5], [6], [7]. Con menos del 10 % reciclado, su disposición en rellenos contamina aguas subterráneas y su quema indiscriminada origina emisiones de

gases tóxicos como las dioxinas y furanos [6], [8], [9]. Esta acumulación masiva representa una pérdida de recursos energéticos y agrava la crisis ambiental global.

Países de ingresos medios como Perú, México y Chile tienen una potente agroindustria exportadora de frutas y hortalizas. Anualmente, generan decenas de millones de toneladas de biomasa residual combinada, un recurso subutilizado que representa un enorme desafío ambiental (por su disposición), pero también una oportunidad para la economía circular (compost, bioenergía, alimentos animales, extractos funcionales). Respecto a los residuos plásticos en Perú, México y Chile, se generan entre 8.5 y 9.8 millones de toneladas al año de biomasa residual agroindustrial, donde el polietileno de baja densidad (LDPE) constituye la fracción más grande y problemática de los residuos plásticos, debido a su bajo valor post-consumo, facilidad para contaminar el ambiente y dificultad técnica para reciclarlo. El PET, aunque muy visible, es una fracción menor en peso total, pero tiene mayor tasa de recolección por su valor [10], [11].

La pirólisis es una tecnología de conversión termoquímica que consiste en la ruptura de la estructura molecular de una materia prima mediante un tratamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno [12]. Este proceso se lleva a cabo en una atmósfera inerte o deficitaria en oxígeno, utilizando comúnmente gases como nitrógeno o argón para evitar la oxidación de los productos [5], [6], [9]. Generalmente, las temperaturas de operación se encuentran en un rango de 350 °C a 800 °C, dependiendo de la naturaleza de la carga y los resultados deseados [6], [8], [13], [14]. La pirólisis transforma el material sólido en tres fases distintas: un líquido denso (bio-oil), un residuo sólido carbonoso (char) y una mezcla de gases no condensables que incluye hidrógeno, metano y óxidos de carbono [6], [12], [13], [15]. El mecanismo de descomposición térmica es altamente complejo e involucra etapas sucesivas de craqueo, despolimerización, deshidratación y fragmentación molecular [6], [12]. En la biomasa, componentes como la celulosa y hemicelulosa se degradan a temperaturas más bajas, mientras que la lignina requiere mayores niveles térmicos debido a su estabilidad estructural [6], [16]. En el caso de los polímeros sintéticos, la degradación sigue un mecanismo de radicales libres que abarca la iniciación, escisión de cadenas y terminación [6], [8], [13], [16]. Según la velocidad de calentamiento, se clasifica en pirólisis rápida, que maximiza el rendimiento de

líquidos, y pirólisis lenta, que favorece la producción de sólidos [14], [17]. El rendimiento del producto deseado depende de los parámetros operativos como el tipo de reactor, el tamaño de partícula y la velocidad de calentamiento [1], [8]. Finalmente, el uso de catalizadores permite optimizar el proceso al reducir la energía de activación y mejorar la calidad de los combustibles obtenidos [8].

La copirólisis es un proceso de conversión termoquímica que consiste en la descomposición térmica de una mezcla de dos o más materias primas en una atmósfera inerte [6]. Esta tecnología busca superar las limitaciones de la pirólisis convencional de un solo componente mediante el aprovechamiento de efectos sinérgicos, los cuales ocurren cuando la interacción química entre los materiales produce rendimientos o calidades de productos superiores a la suma proporcional de sus partes individuales [6], [8], [18].

Comúnmente, el proceso integra biomasa lignocelulósica con materiales ricos en hidrógeno, como plásticos residuales (polietileno, polipropileno, poliestireno) o neumáticos de desecho [6], [8], [12]. Dado que la biomasa es inherentemente deficiente en hidrógeno, los plásticos actúan como donadores de hidrógeno, lo que eleva la relación hidrógeno/carbono (H/C_{eff}) efectivo y disminuye drásticamente la fracción de compuestos oxigenados corrosivos e inestables [1], [5], [18].

El mecanismo de interacción se basa principalmente en la transferencia de radicales libres [6], [8], [19]. La biomasa suele degradarse primero, liberando radicales activos que inician la fragmentación de las cadenas poliméricas de los plásticos [12], [14], [16]. Además, se favorecen reacciones clave como la de Diels-Alder, donde las olefinas del plástico interactúan con los furanos de la biomasa para producir hidrocarburos aromáticos de alto valor comercial [5], [6], [8], [12], [14].

Esta técnica optimiza la calidad del bio-oil, aumentando su poder calorífico, e incrementa la producción de gases de pirólisis ricos en hidrógeno, mientras reduce la formación de residuos sólidos como el coque [13], [20], [21], [22], [23]. Finalmente, el uso de catalizadores y el control de la temperatura (400-600 °C) resultan cruciales para dirigir la selectividad hacia combustibles sostenibles [8], [16], [24].

Esta revisión sistemática tiene como objetivo explorar la producción de hidrógeno renovable a partir de la copirólisis de la biomasa residual agroindustrial y los residuos plásticos, identificar las características de los estudios, las brechas de investigación y los desarrollos futuros. No obstante, el alcance del presente trabajo se centra específicamente en el rendimiento y la calidad del hidrógeno, por lo que no se analizan las emisiones contaminantes (como HCl, dioxinas o furanos) asociadas al uso de plásticos reales.

II. METODOLOGÍA

La búsqueda, recopilación y categorización de los artículos está basada en la metodología PRISMA [25].

A. Pregunta de investigación

La pregunta principal de la revisión se formuló de la siguiente manera: ¿Qué evidencia experimental (2015-2025) existe sobre la producción de hidrógeno mediante copirólisis de biomasa lignocelulósica o semillas de frutas agroindustriales con desechos plásticos (HDPE, LDPE, PP, PS, PC), y cómo influyen la selección de la materia prima y las condiciones del proceso en el rendimiento de hidrógeno y la composición del gas? La pregunta emerge del análisis PICOC, como se detalla en la Tabla I. Las preguntas de investigación son:

RQ1. ¿Qué evidencia experimental existe (2015–2025) sobre la producción de hidrógeno mediante la copirólisis de biomasa lignocelulósica o semillas agroindustriales de frutas con residuos plásticos?

RQ2. ¿Qué tipos de biomasa lignocelulósica, semillas agroindustriales de frutas y residuos plásticos han sido investigados en procesos de copirólisis orientados a la producción de hidrógeno?

RQ3. ¿Qué configuraciones del proceso de copirólisis (temperatura, relación biomasa/plástico, tiempo de residencia, atmósfera de reacción y uso de catalizadores) se han empleado para favorecer la producción de gas rico en hidrógeno?

RQ4. ¿Cuáles son los rendimientos de hidrógeno y las composiciones gaseosas reportadas en la copirólisis de biomasa o semillas agroindustriales con residuos plásticos?

TABLA I
COMPONENTES DEL ANÁLISIS PICOC

Sigla	Componente	Descripción
P	Problema	Sistemas de copirólisis de biomasa lignocelulósica y/o semillas agroindustriales con residuos plásticos
I	Intervención	Copirólisis térmica (catalítica o no) para producción de gas rico en H_2
C	Comparación	Diferentes materias primas, tipos de plástico y condiciones operativas
O	Resultado	Producción, rendimiento y composición de H_2 en el gas
C	Contexto	Estudios experimentales (2015–2025) en revistas indexadas

B. Procedimiento de búsqueda

Se llevó a cabo la búsqueda en las bases de datos académicas Scopus, WoS Core Collection, IEEE Explore, Google Scholar y Scielo. En el caso de Scopus la cadena de búsqueda avanzada fue:

(TITLE-ABS-KEY("co-pyrolysis" OR copyrolysis OR "co pyrolysis" OR "co-processing") AND TITLE-ABS-KEY(biomass OR lignocellulos OR bagasse OR "sugarcane bagasse" OR straw OR "rice husk" OR "oil palm" OR "fruit seed*" OR "agroindustrial residue*") AND TITLE-ABS-KEY(plastic OR polyethylene OR "PE" OR polypropylene OR "PP" OR polystyrene OR "PS" OR polycarbonate OR "PC") AND TITLE-ABS-KEY(hydrogen OR "H2" OR "hydrogen-rich gas")) AND (LIMIT-TO(PUBYEAR, 2025) OR ... OR LIMIT-TO(PUBYEAR, 2015)) AND (LIMIT-TO(DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-

TO(LANGUAGE, "English") OR LIMIT-TO(LANGUAGE, "Spanish") OR LIMIT-TO(LANGUAGE, "Portuguese"))

Document type: Article

Timespan: 2015–2025

C. Criterios de inclusión y exclusión

En la Tabla II se muestran los criterios de inclusión y exclusión para esta revisión sistemática. Los estudios que evaluaron copirólisis, pero no reportaron composición gaseosa o datos cuantitativos de hidrógeno, fueron excluidos durante la etapa de revisión de texto completo.

TABLA II
CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

Dimensión	Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Tipo de estudio	Estudios experimentales de laboratorio o piloto	Estudios puramente teóricos, de modelado o simulación sin validación experimental
Proceso termoquímico	Copirólisis térmica (catalítica o no catalítica)	Pirólisis individual, gasificación, combustión, reformado u otros procesos distintos a la copirólisis
Materias primas	Biomasa lignocelulósica y/o semillas agroindustriales de frutas combinadas con residuos plásticos (PE, PP, PS, PC)	Estudios que utilicen solo biomasa o solo plásticos
Residuos plásticos	PE (LDPE, HDPE), PP, PS, PC	Otros polímeros no reportados o mezclas sin caracterización
Producto de interés	Producción de gas con datos cuantitativos de H ₂ y composición gaseosa	Estudios que no reporten composición del gas ni contenido de H ₂
Resultados reportados	Rendimiento de gas, fracción de H ₂ , composición gaseosa	Resultados limitados a líquidos o sólidos sin análisis del gas
Periodo de publicación	2015–2025	Publicaciones fuera del periodo definido
Tipo de documento	Artículos científicos revisados por pares	Literatura gris (tesis, libros, reportes técnicos, patentes, páginas web)
Fuentes de información	WoS Core Collection, Scopus, SciELO, Google Scholar (50–100 más relevantes)	Fuentes no indexadas o no verificables
Idioma	Inglés, español, portugués	Otros idiomas
Disponibilidad del texto	Texto completo disponible	Acceso solo a resúmenes o datos incompletos

D. Selección de datos

Después de la búsqueda en las diferentes bases de datos, se identificaron 1050 artículos, se descartaron 748 y se cribaron 302, se consideraron elegibles 96 y, después de la revisión, se eligieron las 50 más relevantes para este análisis (Figura 1). Se priorizaron los estudios experimentales y revisiones sistemáticas sobre copirólisis de biomasa y plásticos para obtener hidrógeno, publicados en inglés entre 2015 y 2025.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Tendencias temporales y geográficas

1) *Tendencia temporal*: El número de publicaciones ha crecido de forma sostenida desde 2015, con un marcado aumento a partir de 2020, reflejando el interés global en la valorización de residuos y la producción sostenible de hidrógeno [2], [5], [6], [8], [17], [19], [20], [26], [27], [28], [29].

2) *Distribución geográfica*: La mayoría de los estudios provienen de Asia (China, India, Malasia), Europa (España, Lituania, Alemania) y América Latina (Brasil, México), con contribuciones relevantes de Estados Unidos y Australia [8], [13], [17], [18], [19], [23], [26], [28], [29], [30], [31], [32].

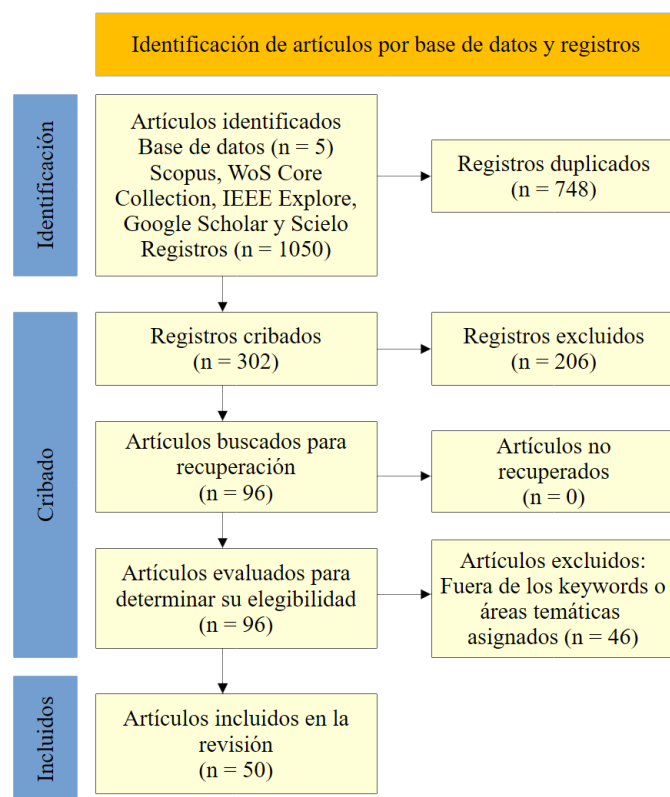


Fig. 1 Diagrama de flujo PRISMA para la selección de registros.

B. Características de los estudios

Los estudios abordan la copirólisis de biomasa lignocelulósica (residuos de palma, caña, arroz, bagazo, paja, etc.) y semillas de frutas agroindustriales (aguacate, mango, uva) mezcladas con plásticos (HDPE, LDPE, PP, PS, PC), empleando diversas configuraciones de reactores (lecho fijo, lecho fluidizado, microondas, plasma, etc.) y catalizadores (Ni, Co, CaO, zeolitas, biochar, etc.) para optimizar la producción de hidrógeno y la calidad del gas generado.

C. Tipos de reactores empleados en la copirólisis

Predominan los estudios a escala de laboratorio donde es típico el uso de TGA y reactores de lecho fijo, mientras que las tecnologías más complejas como el lecho fluidizado,

Auger y CSBR cuentan con una cantidad de investigaciones considerablemente menor debido a los desafíos de escalabilidad y operación continua.

1) *Analizador termogravimétrico*: Constituyen la tecnología más utilizada en estudios experimentales para estudiar la cinética y los mecanismos de reacción de la copirólisis [6].

2) *Reactores de lecho fijo*: Son los más comunes en estudios a escala de laboratorio y operaciones por lotes (batch) debido a su diseño sencillo y bajo costo [15], [32], [33]. Con frecuencia, se configuran como sistemas de dos etapas o de lecho dual (dual-bed), donde en la primera etapa se realiza la descomposición térmica y en la segunda el reformado catalítico, permitiendo optimizar las temperaturas de forma independiente para maximizar la producción de hidrógeno [13], [34].

3) *Reactores de lecho fluidizado*: Son valorados por sus altas tasas de transferencia de masa y calor, lo que permite una distribución de temperatura uniforme [6], [32]. Son los más adecuados para la escalabilidad industrial. Sus principales retos técnicos incluyen la necesidad de partículas pequeñas — tamaños de partículas menores a 2 mm— y el riesgo de desfluidización del lecho debido a la fusión de los plásticos [9], [15], [35].

4) *Reactores de tornillo sin fin (Auger)*: Utilizan un tornillo mecánico para mover y mezclar la materia prima, lo que garantiza un contacto efectivo entre los componentes. Son más eficaces que los de lecho fijo para producir productos de alta calidad y requieren menos gas portador [15], [20], [32].

5) *Reactores de lecho cónico en surtidor (CSBR)*: Esta configuración es particularmente eficiente para manejar mezclas con plásticos, ya que el movimiento cíclico vigoroso de las partículas minimiza la segregación y evita la defluidización provocada por el plástico fundido [17], [32].

6) *Reactores a microondas*: Proporcionan un calentamiento rápido, volumétrico e instantáneo al convertir la radiación electromagnética en energía térmica a nivel molecular. Aunque son altamente eficientes, enfrentan desafíos como la heterogeneidad en la distribución del calor y la formación de puntos calientes al interior del reactor [24], [33], [36].

D. Producción de hidrógeno

La producción de hidrógeno a partir de la copirólisis de la biomasa lignocelulósica, como los residuos agrícolas —paja de trigo, cáscara de arroz, rastrojo de maíz, y maderas como el pino y álamo, etc.— [2], [19], [37] y los residuos plásticos, permite obtener hidrógeno en cantidades variables, como se puede ver en la Tabla III, donde se resumen los experimentos de copirólisis de biomasa y residuos plásticos, las relaciones de biomasa a plástico y los rendimientos de hidrógeno obtenidos.

La producción de hidrógeno mejora drásticamente al mezclar la biomasa lignocelulósica con residuos plásticos ricos en hidrógeno (como LDPE, HDPE y PP), los cuales actúan como donadores de protones para compensar la

deficiencia natural de hidrógeno en la biomasa [5], [13], [38], [39]. Mientras que la pirólisis de la biomasa sola produce aproximadamente 2.1 mmol H₂/g, la copirólisis catalítica ha logrado rendimientos de hasta 25.6 mmol H₂/g en mezclas de píceas y LDPE utilizando sistemas de lecho dual [12]. En términos de porcentaje volumétrico, se han reportado concentraciones de hidrógeno de hasta un 54 % v/v en el gas de pirólisis empleando catalizadores de Ni/Al₂O₃ y mezclas optimizadas de biomasa y plástico [2], [24].

TABLA III
RENDIMIENTO DE HIDRÓGENO EN LA COPIRÓLISIS DE BIOMASA Y RESIDUOS PLÁSTICOS

Copirólisis Biomasa y Plástico	Relación BM : Plástico	Rendimiento de H ₂	Fuente Consultada
Picea (Spruce) + LDPE	1:1	25.6 mmol/g	[12]
Paja (Straw) + PE	5:5	55.45 % v/v	[2]
Abeto de Douglas + LDPE	1:4	72 % v/v	[23]
Bambú + HDPE	80:20	54 % v/v	[24]
Aserrín de pino + HDPE	5:5	80.36 mmol/g	[40]
Aserrín de pino + PP	5:5	59.35 mmol/g	[40]
Aserrín de pino + PS	5:5	38.51 mmol/g	[40]
Aserrín de pino + LDPE	5:5	115.33 mmol/g	[35]
Álamo (Poplar) + LDPE	1:1	24.1 mmol/g	[21]
Paja (Straw) + PE	5:5	13.56 mmol/g	[31]
Tallos de algodón + PP	1:1	37.9 % v/v	[33]
Aserrín de pino + HDPE	25:75	31.4 % m/m	[17]
Celulosa + LDPE	1:2	5.12 mmol	[4]
Pino + Poliestireno (PS)	1:1	80 % de incremento	[37]
Lodos de depuradora + RS	1:1	29.82 %	[15]

- Rendimiento en % v/v es la concentración de H₂ en la mezcla gaseosa final.
- Los valores en mmol/g son la cantidad molar de H₂ producida por cada gramo de materia prima alimentada al reactor.

La producción del hidrógeno se ve influenciada por:

1) *Temperatura*: Para maximizar el rendimiento de hidrógeno en la copirólisis de biomasa y plásticos, el rango de temperatura óptimo se ubica entre 600 °C y 800 °C [22], [34], [40]. La producción de hidrógeno es un proceso altamente endotérmico que se ve favorecido por temperaturas elevadas, las cuales promueven el craqueo secundario de los volátiles y las reacciones de reformado [19].

Entre las configuraciones más eficientes para la producción de hidrógeno se hallan los sistemas de dos etapas; la pirólisis inicial de la mezcla se realiza a unos 500 °C para asegurar la desvolatilización completa de la biomasa y el plástico [17], [19]. Posteriormente, los vapores resultantes se dirigen a una segunda etapa de reformado catalítico operada entre 600 °C y 800 °C [17]. Este proceso tiene un umbral mínimo y se ha observado que las tasas de reacción para el reformado de volátiles son significativamente bajas por debajo de los 600 °C, lo que limita la formación de gas rico en

hidrógeno [17]. Al aumentar la temperatura de 550 °C a 850 °C, el rendimiento de hidrógeno puede incrementarse drásticamente (por ejemplo, de 0.30 a 3.68 mmol/g) debido a la aceleración del craqueo térmico de los condensados [29].

La temperatura óptima varía según la estructura molecular del polímero [34], [40]. Mientras que el HDPE y el PP logran rendimientos altos a 700 °C, plásticos con estructuras aromáticas más estables como el poliestireno (PS) requieren temperaturas de al menos 800 °C para romper sus cadenas eficazmente [35], [40].

Las altas temperaturas promueven la liberación de radicales de hidrógeno de los plásticos, los cuales actúan como donadores para estabilizar los radicales oxigenados de la biomasa, reduciendo la formación de coque y char mientras se enriquece la fase gaseosa [2], [15], [22].

El efecto sinérgico entre los radicales libres de la biomasa y el plástico facilita la fragmentación de las cadenas poliméricas, lo que incrementa la producción de gases y reduce la generación de alquitranes (tars) [2], [15], [22].

Aunque los rendimientos de hidrógeno pueden seguir aumentando a temperaturas superiores a 800 °C (llegando incluso a los 1050 °C), el incremento suele ser menos significativo en comparación con el alto consumo de energía requerido para alcanzar esos niveles. Por ello, muchos estudios consideran los 700 °C o 800 °C como el punto de equilibrio óptimo para aplicaciones industriales [2], [34], [35], [40].

Mientras la pirólisis convencional de la biomasa ocurre a temperaturas medias, la copirólisis orientada a la producción de hidrógeno requiere condiciones más severas (>600 °C) para romper las cadenas de hidrocarburos de los plásticos y reformar los compuestos oxigenados de la biomasa.

2) *Catalizadores*: Los catalizadores actúan reduciendo la energía de activación y la temperatura necesaria para la reacción, aumentando la selectividad hacia la producción de hidrógeno y disminuyendo la formación de subproductos como el alquitrán y los ácidos corrosivos.

Los catalizadores más empleados en los estudios experimentales son:

Zeolitas (HZSM-5): Son los más estudiados debido a su fuerte acidez y estructura de poros que favorece la aromatización. El HZSM-5 es el catalizador de referencia. Los sitios ácidos de Brønsted promueven la deshidratación de azúcares de la biomasa y el craqueo de plásticos, facilitando reacciones de Diels-Alder para producir benceno, tolueno y xilenos (BTX). También se reportan zeolitas de poros grandes como HY y HBeta para procesar moléculas voluminosas, aunque suelen generar más coque que la ZSM-5 [8], [14], [20].

Catalizadores a base de carbono: El carbón activado favorece el craqueo y la desoxigenación. Al ser funcionalizado con grupos ácidos (como HSO₃) o metales, mejora la producción de biocombustibles para aviación. El biochar actúa como un soporte catalítico económico y sostenible. Cuando se modifica con metales como el níquel, aumenta

significativamente la selectividad hacia el hidrógeno en el gas de síntesis [2], [8].

Óxidos metálicos: Estos materiales son valorados por su capacidad para desoxigenar el aceite de pirólisis y mitigar contaminantes. El óxido de calcio (CaO) es muy efectivo para absorber CO₂ in situ, lo que desplaza el equilibrio químico para maximizar la producción de H₂. También neutraliza ácidos y mitiga la emisión de HCl en plásticos clorados como el PVC. El MgO y ZnO promueven la cetonización de ácidos orgánicos y la condensación de aldehídos, lo que reduce la corrosividad del aceite de pirólisis y aumenta su estabilidad térmica [8], [14], [29], [41].

Sistemas modificados y bifuncionales: Para superar limitaciones como la formación de coque, se desarrollan catalizadores complejos como los metales de transición (Ni, Co, Fe, Zn). El níquel es el más utilizado para romper enlaces C-C y C-H, maximizando el rendimiento de hidrógeno. La incorporación de metales en zeolitas o carbón mejora la transferencia de hidrógeno desde el plástico hacia la biomasa. El uso secuencial (ej. CaO seguido de HZSM-5) permite una desoxigenación inicial antes de que los vapores entren en los poros de la zeolita, extendiendo la vida útil del catalizador y optimizando la calidad del hidrocarburo final [38], [40], [42].

3) *Índice de hidrógeno efectivo (H/C_{eff})*: Es un parámetro empleado para comparar la cantidad relativa de átomos de hidrógeno disponibles en diferentes materias primas para su conversión en hidrocarburos. Este índice permite estimar la calidad del combustible y la eficiencia con la que una biomasa o plástico puede transformarse en productos de alto valor, como aromáticos y olefinas, sin generar un exceso de residuos sólidos o coque [6], [20].

La importancia del H/C_{eff} radica en que no todo el hidrógeno presente en una materia prima está disponible para formar combustibles; una parte se consume al reaccionar con otros elementos presentes. Químicamente, el cálculo se basa en la composición elemental molar de la muestra según (1):

$$H/C_{eff} = \frac{H - 2O - 3N - 2S}{C} \quad (1)$$

Donde H, O, N, S y C representan los moles de hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y carbono, respectivamente [6], [15], [16].

Como la biomasa es rica en oxígeno, gran parte de su hidrógeno se pierde en forma de agua (H₂O) durante la pirólisis mediante reacciones de deshidratación. Si el H/C_{eff} es menor a 1, el proceso de mejora sobre catalizadores como el HZSM-5 se vuelve ineficiente, provocando una rápida desactivación del catalizador por la formación masiva de coque. Como la biomasa tiene un índice naturalmente bajo, se mezcla con plásticos (ricos en hidrógeno) para elevar el H/C_{eff} de la mezcla, con el objetivo de reducir la formación de lodos, mejorar la estabilidad del aceite de pirólisis obtenido y enriquecer los gases de pirólisis con más hidrógeno [8], [5], [43].

TABLA IV
ÍNDICE DE HIDRÓGENO EFECTIVO

Biomasa	H/C _{eff}	Plásticos	H/C _{eff}
Lignina	0 a 0.3	Poliestireno (PS)	1.11 a 1.12
Paja de arroz (Rice straw)	0.1	Polietileno (PE)	1.83 a 1.98
Cáscara de arroz (Rice husk)	-0.54	Polipropileno (PP)	1.56 a 1.67
Álamo (Poplar)	0.22	LDPE / HDPE	2.09
Bagazo de caña	-0.23	Diésel	2

No siempre un mayor H/C_{eff} (derivado de un exceso de plástico) se traduce en más gas. Se ha observado que, aunque un aumento en el contenido de plástico mejora el rendimiento de H₂ hasta cierto punto, un exceso de plástico (por encima del 40% en algunos casos) puede inhibir la liberación de radicales de la biomasa necesarios para las reacciones de reformado, lo que finalmente restringe la producción total de gas [40].

En conclusión, un H/C_{eff} superior a 1.0 es el umbral deseado para considerar que un producto de pirólisis puede ser adecuado como combustible líquido o que el gas de pirólisis va a contener más hidrógeno.

E. Tamaño de muestra

Para la biomasa, los tamaños varían dependiendo de la materia prima y el tipo del sistema de alimentación del reactor. Se han reportado partículas de aserrín de pino tamizadas en un rango de 1 a 2 mm para garantizar el flujo continuo en los alimentadores de sólidos [32]. En otros casos, se utiliza biomasa molida con tamaños de partícula menores a 250 µm [22], [34]. Investigaciones con cascarrilla de arroz reportan rangos de 0.18 a 0.45 mm, mientras que el uso de polvos de xilano puede llegar a tamaños de 90 a 100 µm [41], [44].

En cuanto a los plásticos, las dimensiones se ajustan para facilitar el contacto con la matriz de biomasa: Las partículas de polietileno (HDPE, LDPE) o polipropileno (PP) tienen dimensiones menores a 5 mm [34], [35]. Se han empleado polvos plásticos muy finos en el rango de 90 a 100 µm para mezclas físicas de alta homogeneidad [41]. En pretratamientos mecánicos más intensos, se reporta el uso de chips de plástico que no exceden los 25 x 25 mm para asegurar una exposición térmica uniforme durante el proceso [9].

Se emplea una baja proporción de plásticos (0.25 – 10 % de plástico) cuando se estudia la valorización de residuos agrícolas “reales”. Mezclas intermedias (10 – 50 % plástico) son frecuentes para investigar las sinergias en el rendimiento y calidad de los productos. Altas fracciones de plástico (>50 % plástico) se han empleado para maximizar la producción de hidrocarburos y estudiar sus propiedades fisicoquímicas [3].

F. Brechas de investigación y desarrollos futuros

En la Tabla V se resumen las brechas de investigación de la copirólisis de la biomasa lignocelulósica y los residuos plásticos.

1) *Materia prima*: Se ha identificado la falta de estudios sistemáticos por tipo de biomasa (duras, blandas, residuos

agrícolas específicos) y mezcla con residuos plásticos reales (mezclas PE/PP/PET/PVC, plásticos contaminados); la mayoría de los estudios trabaja con unos pocos pares “modelo”, como el aserrín, bambú, cáscara de nuez y PE/PP/PS/PET [5], [14], [16].

Poca integración de propiedades elementales (H/C_{eff}, O/C) en un marco de diseño predictivo de mezclas; se discuten conceptos, pero se usan de forma fragmentaria [5], [14], [16].

Escasez de trabajos que consideren impurezas reales y pretratamiento de residuos plásticos (lavado, tamaño, aditivos) sobre sinergias y composición del aceite [5], [8].

TABLA V
BRECHAS DE INVESTIGACIÓN

Área	Brecha investigación	Fuente
Materia prima	Pocos estudios sistemáticos por familias de biomasa y mezclas plásticas reales. No hay estudios sobre la copirólisis de frutas agroindustriales y plásticos.	[16]
Mecanismos	Sinergias poco cuantificadas y generalizables.	[1], [16]
Modelización	Escaso uso de Machine Learning y modelos predictivos integrados.	[8]
Escalado	Falta de estudios piloto e industriales con TEA/LCA.	[1], [14]
Catalizadores	Catalizadores robustos y selectivos para residuos reales aún limitados.	[14], [45]

- TEA: Análisis técnico económico – LCA: Análisis de ciclo de vida

2) *Mecanismos y modelización*: Aunque se han propuesto mecanismos por radicales libres y se han distinguido efectos físicos y químicos, aún se requiere cuantificar y generalizar las sinergias más allá de sistemas muy específicos [1], [16], [35]. Hay un limitado uso de modelos cinéticos unificados que integren biomasa más distintos polímeros y permitan extrapolar a nuevas mezclas [45]. Se demanda el desarrollo de modelos de aprendizaje automático para optimizar condiciones, predecir rendimientos y composición de productos, apenas explorados hasta ahora [8], [46].

3) *Escalado y aspectos económicos/ambientales*: La mayoría de los estudios son a escala de laboratorio (TGA, lecho fijo, Py-GC/MS); faltan demostraciones a escala piloto/industrial con balances de energía y masa completos [14]. Hay pocos análisis técnico-económicos y de ciclo de vida específicos para la copirólisis biomasa-plásticos, pese a que se menciona repetidamente la necesidad de evaluar viabilidad y costos. Brecha en emisiones y control ambiental (NO_x, SO_x, HCl, microcontaminantes) bajo distintas mezclas y catalizadores [1], [8].

4) *Catalizadores*: Se requiere diseñar catalizadores más selectivos y estables (incluyendo bases y materiales bifuncionales) que minimicen coque, cloro y compuestos oxigenados, y que funcionen con residuos reales [14], [45]. Faltan estudios integrales que relacionen líquido de pirólisis

más gas combustible para optimizar simultáneamente ambas fracciones y no solo el aceite de pirólisis [8].

5) *Biomasa agroindustrial*: Hay estudios de copirólisis de semillas/residuos específicos (p. ej., semillas de Samanea saman, semillas de neem) con plásticos o PET, centrados en cinética y optimización de rendimientos [47], [48]. No se identifican trabajos dedicados a semillas de palta/aguacate o mango y plásticos para la producción de hidrógeno [47], [48]. Por tanto, las brechas identificadas son la ausencia de datos sobre la composición, cinética y productos de la copirólisis de las semillas de palta/mango con plásticos. Falta de comparación de estas semillas con otros residuos oleaginosos/lignocelulósicos en términos de sinergias, calidad de aceite y valor del carbón. No hay estudios que exploren su potencial local/regional como carga a procesos de copirólisis.

IV. CONCLUSIÓN

La copirólisis de la biomasa lignocelulósica y semillas de frutas agroindustriales con residuos plásticos es una vía prometedora para la producción sostenible de hidrógeno, con rendimientos que dependen fuertemente de la selección de materias primas, catalizadores y condiciones operativas. Los reactores de lecho fijo y fluidizado son los más empleados, con tamaños de muestra de laboratorio (1–50 g) y relaciones biomasa:plástico de 1:1 o 3:1. La caracterización de la materia prima y los productos es exhaustiva, aunque la falta de estandarización y la limitada extrapolación a escala industrial representan desafíos clave. La tendencia global muestra un crecimiento acelerado en la investigación y desarrollo de esta tecnología, con resultados alentadores para su escalado industrial y contribución a la economía circular y la gestión de residuos.

Los valores más altos en la producción de hidrógeno reportados en la copirólisis catalítica de la biomasa y los plásticos oscilan entre 37 y 115 mmol H₂/g de mezcla, o concentraciones de 37 % v/v a 86 % v/v de H₂ en el gas producido, dependiendo del tipo de biomasa, plástico, catalizador y condiciones operativas. El uso de catalizadores (Ni, Co, CaO, zeolitas), la proporción óptima de la biomasa:plástico (usualmente 1:1 o 3:1), temperaturas entre 600–850 °C, y la adición de vapor de agua o microondas, son determinantes para maximizar el rendimiento de H₂ y minimizar los subproductos indeseados (CO, CO₂, alquitrán, HCl). Se observa una clara sinergia entre biomasa y plásticos, donde los plásticos actúan como donadores de hidrógeno y mejoran la calidad del gas y del aceite de pirólisis.

La brecha de investigación más amplia se reporta en la copirólisis de frutas agroindustriales (aguacate/palta, mango, etc.) y plásticos para la obtención de hidrógeno; a la fecha no hay publicaciones al respecto.

AGRADECIMIENTOS

A la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica.

Al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

REFERENCIAS

- [1] K. Ansari, S. Hassan, R. Bhoi, and E. Ahmad, “Co-pyrolysis of biomass and plastic wastes: A review on reactants synergy, catalyst impact, process parameter, hydrocarbon fuel potential, COVID-19,” *J. Environ. Chem. Eng.*, 2021, doi: 10.1016/j.jece.2021.106436.
- [2] R. Mishra, H. C. Ong, and C. Lin, “Progress on co-processing of biomass and plastic waste for hydrogen production,” *Energy Convers. Manag.*, 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.116983.
- [3] I. Jovancicevic, V. Antić, and J. Schwarzbauer, “Co-pyrolysis of corn stalks and plastic waste: Chemical composition of the pyrolyzates as a base for producing environmentally sustainable fuels,” *Hem. Ind.*, vol. 79, no. 3, pp. 179–189, 2025, doi: 10.2298/hemind240608010j.
- [4] A. Boules, B. Tabu, E. Brack, T. Alexander, J. H. Mack, and J. Trelles, “Hydrogen production synergy in non-thermal plasma copyrolysis of low-density polyethylene and cellulose,” *Int. J. Hydrogen Energy*, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.04.005.
- [5] M. H. Rahman, P. Bhoi, and P. Menezes, “Pyrolysis of waste plastics into fuels and chemicals: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113799.
- [6] K. Anshu, H. Kenttämä, and S. Thengane, “A comprehensive review on co-pyrolysis of lignocellulosic biomass and polystyrene,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114832.
- [7] V. Kudelytė, J. Eimontas, R. Paulauskas, and N. Striūgas, “Co-Pyrolysis of Plastic Waste and Lignin: A Pathway for Enhanced Hydrocarbon Recovery,” *Energies*, 2025, doi: 10.3390/en18020275.
- [8] F. Mo, H. Ullah, N. Zada, and A. Shahab, “A Review on Catalytic Co-Pyrolysis of Biomass and Plastics Waste as a Thermochemical Conversion to Produce Valuable Products,” *Energies*, 2023, doi: 10.3390/en16145403.
- [9] N. Unsomsri *et al.*, “Biogasoline production from co-pyrolysis of fresh palm fruit bunches and medical plastic waste for use in spark-ignition engines,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 2025, doi: 10.1016/j.jaap.2025.107332.
- [10] OECD, *Global Plastics Outlook*. 2022. doi: 10.1787/de747aef-en.
- [11] R. Geyer, J. R. Jambeck, and K. L. Law, “Production, use, and fate of all plastics ever made,” *Sci. Adv.*, vol. 3, no. 7, pp. 25–29, 2017, doi: 10.1126/sciadv.1700782.
- [12] M. Jędrzejczyk, S. Górecka, K. Pacultová, and J. Grams, “Efficient dual-bed co-pyrolysis of lignocellulosic biomass and plastic to hydrogen-rich gas,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 165, no. January, 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.150770.
- [13] I. De Carvalho Guimarães, M. S. De Sá, T. Martins, and A. Wisniewski, “Assessment of Co-Pyrolysis of Polypropylene with Triacylglycerol-Based Waste Biomass to Obtain Sustainable Hydrocarbons,” *Sustain. Chem.*, 2025, doi: 10.3390/suschem6020012.
- [14] H. Ryu, D. H. Kim, J. Jae, S. Lam, E. Park, and Y. Park, “Recent advances in catalytic co-pyrolysis of biomass and plastic waste for the production of petroleum-like hydrocarbons,” *Bioresour. Technol.*, p. 123473, 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123473.
- [15] E. Babayiğit, D. Alper, E. Çokgör, H. C. Okutan, and A. Sarioğlan, “High temperature pyrolysis of sewage sludge: Synergistic effects of co-pyrolysis with rice straw and composite plastics wastes,” *Heliyon*, vol. 10, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39737.
- [16] W. Chang *et al.*, “Recent progress on the synergistic preparation of liquid fuels by co-pyrolysis of lignocellulosic biomass and plastic wastes,” *J. Energy Inst.*, 2025, doi: 10.1016/j.joei.2025.102019.
- [17] L. Santamaria *et al.*, “Progress on Catalyst Development for the Steam Reforming of Biomass and Waste Plastics Pyrolysis Volatiles: A Review,” *Energy & Fuels*, vol. 35, pp. 17051–17084, 2021, doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c01666.
- [18] J. N. Salvilla, B. I. Ofrasio, A. Rollon, F. Manegdeg, R. Abarca, and M. Luna, “Synergistic co-pyrolysis of polyolefin plastics with wood and agricultural wastes for biofuel production,” *Appl. Energy*, vol.

- 279, p. 115668, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115668.
- [19] I. Mensah, J. Ahiekpor, E. Bensah, S. Narra, B. Amponsem, and E. Antwi, "Recent Development of Biomass and Plastic Co-Pyrolysis for Syngas Production," *Chem. Sci. Int. J.*, 2022, doi: 10.9734/csji/2022/v31i130275.
- [20] M. Ahmed, N. Batalha, H. Mahmudul, G. Perkins, and M. Konarova, "A review on advanced catalytic co-pyrolysis of biomass and hydrogen-rich feedstock: Insights into synergistic effect, catalyst development and reaction mechanism," *Bioresour. Technol.*, p. 123457, 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123457.
- [21] M. Jędrzejczyk, A. Podlaska, K. Cieluch, R. Ryczkowski, J. Goscińska, and J. Grams, "La-doped Ni/ZrO₂ catalyst for the production of H₂-rich gas by upgrading vapors coming from pyrolysis of biomass and co-pyrolysis of biomass with plastic," *Int. J. Hydrogen Energy*, 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.09.231.
- [22] G. Li *et al.*, "Enhanced biofuel production by co-pyrolysis of distiller's grains and waste plastics: A quantitative appraisal of kinetic behaviors and product characteristics," *Chemosphere*, p. 140137, 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.140137.
- [23] R. Zou *et al.*, "Catalytic co-pyrolysis of solid wastes (low-density polyethylene and lignocellulosic biomass) over microwave assisted biochar for bio-oil upgrading and H₂ production," *J. Clean. Prod.*, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133971.
- [24] N. Saifuddin, P. Priatharsini, and S. Hakim, "Microwave-assisted co-pyrolysis of Bamboo biomass with plastic waste for hydrogen-rich syngas production," *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 13, pp. 511–521, 2016, doi: 10.3844/ajassp.2016.511.521.
- [25] J. J. Yepes-Núñez, G. Urrútia, M. Romero-García, and S. Alonso-Fernández, "The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews," *Rev. Esp. Cardiol.*, vol. 74, no. 9, pp. 790–799, 2021, doi: 10.1016/j.recresp.2021.06.016.
- [26] P. Yek *et al.*, "Co-processing plastics waste and biomass by pyrolysis–gasification: a review," *Environ. Chem. Lett.*, pp. 171–188, 2024, doi: 10.1007/s10311-023-01654-7.
- [27] R. Mishra, C.-M. Shu, A. Gollakota, and S.-Y. Pan, "Unveiling the potential of pyrolysis-gasification for hydrogen-rich syngas production from biomass and plastic waste," *Energy Convers. Manag.*, 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2024.118997.
- [28] S. B. E. Esso *et al.*, "Review on synergistic effects during co-pyrolysis of biomass and plastic waste: Significance of operating conditions and interaction mechanism," *Biomass and Bioenergy*, 2022, doi: 10.1016/j.biombioe.2022.106415.
- [29] Y. Tang *et al.*, "Hydrogen-Rich and Clean Fuel Gas Production from Co-pyrolysis of Biomass and Plastic Blends with CaO Additive," *ACS Omega*, vol. 7, pp. 36468–36478, 2022, doi: 10.1021/acsomega.2c04279.
- [30] J. Chattopadhyay, T. Pathak, R. Srivastava, and A. Singh, "Catalytic co-pyrolysis of paper biomass and plastic mixtures (HDPE (high density polyethylene), PP (polypropylene) and PET (polyethylene terephthalate)) and product analysis," *Energy*, vol. 103, pp. 513–521, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.03.015.
- [31] Y. Zhang *et al.*, "Preparation of Ni-La/Al₂O₃-CeO₂-Bamboo Charcoal Catalyst and Its Application in Co-pyrolysis of Straw and Plastic for Hydrogen Production," *BioEnergy Res.*, vol. 15, pp. 1501–1514, 2021, doi: 10.1007/s12155-021-10359-0.
- [32] A. Arregi *et al.*, "Hydrogen-rich gas production by continuous pyrolysis and in-line catalytic reforming of pine wood waste and HDPE mixtures," *Energy Convers. Manag.*, vol. 136, pp. 192–201, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.01.008.
- [33] L. Li, L. Shi, Z. Zhang, G. Sun, and Z. Li, "Research on the mechanism of hydrogen production by catalytic fast co-pyrolysis of cotton stalks and polypropylene: An experimental and theoretical study," *Biomass and Bioenergy*, 2024, doi: 10.1016/j.biombioe.2024.107459.
- [34] J. Bobek-Nagy, N. Gao, C. Quan, N. Miskolczi, D. Rippel-Pethő, and K. Kovacs, "Catalytic co-pyrolysis of packaging plastic and wood waste to achieve H₂ rich syngas," *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, pp. 10832–10845, 2020, doi: 10.1002/er.5741.
- [35] Y. Chai, N. Gao, M. Wang, and C. Wu, "H₂ production from co-pyrolysis/gasification of waste plastics and biomass under novel catalyst Ni-CaO-C," *Chem. Eng. J.*, vol. 382, p. 122947, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.ccej.2019.122947.
- [36] Y. Shen, "Microwave-assisted Pyrolysis of Biomass and Plastic Wastes for Hydrogen Production," *Green Chem.*, 2025, doi: 10.1039/d5gc03030g.
- [37] K. Burra, X. Liu, Z. Wang, J. Li, D. Che, and A. Gupta, "Quantifying the sources of synergistic effects in co-pyrolysis of pinewood and polystyrene," *Appl. Energy*, vol. 302, p. 117562, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117562.
- [38] P. Li *et al.*, "Enhancement of hydrogen-rich gas production by co-pyrolysis of biomass and plastics: Feedstock synergistic effects and Ni/Co modified biochar-based catalysts," *Fuel*, 2025, doi: 10.1016/j.fuel.2024.134184.
- [39] Z. Wang *et al.*, "Plastic regulates its co-pyrolysis process with biomass: Influencing factors, model calculations, and mechanisms," vol. 10, 2022, doi: 10.3389/fevo.2022.964936.
- [40] Y. Chai, M. Wang, N. Gao, Y. Duan, and J. Li, "Experimental study on pyrolysis/gasification of biomass and plastics for H₂ production under new dual-support catalyst," *Chem. Eng. J.*, 2020, doi: 10.1016/j.ccej.2020.125260.
- [41] J. Weng *et al.*, "Online evaluation of catalytic co-pyrolysis of hemicellulose and polypropylene over CaO catalyst," *Fuel*, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125993.
- [42] L. Liu, G. Xu, J. Wang, G. Li, C. He, and Y. Jiao, "Co-pyrolysis of biomass and plastic waste based on ReaxFF MD: Insights into hydrogen migration, radicals interactions and synergistic mechanism," *Energy*, 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.136103.
- [43] Y. Zheng, L. Tao, X. Yang, Y. Huang, C. Liu, and Z. Zheng, "Study of the thermal behavior, kinetics, and product characterization of biomass and low-density polyethylene co-pyrolysis by thermogravimetric analysis and pyrolysis-GC/MS," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 133, pp. 185–197, 2018, doi: 10.1016/j.jaap.2018.04.001.
- [44] D. Xu, Y. Xiong, J. Ye, Y. Su, Q. Dong, and S. Zhang, "Performances of syngas production and deposited coke regulation during co-gasification of biomass and plastic wastes over Ni/γ-Al₂O₃ catalyst: Role of biomass to plastic ratio in feedstock," *Chem. Eng. J.*, vol. 392, p. 123728, 2020, doi: 10.1016/j.ccej.2019.123728.
- [45] X. Zhang, H. Lei, S. Chen, and J. Wu, "Catalytic co-pyrolysis of lignocellulosic biomass with polymers: a critical review," *Green Chem.*, vol. 18, pp. 4145–4169, 2016, doi: 10.1039/c6gc00911e.
- [46] D. Bhushan, S. Hooda, and P. Mondal, "Co-pyrolysis of biomass and plastic wastes and application of machine learning for modelling of the process: A comprehensive review," *J. Energy Inst.*, vol. 119, no. January, p. 101973, 2025, doi: 10.1016/j.joei.2025.101973.
- [47] A. W. Gin, H. Hassan, M. A. Ahmad, B. H. Hameed, and A. T. Mohd Din, "Recent progress on catalytic co-pyrolysis of plastic waste and lignocellulosic biomass to liquid fuel: The influence of technical and reaction kinetic parameters," *Arab. J. Chem.*, vol. 14, no. 4, p. 103035, 2021, doi: 10.1016/j.arabjc.2021.103035.
- [48] T. P. S. Livingston, P. Madhu, C. S. Dhanalakshmi, and V. Ayyakkannu, "Non-catalytic and catalytic co-pyrolysis of neem seed cake and plastic waste: An experimental investigation on product distribution, synergistic interaction and characterization," *ACTA Paul. Enferm.*, vol. 97, no. 2.0, pp. 1–19, 2025, doi: 10.1590/0001-3765202520241284.