

DESARROLLO DEL RECICLADO DE PLÁSTICOS EN EL SIGLO XX y PERSPECTIVAS EN EL SIGLO XXI

Carlos Federico Jasso Gastinel, Pedro Ortega Gudiño

Departamento de Ingeniería Química, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), Universidad de Guadalajara, Blvd. Marcelino García Barragán #1421, esq. Calzada Olímpica, C.P. 44430, Guadalajara, Jalisco, México.
Correo electrónico: carlos.jasso@ucei.udg.mx

Recibido: Noviembre 2022; Aceptado: Diciembre 2022

RESUMEN

Este trabajo de revisión realiza un análisis, tomando como punto de partida el desarrollo del reciclado de plásticos dentro de la ciencia e ingeniería de los polímeros en el siglo pasado, las estrategias rumbo a la economía circular de este tipo de materiales y la perspectiva que la academia e industria enfrentan en la actualidad.

Palabras Clave: polímeros, economía circular, plásticos, reciclado.

ABSTRACT

This review work carries out an analysis, taking as a starting point the development of plastics recycling in polymer science and engineering in the last century, the strategies towards the circular economy of this type of materials and the perspective that academia and industry face at the present time.

Keywords: polymers, circular economy, plastics, recycling.

INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico mundial en el siglo XX fue mayor que en toda la historia previa de la humanidad. Sin embargo, la falta de atención sobre el medio ambiente ha llevado al deterioro de la biósfera. Ello, ha ido dificultando el mantenimiento de la calidad de vida de la humanidad en las grandes ciudades. Los resultados, no sólo han provocado el nacimiento de una reglamentación ecológica en diversos países, sino que ahora se están tratando de encontrar caminos económicos que permitan reutilizar los materiales, además de acudir a la conciencia de los consumidores para disminuir las corrientes de desechos. Como parte de los desechos sólidos, los residuos plásticos se generan cuando los plásticos se producen o se convierten a productos y a partir del postconsumo de tipo industrial, comercial y doméstico. Su presencia en los vertederos de basura se estimó en un 7.4 % en peso (16.65% en volumen) y su aparente "indestructibilidad química" es la principal causante de que se le acuse como un contaminante de larga duración.

En realidad, todos los residuos urbanos causan problemas por las condiciones en que por largo tiempo se ha dispuesto de ellos. Como ejemplo puede mencionarse que en los vertederos se han encontrado periódicos prácticamente intactos que datan de hace veinte años o más.

Si se cree que los plásticos son más contaminantes que otros materiales y que por lo tanto debe proponerse su sustitución, encontrando así aparentemente una alternativa simple para evitar los residuos plásticos, se pueden comparar algunos datos específicos: la elaboración de una bolsa de papel requiere cinco veces más gasto de energía que la elaboración de una bolsa de plástico de iguales

dimensiones y en los vertederos las bolsas de papel ocupan diez veces más volumen que las de polietileno.

A principio de la década de los años noventa del siglo pasado, se reportaba que las plantas de celulosa dedicadas a la elaboración de bolsas causaban graves emisiones sulfurosas, mismas que se han reducido significativamente al avance de la tecnología de proceso [1]. Aunado a lo anterior, es fácil de observar el comparativo que para hacer 25,000 bolsas de polietileno se requieren 500 kg de tal material, mientras que, para hacerlas de papel, se requieren 4,000 kg de madera. Globalmente en el ramo de envasado, el volumen de residuos aumentaría en un 256 por 100 al sustituir a los plásticos, el peso en un 413 por 100, el consumo energético en un 201 por 100 y los costos de envasado en un 211 por 100. Al comparar los requerimientos energéticos de producción entre objetos de metal y de plástico, se nota la clara diferencia en favor de los plásticos. Ello puede observarse en la Figura 1.

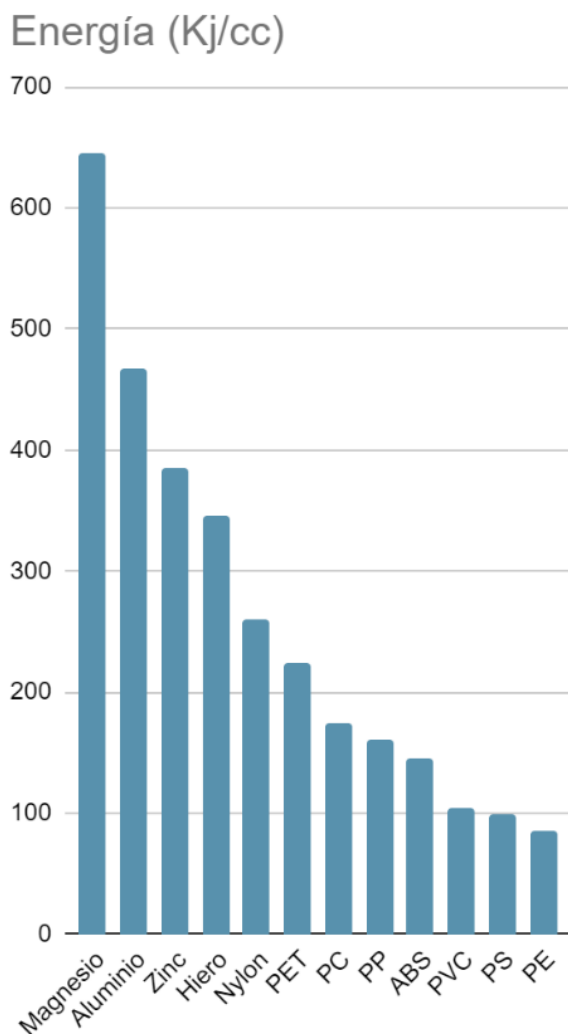


Fig. 1. Requerimientos energéticos para producir metales y plásticos.

Puede verse entonces, que la sustitución de los plásticos no es un camino en favor de la ecología; en general, las soluciones deben enfocarse a eliminar y evitar los vertederos como tales, además de a tratar de reaprovechar en todo lo posible, los materiales que tienen energía de transformación acumulada, y que pueden también contribuir a disminuir la producción de material "virgen", que a su vez implica más consumo de recursos naturales para producir la energía necesaria para transformarlos.

En términos generales, los plásticos pueden incinerarse, degradarse o reutilizarse. El término reciclado puede utilizarse para abarcar las diversas opciones que se tienen al aprovechar los residuos plásticos de alguna manera. La Tabla 1, muestra una clasificación que facilita la terminología en este campo [2].

Tabla 1. Tipos de Reciclado de Plásticos de Postconsumo.

Proceso.	Concepto.	Observaciones.
Primario.	Procesado de residuos plásticos, obteniendo productos con propiedades similares a las "originales".	Se facilita mediante agentes de refuerzo.
Secundario.	Procesado de residuos plásticos, obteniendo productos que requieren menor demanda en propiedades que las "originales".	La degradación del material es notoria por su uso y/o reprocesamiento.
Terciario.	Recuperación de sustancias químicas a partir de desechos plásticos.	Por ejemplo, al obtener algunos monómeros u otras sustancias por pirólisis.
Cuaternario.	Recuperación de energía a partir de desechos plásticos.	Al reducirse volumen se aprovecha su poder calorífico como combustible.

En este enfoque, la degradación química sin reaprovechamiento de algún tipo, no se incluye en el esquema, como tampoco lo sería la incineración cuando no se aprovecha la energía de combustión, aunque no debe olvidarse que, en este último caso, el objetivo es reducir el volumen de desecho de una forma controlada.

El caso de la degradación química con el propósito de evitar contaminación ha causado fuerte controversia en años recientes; hasta el momento subsiste la pregunta si debe o no procurarse en el ecosistema. Es innegable que en aplicaciones tales como suturas quirúrgicas, transplante de recipientes agrícolas [3], o por ejemplo absorción de agua en tierras de cultivo, la degradación posterior es necesaria; sin embargo, puede también considerarse (y de hecho se utiliza) cuando se aplican "colchas" sobre suelos agrícolas (para protección y retención de humedad en cultivos), que no requieren ser separados para la nueva siembra, aunque debe considerarse que la degradación de esta películas no cumpla con el ciclo vital y termine siendo consumida por el fuego utilizado en ciertos campos para regenerar los terrenos [4]; cabe también proponerse para la elaboración de una mezcla de basura plástica (si se logra una degradación considerable en tiempos cortos) con estiércol para abono y para deshacerse de la basura plástica que va a dar al océano (produciendo problemas de microplásticos) o a comunidades alejadas de los centros urbanos, donde los gastos de recolección y transporte no hacen rentable la operación de reciclado. Aún más, transitoriamente puede tener cabida mientras no se llegue a un reciclado masivo de los diversos materiales plásticos. Por todo ello, antes de entrar a la descripción de los diversos tipos de reciclado, es importante describir algunos de los esfuerzos que se han realizado para tratar de lograr la degradación química de los plásticos de gran consumo, con el afán de reintegrar dichos materiales a la naturaleza.

Degradación química

Los caminos de la degradación para lograr la "destrucción química" son diversos, la Figura 2, muestra un esquema de cómo puede llegarse a ella a través de diversas vías [5].

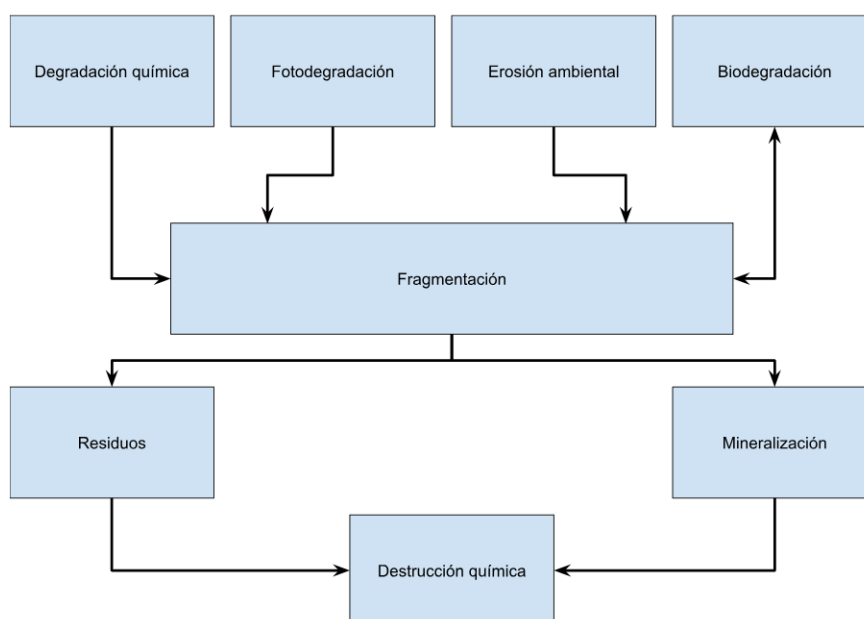


Fig. 2 Caminos de la degradación.

Cada uno de esos caminos, puede hacer uso de uno o más factores que actúan como responsables de la degradación [6]. En sí, la falta de estabilidad que puede tener el plástico en un medio ambiente específico es lo que determina su degradabilidad en esas condiciones. Por lo tanto, en la degradación de postconsumo, son de primordial interés la fotodegradación y la biodegradación de los plásticos. La fotodegradación es útil cuando los plásticos tienen sensibilidad a la luz ultravioleta del sol, del cual llega en esa forma un 6 por ciento de su energía (a 290-400 nm de longitud de onda) a la superficie de la tierra. Dicha sensibilidad puede ser aumentada con agentes prodegradantes de diversos tipos [7, 8], o implementando copolímeros en cuya composición estén presentes unidades de un monómero que contenga grupos que fácilmente sean atacados con la energía de la luz ultravioleta [9].

La degradación se pretende lograr rompiendo enlaces primarios, para disminuir progresivamente el tamaño molecular, llegando hasta niveles en los cuales, los microorganismos, hongos o levaduras pueden actuar en la etapa final de cumplimiento del ciclo vital. El mecanismo fotoquímico de rotura puede iniciarse con la formación de radicales libres en la molécula polimérica [10]. Se ha mostrado que la luz U.V. degradará a polímeros tales como el polietileno [11] y el poliestireno [12, 13] si se exponen éstos a dicha luz el tiempo suficiente en presencia de oxígeno. Los cambios en las estructuras químicas por la degradación pueden ser fácilmente seguidos por espectroscopía de infrarrojo [14] y resonancia electrónica de espín [15] y los cambios en el tamaño y la distribución del tamaño molecular, por cromatografía de permeación en gel [16]. Este tipo de degradación se ha estado aplicando comercialmente desde hace años en el sector agrícola y se ha ido extendiendo hacia el sector de empaque y envase. Por ejemplo, se fabrican anillos colectores de paquetes de seis botellas con una "resina fotodegradable" [17]. Las tendencias de degradación en general son conocidas para muchos polímeros comerciales, los valores de algunos de ellos pueden verse en la Tabla 2, donde puede notarse la importancia del papel del oxígeno.

La biodegradación se entiende como un proceso donde las bacterias, hongos, levaduras y sus enzimas (y aún organismos mayores) consumen una sustancia como fuente de alimento, de tal manera que desaparece su forma original. En base a ello, las condiciones favorables para biodegradar los plásticos se presentan en un ambiente húmedo y caluroso y un medio aerobio o anaerobio, dependiendo de la enzima requerida para llevar a cabo el "ataque". Las primeras pruebas reportadas oficialmente para determinar la resistencia de los materiales poliméricos sintéticos a los hongos, bajo condiciones controladas [18], revelaron la dificultad de poder biodegradar la mayoría de los termoplásticos comerciales.

Tabla 2. Tendencias Generales de degradación de algunos polimeros comerciales.

4 =Muy alta, 3=Alta, 2=Moderada 1=Pobre 0=Muy Pobre.

Polímero	Hidrólisis	Oxidación Térmica	Fotooxidación.	Irradiación Gamma.
Nylon 6,6	2	2	2	2
Nylon 6	2	2	2	2
Poliacrilonitrilo	1	3	1	3
Policarbonato	1	2	3	1
Poli (Cloruro de Vinilo)	0	4	3	3
Poliestireno	0	2	3	1
Polietileno	0	3	3	2
Poli (Metacrilato de Metilo)	1	1	0	2
Poli (Óxido de Fenileno)	1	4	2	1
Polipropileno	0	4	4	3
Polisiloxanos	1	0	0	
Poli (Tereftalamida de P Fenileno)	1	0	4	0
Poli (Tereftalato de Etileno)	1	1	1	1
Poli Tetrafluoro Etileno	0	0	0	4

La Tabla 3 muestra el crecimiento de hongos en una escala de "0 a 4", en donde el crecimiento nulo en la superficie se marca como "0", crecimiento <10% como 1, crecimiento de 10-30 % como 2, crecimiento de 30-60 % como 3 y crecimiento desde 60 % hasta cobertura superficial completa como 4.

Tabla 3. Biodegradabilidad de algunos plásticos

Polímero	Nivel de Crecimiento de Hongos
Policarbonato	0
Polietileno (PE)	2
PE Previa extracción con tolueno	1
PVC epoxidado	3
PVC Epoxidado, previa extracción con tolueno	1
Polipropileno	1
Poliestireno	1
Nylon 6, Nylon 6,6	0
Poliéster de Caprolactama	4
Poliuretano	4
Poli (Tereftalato de etileno)	0

Se puede observar la importancia de algunos aditivos presentes en los plásticos, como se muestra en los casos del polietileno y del poli (cloruro de vinilo), que bajaron su nivel en la tabla después de una extracción efectuada con tolueno. La biodegradabilidad de los poliésteres fue alta para los alifáticos y nula para los aromáticos; ello demuestra que la rigidez estructural del compuesto también influye. La importancia del tamaño molecular se determinó mediante estudios de pirólisis de polietileno, donde se observó que con un peso molecular (medido por viscosimetría) de 50,000-100,000 el crecimiento fungal era "0", de 12,000-16,000 era 1 y en 1,000 era de 3.

El reporte dio lugar a que se intentara incrementar la biodegradabilidad de los polímeros sintéticos por diversos caminos, ya fuera mediante copolimerizaciones [19], o inclusión de aditivos que de alguna forma fueran compatibles en el polímero, o que reaccionaran con él [20]; otro enfoque ha sido el de diseñar polímeros que tengan estructuras biodegradables [21,22] o utilizar polímeros que sean sintetizados por microorganismos [23,24]. Comercialmente se han difundido los plásticos que contienen almidón ya sea injertado o como aditivo. Sin embargo, con el problema de la biodegradación hasta cumplir el ciclo vital, no se ha resuelto para los plásticos de gran consumo, como el polietileno y el poliestireno. De cualquier manera, cabe reflexionar sobre dos aspectos; primero, que la fotobiodegradación es la que ofrece las mejores perspectivas en términos generales y segundo, que los métodos normativos para demostrar la biodegradabilidad (como por ejemplo los ASTM para hongos G2170 y bacteria G2270) son limitados en cuanto a que no permiten observar la acción sinérgica de comunidades microbianas y por lo tanto deben ser reestructurados. Un ejemplo que clarifica la cuestión es el estudio que mostró que se requerían dos especies de pseudomonas creciendo como cultivo mixto para expresar la actividad completa de la lecitinasa [25]. Se sugirió que cada especie sintetizaba una subunidad diferente de la enzima, de tal forma que sólo el cultivo mixto podía producir la enzima activa. De hecho, estudios de biodegradación de poliestireno de alto impacto en lodos activados (cultivo de extensa actividad microbiana) en medio aerobio, han proporcionado resultados prometedores en este campo [26].

Reciclado

En términos generales, el tipo de reciclado que se intente tendrá diferentes requerimientos previos para su procesado. Es decir, para el reciclado cuaternario ni siquiera se requieren separar los materiales orgánicos, mientras que para el primario sí, además de tener que conocer el grado de compatibilidad o posible compatibilización de los plásticos, en el caso de que se quieran mezclar éstos. La separación es entonces una etapa previa muy importante, tanto técnica como económicamente. A su vez, el trabajo de separación se ve afectado desde la forma de recolección al iniciar el postconsumo. Una vez que llega la "basura" orgánica o plástica a la planta de reciclado, la separación de resinas y colores puede ser manual y/o automática donde, por ejemplo, el uso de aire

puede utilizarse para separar plásticos ligeros de las partes que contengan materiales más pesados y el uso de magnetos, puede servir para atrapar metales que puedan ir en la corriente. Algunas técnicas de identificación de los plásticos, las cuales juegan también un papel fundamental, pueden observarse en la Tabla 4. [27].

Tabla 4. Técnicas de identificación de materiales.

Técnicas de identificación física	Técnicas de identificación electromagnética
<ul style="list-style-type: none">• Densidad/Peso Molecular.• Propiedades MecanoTérmicas.• Temperatura de Servicio.• Temperatura de Transición Vítreo.• Punto de despolimerización / descomposición.	<ul style="list-style-type: none">• Resistividad Volumétrica.• Fuerza dieléctrica.• Propiedades Magnéticas.• Espectroscopia.• Espectroscopía I.R., Visible, U.V.• Fluorescencia.• Transmisión de Rayos X.• Irradiación Gamma.

La presencia de mezclas de papel/plástico o plásticos recubiertos de telas o fibra de madera, requieren de técnicas específicas, ya sea aplicando calor, procesos húmedos, separación electrodinámica o extracción con solventes [28].

Una vez hecha la separación de plásticos, se puede pasar al nuevo procesado de estos. Ahora bien, si se conoce el nivel de compatibilidad entre 2 plásticos, éstos se pueden mezclar en el nuevo procesado si dicho nivel es suficiente. En las campañas proreciclado, las compañías que comercializan materias primas orientan a los fabricantes de artículos a través de boletines sobre la compatibilidad de los materiales que ofrecen. Dentro de los llamados plásticos de ingeniería, las mezclas de materiales pueden servir para reciclado primario o secundario. Por otra parte, con respecto a las posibilidades de servir para los diversos tipos de reciclado, las diferencias entre las resinas de condensación y las de adición, o entre termoplásticos y termoestables, son bastante notorias. La Tabla 5 muestra la gran versatilidad de las resinas de condensación y el reto que hasta el momento representan los termoestables y los cauchos vulcanizados [29].

Reciclado primario

El proceso se circunscribe a los materiales termoplásticos (que pueden ser reprocesados directamente), ya sea que estén o no mezclados con resina virgen. Los principales problemas que se pueden tener en este tipo de reciclado, son: a) degradación debido al reprocesado por 1 ó más ocasiones, lo cual incide en una o más de sus características específicas, tales como procesabilidad, resistencia química, resistencia mecánica y apariencia; b) contaminación del plástico reprocesado, lo cual puede incluso impedir que el material sea útil hasta para reciclado secundario; c) manejo del material en geometría de baja densidad, como por ejemplo en forma de espumado.

Tabla 5. Jerarquía de reciclamiento de plásticos.

	Polímeros de condensación (PET, Náilon).	Poli olefinas (PP, PE)	PVC ABS	Acrílicos	Termo estables	Cauchos vulcanizados.
Reúso directo.	S	S				
Reúso después de modificación.	S	S	S	S		
Recuperación química de monómeros.	S				S	
Recuperación térmica de monómeros.				S		
Rompimiento térmico.	S	S	S	S	S	S
Uso como rellenedor.	S	S	S	S	S	S

Algunos materiales son capaces de resistir el reciclado primario por varias veces, antes de que sus propiedades caigan en más de un 10 por ciento. En general, se mencionan hasta 3 reciclados sin deterioro y aunque en algunos estudios se reportan hasta por ejemplo 5 reciclados para el poliestireno de alto impacto [30], se debe ser muy precavido en el manejo de la información, ya que el material de que se disponga puede variar desde su origen en peso molecular, distribución de peso molecular, grado de ramificación, etc. De hecho, en otro estudio se reporta que el reciclado primario de poliestireno de alto impacto sólo es aconsejable en tres ocasiones [31], sin necesidad de reforzado. Por supuesto que, al mezclar material virgen con material reciclado, la caída de las propiedades será más lenta. Para este último caso, la Figura 3, muestra un esquema de flujo en el cual se incluye también el desperdicio que se tiene en cada ciclo [32].

La composición de la corriente de producto después de un ciclo en la Figura 3 es:

$$C.P.=F(K+R) \tag{1}$$

donde C.P. es la corriente de producto en masa/tiempo (incluyendo producto y residuo), F es la velocidad de alimento en masa/tiempo (incluyendo material virgen y reciclado), K es la relación de material virgen al alimento total y R es la relación del material reciclado al alimento total.

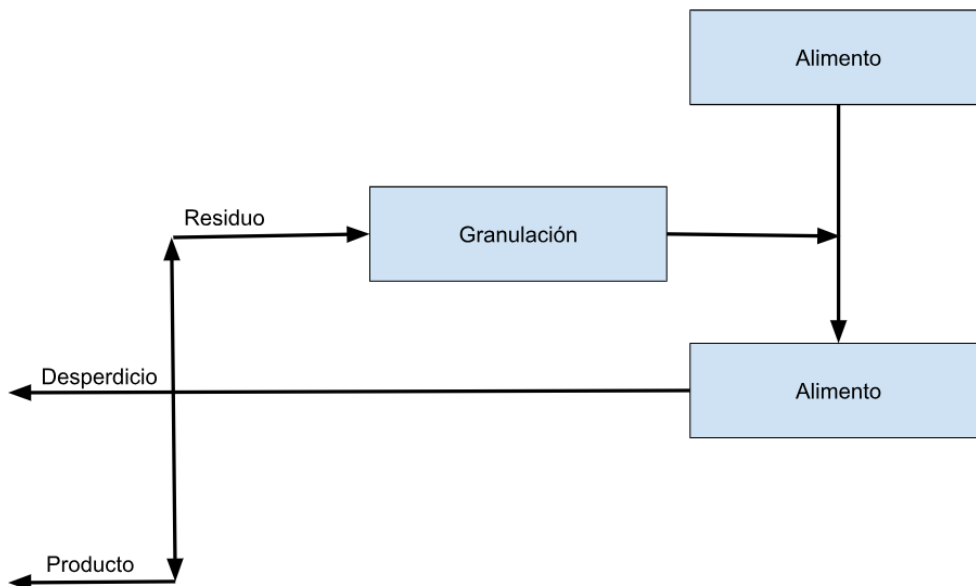


Figura 3. Diagrama de un proceso de reciclado.

Después del segundo ciclo, la corriente de producto es:

$$C.P. = F[K+R(K+R)] = F(K+KR+R^2) \tag{2}$$

Después de n ciclos, se tiene que:

$$C.P. = F (2 KR+R)^j \tag{3}$$

A su vez, el calentamiento repetido, así como el manejo del producto, van afectando las propiedades del material. El cambio teórico de las propiedades como función del número de ciclos y de porcentaje de material reprocesado, ha sido estudiado ya desde hace años para n ciclos [33]. La predicción de las pérdidas permite establecer cuál sería el grado necesario de recuperación de propiedades, a través de agentes de refuerzo de plásticos con propiedades superiores al material en cuestión (ya sea que se requiera o no de agentes de compatibilización). Los estudios son de interés para todos los plásticos que pueden ser objeto de reciclado primario o secundario; sin embargo, por razones obvias el mayor interés recae en los plásticos de gran consumo [34,35].

Ahora bien, estudios recientes de mezclas de más de dos plásticos [36,37], han mostrado la factibilidad de preparar materiales que acepten altos porcentajes de la mezcla de reciclo en el alimento

[36], o que mediante un proceso de homomiconización, se pueden mezclar, aún y cuando sean de los no "compatibles" [37]. La homomiconización consiste en una microhomogeneización llevada a cabo en un recipiente cilíndrico con un rotor de alta velocidad. El material se gelifica por el calor generado por fricción y es así descargado. El producto así obtenido, ha sido bautizado como "Newplast" y además de poder procesarse en equipos convencionales, su costo se ha estimado por debajo de la mitad de un termoplástico virgen. En estos tipos de mezclas, si las propiedades resultantes caen por debajo de las originales del "polímero base", entonces se clasificarían en el reciclado secundario.

Reciclado secundario

En este tipo de reciclado, debido a la pérdida de propiedades, normalmente se fabricarán artículos para diferentes usos, respecto de los originales.

Entre los problemas que se enfrentan, se tienen: a) Contaminación de sustancias no plásticas, ya sea por transformación original, por su uso o por el tratamiento previo al reciclado [38]; b) Incompatibilidad de materiales que se mezclan, resultando un producto con propiedades mecánicas pobres [39]; c) Variación de la composición de alimento para llevar a cabo el reciclado; d) Tener demanda en el mercado, para poder hacer producción masiva que abarate costos.

Los estudios de las propiedades de los productos que provienen de las mezclas de reciclado, en general han mostrado que el esfuerzo y la deformación de ruptura, además de la tenacidad, decaen y sólo el módulo elástico se comporta de una manera aditiva (teniendo como factor su fracción en volumen) [39]. La modificación del material de reciclado, por medio de agentes compatibilizantes en una mezcla o de polímeros compatibles que aumenten una o más propiedades, como es el caso del caucho "EPDM" para mezclas de polipropileno y polietileno de postconsumo [40], son opciones que se suman a la modificación química por entrecruzamiento de uno o varios de los polímeros presentes en la operación [41]. El caso específico de reciclado de llantas de vehículos, es de interés mencionarlo en este apartado, ya que en la actualidad, una vez que se ha molido el material, el caucho se utiliza en la elaboración de productos de poca demanda mecánica (tapetes, loderas de autos, bajoalfombras, etc.). El reprocesado se logra rompiendo los puentes de azufre (que entrecruzan las cadenas de caucho) por medio de calor y cizallado.

Reciclado terciario

La recuperación de sustancias químicas de bajo peso molecular, a partir de los plásticos de postconsumo, puede hacerse por descomposición térmica o química. En la térmica, en algunos casos se pueden controlar las reacciones para obtener monómeros y algunos productos secundarios. En la

Tabla 6, se puede ver que en algunos de ellos de gran demanda comercial se logran porcentajes elevados [42].

Tabla 6. Producto monomérico a partir de polímeros por descomposición térmica

Polímero	Monómero% Peso.
Politetrafluoro Etileno.	97-98
Poli(Metacrilato de Metilo).	95-100
Poli(α Metil estireno).	95-100
Polimetacrilonitrilo.	85-100
Poliestireno.	42
Poliisobuteno.	32
Policlorotrifluoroetileno.	28
Poliisopreno.	2
Polibutadieno.	2
Polpropileno.	0-22
Poli(Acrilato de Metilo)	<1
Polietileno.	<1

Cuando el calentamiento se lleva a cabo en un ambiente que contenga poco o nada de oxígeno, la descomposición del sustrato llamada pirólisis, permite obtener componentes muy diversos, de utilidad para la industria química en general. Entre las mayores ventajas de la pirólisis, se tiene el que la mayor parte de los residuos sólidos municipales se pueden tratar de una forma económicamente viable. Así, el volumen de los desechos se puede reducir en un 90 o más por cien [42]. Además, como la operación se lleva a cabo en un ambiente cerrado, se produce energía, (por descomposición química) sin contaminar el aire.

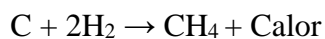
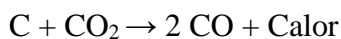
Las reacciones básicas que se presentan normalmente son [43]:

Reacción principal:



Reacciones secundarias:





Los análisis químicos posteriores de los gases y líquido permiten conocer cuales sustancias químicas se están generando con los residuos que se tratan [43,44].

La descomposición química de los residuos plásticos también es posible para una variedad de plásticos. Sus posibles ventajas sobre la pirólisis, consisten en mayor facilidad de control, uniformidad de producto y por lo tanto menores requerimientos en separación y purificación de productos. Además, como requiere de menor capital de inversión, la planta puede operar económicamente a menor escala. La principal limitante de estos procesos, son los requerimientos de contar con materia prima (basura plástica) uniforme, separada y limpia. La descomposición química por reacciones químicas tales como hidrólisis, metanólisis o glicólisis, se enfoca a polímeros de condensación, teniendo como los polímeros de mayor interés para estos procesos, al poliuretano y los poliésteres termoplásticos, por sus volúmenes de consumo. Tomando como ejemplo el poli(tereftalato de etileno), se puede utilizar metanol, calor, presión y catalizador para llegar hasta la obtención del cómero (ácido isoftálico) [45], o se puede usar un glicol para efectuar una reacción de transesterificación; en este último caso, con la presencia de catalizadores se puede reducir notablemente el peso molecular [46]. Cuando se usa poliuretano como materia prima, el panorama de posibles productos se amplía, por su "naturaleza" química; la obtención de diamina, polioliol y CO₂, se ha logrado con espuma flexible de poliuretano, utilizando vapor a alta presión [47].

En general, las posibles reacciones de descomposición química de los plásticos de condensación dependen de los grupos activos presentes, de su estructura espacial y de los esquemas catalíticos que puedan emplearse con la ayuda de calor y presión.

Reciclado cuaternario

La obtención de energía a partir de basura combustible, llegando a residuos inertes de una manera controlada, puede lograrse por incineración [48]. Su uso ha aumentado con el afán de reducir el volumen de desperdicios (en más de un 90 %) que de otra manera irían a los vertederos de basura. Además, ayuda a eliminar la posibilidad de interacciones desfavorables de la basura con el entorno. El valor energético obtenido se puede aprovechar en la formación de vapor, agua caliente o generación de electricidad. Como un dato aproximado puede tenerse que, si el valor calorífico promedio del medio combustible es de 1,800 Kcal/Kg, la incineración de 1,200 toneladas equivale a la energía de 1,300 barriles de combustóleo.

Entre los tipos de incineradores, los sistemas de mayor interés para su posible aplicación, están los mecánicos, los de lecho fluidizado y los de horno rotatorio. La operación y sistema más utilizado era el de tipo mecánico, donde la operación y transporte de los materiales se fundamenta en operaciones mecánicas, ya sea en sistema continuo o por cargas. Los incineradores de lecho fluidizado permiten una operación y mantenimiento simples, además de tener la eficacia adecuada. El lecho caliente fluidizado es de arena y la combustión se hace en poco tiempo. Su uso ha sido reportado en incineración de poliuretano, logrando un nivel de emisiones de residuos, muy por debajo del combustóleo y petróleo [49]. Los incineradores de horno rotatorio, que se han utilizado bastante en la eliminación de residuos industriales, han entrado ya al panorama de la eliminación de residuos municipales. Su cuerpo cilíndrico ligeramente inclinado, permite la acción de elevadas temperaturas sobre desechos que estén girando, quedando así muy pocos residuos (alrededor de un 3%) sin quemar en corto tiempo [50]. Además, al no requerir inyección de aire enriquecido, el nivel de óxidos de nitrógeno en las emisiones puede quedar por debajo de 100 ppm. Un proceso de recuperación de energía que empieza a aparecer con buenos augurios es el de gasificación a alta temperatura.

Obviamente, el control de una planta de incineración es fundamental, no sólo por eficiencia y vida del equipo, sino por cuestiones ecológicas. Por ejemplo, los metales pesados (plomo, cobre, cromo, cadmio, etc.) que contengan los residuos urbanos, crean problemas de contaminación, si se vierten en el medio ambiente. Estos deben ser separados de los residuos de combustión, antes de disponer de ellos en una forma segura.

Perspectiva

Las necesidades tecnológicas y económicas indican que la producción de los plásticos y demás materiales poliméricos seguirá creciendo respecto a otros tipos de materiales en los próximos años. Ya que el ser humano está en busca de nuevas tecnologías y materiales, también debe buscar los mejores caminos que le conduzcan a disminuir la contaminación, para así poder continuar con un mundo habitable.

En los plásticos, el uso de la degradación química deberá mantenerse para casos específicos y en objetos de uso común deberá ir disminuyendo a corto plazo. La incineración sin reaprovechamiento energético se deberá emplear como último recurso para disminuir el número y tamaño de los vertederos de basura. Ecológicamente, la primera medida a tomar es la de prevención y el manejo de los materiales de postconsumo, debe enfocarse primordialmente al reciclado. El tipo de reciclado a escoger dependerá de cada caso particular; sin embargo, ya que más del 80% de los plásticos son termoplásticos, los reciclados del tipo primario y secundario deben ser favorecidos. Ya que la reutilización no es interminable, se deberán desarrollar más esquemas de reciclado terciario, además

de aprovechar los ya existentes. En el caso de los plásticos termoestables, de igual forma se debe procurar el reciclado terciario siempre que sea posible como en el caso de los poliuretanos [47,51] y sólo pasar al reciclado cuaternario cuando hasta ese momento no se cuente con otro camino. Aunque los esquemas comerciales de reciclado sólo han tenido éxito en forma limitada, a medida que se avance en las diferentes etapas previas al reciclado [37], éste será económicamente costeable y pasará a ser un negocio productivo. Por ahora, el interés nace de una necesidad ecológica y su desarrollo debe partir desde la etapa de diseño de piezas y estandarización de materiales, tanto en el aspecto técnico como en el legislativo. Más aún, la magnitud del problema crece año con año; de hecho, globalmente los desechos plásticos se han duplicado en las últimas décadas, mientras que sólo se recicla el 9% con éxito, ya que la mayor parte se va a vertederos, se incinera (12%), o se filtra al medio ambiente, de acuerdo a un informe de 2022 [52].

Por otra parte, se ha propuesto un concepto de *upcycling*, que se ha definido como “el uso de desechos plásticos como materia prima para la síntesis de productos de valor agregado, ya sean polímeros, moléculas o materiales” [53]. La propuesta es que los productos hechos a partir de resinas vírgenes sean sustituidos de forma sostenible, tomando como base tres criterios: impacto ambiental, relevancia industrial y valor económico. La aplicación de estos principios a investigaciones recientes lleva a tres conclusiones generales sobre el estado actual del reciclaje de polímeros.

En primer lugar, el desafío central es que los plásticos están diseñados para ser químicamente estables, por lo que el desarrollo de transformaciones selectivas y escalables de este tipo de materiales sigue siendo difícil. Los proyectos de investigación en estas áreas deben comprender y controlar con precisión los mecanismos químicos que conducen a la deconstrucción selectiva de polímeros a nivel molecular, por lo que el diseño de catalizadores o reactivos más eficientes para minimizar la energía requerida para lograrlo, debe ser el tema central del desarrollo de nuevas reacciones, así como mejorar la selectividad en la transformación en el producto objetivo de los desechos plásticos y considerar la operación con flujos de desechos plásticos mezclados y contaminados.

Una segunda área crítica es la incorporación de aspectos como el rendimiento de los materiales, métricas de sostenibilidad, análisis de flujo de materiales y volúmenes de mercado del producto reciclado. Sin duda, un desafío es la escala de la entrada de residuos en comparación con el potencial de sustitución del producto. La premisa principal podría ser “¿por qué deberíamos usar materias primas derivadas de desechos plásticos en lugar de otras materias primas?”. Un escenario ideal sería reciclar un plástico de gran volumen como materia prima a una gran variedad de aplicaciones de alto valor y bajo volumen, que permitiría impulsar inicialmente el reciclaje por lo menos en términos económicos. Incluso esfuerzo a una escala mucho menor, podrían compensar los costos del reciclaje

si ofrecen un beneficio económico directo, lo que sumaría a lograr mejores niveles de gestión de residuos en general. Para que estas sustituciones sean sostenibles, requieren comparaciones holísticas que incorporen métricas de sostenibilidad y calcular costos, alentando a los investigadores a considerar el costo económico y ambiental, así como el volumen de mercado en el que se podría emplearse el producto reciclado.

En tercer lugar, se debe considerar el destino final de la vida útil de los productos reciclados durante el proceso de desarrollo de la tecnología. Idealmente, no solo se debe buscar extender la vida útil de un plástico, sino que también considerar una funcionalidad química que facilite el reciclaje del plástico [54, 55, 56]. Este enfoque novedoso sugiere transformar los plásticos en un material de valor agregado con reciclabilidad intrínseca incorporada. Un ejemplo es la producción del termoestable comercial de poli(diciclopentadieno), que incorpora un monómero degradable en la cadena principal a través de la copolimerización, facilitando la despolimerización en productos solubles y la posterior polimerización en productos con propiedades específicas. Otro enfoque es el proceso de ciclo cerrado, como el desarrollado para la producción de poliésteres alifáticos, en los que una mezcla de dos homopolímeros se puede convertir en un copolímero de secuencia definida que, en relación con sus precursores, tienen una estabilidad térmica mejorada y una reciclabilidad química total [57]. En otro ejemplo de ciclo cerrado, pero ahora de termoestables, la despolimerización y la repolimerización con una selección diferente de bloques produjeron materiales con propiedades diferenciadas sin dejar de ser totalmente reciclables [58].

Es precisamente la falta de este enfoque holístico que pueda identificar desafíos y soluciones en todas las fases de la cadena de valor del plástico 1) diseño, 2) producción, 3) uso, y 4) fin de vida, lo que no ha permitido consolidar la economía circular, y es evidente esta falla cuando se abordan estos temas en la literatura [59]. Los flujos de trabajo y el comportamiento en otras fases, como el diseño de productos compuestos o la clasificación deficiente de los desechos plásticos, causan problemas particulares, lo que puede causar contaminación en el proceso de reciclaje. Las posibles soluciones a estos desafíos a la circularidad podrían ser integrar el diseño para el reciclaje; incluir materiales reciclados en el proceso de producción; aumentar la demanda de materiales reciclables; reducir el uso de productos plásticos; y aumentar la inversión en el desarrollo de tecnologías de reciclaje (y sistemas tecnológicos que integren o combinen tecnologías de reciclaje mecánico y químico). Estas soluciones podrían contribuir a la transición hacia una economía circular al mantener los recursos plásticos dentro del sistema de producción y consumo de circuito cerrado. Sin embargo, esta transición no ocurrirá sin más investigación en cada fase y colaboración a lo largo de la cadena de valor, para evitar implicaciones tanto dentro de cada fase como también afectando otras fases. La literatura examinada en esta revisión requiere investigación adicional sobre diseño, flujos de desechos puros y

comportamiento modificado del consumidor. La investigación futura debería adoptar un enfoque holístico para la transición a circular. Esto se puede hacer a través del mapeo de las implicaciones, identificando en qué parte de la cadena de valor ocurren y promoviendo la participación y colaboración de las partes interesadas.

Los plásticos siguen siendo los mejores materiales para proteger los alimentos, purificar el agua, almacenar o generar energía, reducir las infecciones y crear materiales de alto rendimiento. Dado su papel esencial en la economía global, se requiere un plan holístico y sostenible para gestionar los plásticos al final de su vida. El reciclaje químico de polímeros promete un cambio de paradigma de las formas tradicionales de tratar los residuos plásticos transformándolos y reutilizándolos en materias primas para productos de mayor valor. Recientemente se ha enfatizado en la importancia y los desafíos para innovar en las áreas de tratamiento de residuos mediante modificación química para crear productos que son comparables o superiores a los polímeros comerciales modernos. Existen oportunidades en la transformación de los plásticos desechados en polímeros especiales de mayor valor, moléculas funcionales o materiales de alto rendimiento. Las innovaciones continuas con un enfoque en el uso de desechos plásticos para generar materiales que sean tanto de alto valor como de alta reciclabilidad como resultado de la modificación química es una meta a la que se aspira que tendrá un papel importante en el cambio hacia una economía de plásticos más sostenible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bajpai, P. (2015). *Green chemistry and sustainability in pulp and paper industry* (pp. 65-84). Springer International Publishing.
2. Mwanza, B. G. (2021). Introduction to recycling. *Recent Developments in Plastic Recycling*, 1-13.
3. Milani, P., França, D., Balieiro, A. G., & Faez, R. (2017). Polymers and its applications in agriculture. *Polímeros*, 27, 256-266.
4. Cheneler, D., & Bowen, J. (2013). Degradation of polymer films. *Soft Matter*, 9(2), 344-358.
5. Hamid, S. H. (2000). *Handbook of polymer degradation*. CRC Press.
6. Vohlídal, J. (2020). Polymer degradation: A short review. *Chemistry Teacher International*, 3(2), 213-220.
7. Montagna, L. S., da Camargo Forte, M. M., & Santana, R. M. C. (2013). Induced degradation of polypropylene with an organic pro-degradant additive. *Journal of Materials Science and Engineering*, A, 3(2A), 123.
8. Oluz, Z., & Tinçer, T. (2016). Additives for ultraviolet-induced oxidative degradation of low-density polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(17).
9. Abrusci, C., Pablos, J. L., Marín, I., Espí, E., Corrales, T., & Catalina, F. (2012). Photodegradation and biodegradation by bacteria of mulching films based on ethylene-vinyl acetate copolymer: Effect of pro-oxidant additives. *Journal of applied polymer science*, 126(5), 1664-1675.
10. Wypych, G. (Ed.). (2020). *Handbook of UV degradation and stabilization*. Elsevier.
11. Torikai, A., Shirakawa, H., Nagaya, S., & Fueki, K. (1990). Photodegradation of polyethylene: factors affecting photostability. *Journal of Applied Polymer Science*, 40(9-10), 1637-1646.
12. Yousif, E., & Haddad, R. (2013). Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene. *SpringerPlus*, 2(1), 1-32.
13. Pinto, L. F., Goi, B. E., Schmitt, C. C., & Neumann, M. G. (2013). Photodegradation of polystyrene films containing UV-visible sensitizers. *Journal of Research Updates in Polymer Science*, 2(1), 39.
14. Mylläri, V., Ruoko, T. P., & Syrjälä, S. (2015). A comparison of rheology and FTIR in the study of polypropylene and polystyrene photodegradation. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(28).

15. He, Y., Yuan, J. P., Cao, H., Zhang, R., Jean, Y. C., & Sandreczki, T. C. (2001). Characterization of photo-degradation of a polyurethane coating system by electron spin resonance. *Progress in organic coatings*, 42(1-2), 75-81.
16. Rabello, M. S., & White, J. R. (1997). The role of physical structure and morphology in the photodegradation behaviour of polypropylene. *Polymer Degradation and Stability*, 56(1), 55-73.
17. Helmus, M. N. (2018). The Outlook for Environmentally Degradable Plastics 1. In *Degradable Materials* (pp. 619-640). CRC Press.
18. Pathak, V. M. (2017). Review on the current status of polymer degradation: a microbial approach. *Bioresources and Bioprocessing*, 4, 1-31.
19. Kumar, N., Ravikumar, M. N., & Domb, A. J. (2001). Biodegradable block copolymers. *Advanced drug delivery reviews*, 53(1), 23-44.
20. DelRe, C., Chang, B., Jayapurna, I., Hall, A., Wang, A., Zolkin, K., & Xu, T. (2021). Synergistic Enzyme Mixtures to Realize Near-Complete Depolymerization in Biodegradable Polymer/Additive Blends. *Advanced materials*, 33(49), 2105707.
21. Witt, U., Yamamoto, M., Seeliger, U., Müller, R. J., & Warzelhan, V. (1999). Biodegradable polymeric materials—not the origin but the chemical structure determines biodegradability. *Angewandte Chemie International Edition*, 38(10), 1438-1442.
22. Vroman, I., & Tighzert, L. (2009). Biodegradable polymers. *Materials*, 2(2), 307-344.
23. Jambunathan, P., & Zhang, K. (2016). Engineered biosynthesis of biodegradable polymers. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 43(8), 1037-1058.
24. Balaji, A. B., Pakalapati, H., Khalid, M., Walvekar, R., & Siddiqui, H. (2018). Natural and synthetic biocompatible and biodegradable polymers. *Biodegradable and biocompatible polymer composites*, 286, 3-32.
25. Shah, K. (2019). Biopolymer (PHA) producing microbes and its application. In Kamlesh Shah (Ed.), *Microbiology and Biotechnology in Human Life* (pp. 294-317). JPS Scientific Publications, Tamil Nadu, India.
26. Yang, S. S., Brandon, A. M., Xing, D. F., Yang, J., Pang, J. W., Criddle, C. S., ... & Wu, W. M. (2018, May). Progresses in polystyrene biodegradation and prospects for solutions to plastic waste pollution. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 150, No. 1, p. 012005). IOP Publishing.
27. Singh, M. K., & Singh, A. (2021). *Characterization of Polymers and Fibers*. Woodhead Publishing Elsevier.
28. Tiwari, R., Azad, N., Dutta, D., Yadav, B. R., & Kumar, S. (2023). A critical review and future perspective of plastic waste recycling. *Science of The Total Environment*, 163433.
29. Lange, J. P. (2021). Managing plastic waste— sorting, recycling, disposal, and product redesign. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(47), 15722-15738.
30. Soriano, F., Morales, G., & de León, R. D. (2006). Recycling of high impact polystyrene in coextruded sheet: Influence of the number of processing cycles on the microstructure and macroscopic properties. *Polymer Engineering & Science*, 46(12), 1698-1705.
31. El Bhilat, H., El Had, K., Salmi, H., & Hachim, A. (2021). Thermo-mechanical characterization of post-consumer recycled high impact polystyrene from disposable cups: Influence of the number of processing cycles. *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, 10(2), 427-436.
32. Khalid, M. Y., Arif, Z. U., Ahmed, W., & Arshad, H. (2022). Recent trends in recycling and reusing techniques of different plastic polymers and their composite materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 31, e00382.
33. Valenza, A., & La Mantia, F. P. (1988). Recycling of polymer waste: Part II—Stress degraded polypropylene. *Polymer degradation and stability*, 20(1), 63-73.
34. Chen, L., Liu, W., Yang, T., & Nowack, B. (2023). Probabilistic material flow analysis of eight commodity plastics in China: Comparison between 2017 and 2020. *Resources, Conservation and Recycling*, 191, 106880.
35. Jehanno, C., Alty, J. W., Roosen, M., De Meester, S., Dove, A. P., Chen, E. Y. X., ... & Sardon, H. (2022). Critical advances and future opportunities in upcycling commodity polymers. *Nature*, 603(7903), 803-814.
36. Liu, Q., Zhang, X. X., Jia, D. Z., Yin, J., Lei, J., Xu, L., ... & Li, Z. M. (2023). In situ nanofibrillation of polypropylene/polyethylene/poly (ethylene terephthalate) ternary system: A strategy of upgrade recycling. *Polymer*, 269, 125729.
37. Saat, M. A. R., & Rasid, R. (2022). Effect of high shear rate on the mechanical properties of polyethylene, poly (ethylene terephthalate), polystyrene and polypropylene waste blend. *Polimery*, 67(2), 72-75.
38. Eriksen, M. K., Pivnenko, K., Olsson, M. E., & Astrup, T. F. (2018). Contamination in plastic recycling: Influence of metals on the quality of reprocessed plastic. *Waste management*, 79, 595-606.
39. Ignatyev, I. A., Thielemans, W., & Vander Beke, B. (2014). Recycling of polymers: a review. *ChemSusChem*, 7(6), 1579-1593.
40. Hanna, E. G. (2019). Recycling of Waste Mixed Plastics Blends (PE/PP). *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 12(2).

41. Wang, Y., Liu, Z., Zhou, C., Yuan, Y., Jiang, L., Wu, B., & Lei, J. (2019). A facile strategy for high performance recyclable polymer systems via dynamic metal ion crosslinking. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(8), 3577-3582.
42. Coates, G. W., & Getzler, Y. D. (2020). Chemical recycling to monomer for an ideal, circular polymer economy. *Nature Reviews Materials*, 5(7), 501-516.
43. Buekens, A. G., & Schoeters, J. G. (1998, December). Technical methods in plastics pyrolysis. In *Macromolecular Symposia* (Vol. 135, No. 1, pp. 63-81). Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
44. Cai, N., Li, X., Xia, S., Sun, L., Hu, J., Bartocci, P., ... & Chen, H. (2021). Pyrolysis-catalysis of different waste plastics over Fe/Al₂O₃ catalyst: High-value hydrogen, liquid fuels, carbon nanotubes and possible reaction mechanisms. *Energy Conversion and Management*, 229, 113794.
45. Karayannidis, G. P., Chatziavgoustis, A. P., & Achilias, D. S. (2002). Poly (ethylene terephthalate) recycling and recovery of pure terephthalic acid by alkaline hydrolysis. *Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute*, 21(4), 250-259.
46. Barnard, E., Arias, J. J. R., & Thielemans, W. (2021). Chemolytic depolymerisation of PET: a review. *Green Chemistry*, 23(11), 3765-3789.
47. Yang, W., Dong, Q., Liu, S., Xie, H., Liu, L., & Li, J. (2012). Recycling and disposal methods for polyurethane foam wastes. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 167-175.
48. Geyer, R. (2020). Production, use, and fate of synthetic polymers. In *Plastic waste and recycling* (pp. 13-32). Academic Press.
49. Deng, Y., Dewil, R., Appels, L., Ansart, R., Baeyens, J., & Kang, Q. (2021). Reviewing the thermo-chemical recycling of waste polyurethane foam. *Journal of environmental management*, 278, 111527.
50. Al-Salem, S. M. (2019). Energy production from plastic solid waste (PSW). In *Plastics to energy* (pp. 45-64). William Andrew Publishing.
51. Modesti, M. (2021). Recycling of polyurethane polymers. In *Advances in urethane science and technology* (pp. 237-288). CRC Press.
52. Brown, A., F. Laubinger and P. Börkey (2023). Monitoring trade in plastic waste and scrap. *ECD Environment Working Papers*, No. 210, OECD Publishing, Paris.
53. Jehanno, C., Alty, J. W., Roosen, M., De Meester, S., Dove, A. P., Chen, E. Y. X., ... & Sardon, H. (2022). Critical advances and future opportunities in upcycling commodity polymers. *Nature*, 603(7903), 803-814.
54. Britt, P. F., Coates, G. W., Winey, K. I., Byers, J., Chen, E., Coughlin, B., ... & Waymouth, R. (2019). *Report of the Basic Energy Sciences Roundtable on Chemical Upcycling of Polymers*. USDOE Office of Science (SC)(United States).
55. Editorial (2019). Plastic upcycling. *Nature Catalysis*, 2, 945-946.
56. Shi, C., Reilly, L. T., Kumar, V. S. P., Coile, M. W., Nicholson, S. R., Broadbelt, L. J., ... & Chen, E. Y. X. (2021). Design principles for intrinsically circular polymers with tunable properties. *Chem*, 7(11), 2896-2912.
57. Liu, X., Hong, M., Falivene, L., Cavallo, L., & Chen, E. Y. X. (2019). Closed-loop polymer upcycling by installing property-enhancing comonomer sequences and recyclability. *Macromolecules*, 52(12), 4570-4578.
58. Christensen, P. R., Scheuermann, A. M., Loeffler, K. E., & Helms, B. A. (2019). Closed-loop recycling of plastics enabled by dynamic covalent diketoenamine bonds. *Nature chemistry*, 11(5), 442-448.
59. Johansen, M. R., Christensen, T. B., Ramos, T. M., & Syberg, K. (2022). A review of the plastic value chain from a circular economy perspective. *Journal of Environmental Management*, 302, 113975.