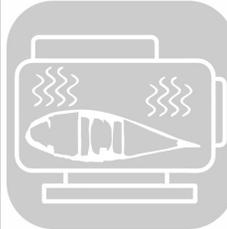


Exploración de tecnologías para el reciclaje de palas de aerogeneradores



Colaboración

Reyes Antonio Vergara-Quezada; Felipe de Jesús Pozos-Texon, Tecnológico Nacional de México campus Veracruz; Juan Antonio Pinilla-Rodríguez Carlos Javier Gasca-Caballero; Claudia Reyes-Olán, Universidad Cristóbal Colón

Fecha de recepción: 08 de abril de 2024

Fecha de aceptación: 03 de junio de 2024

RESUMEN: El presente estudio aborda el desafío de reciclar aspas de aerogeneradores al final de su vida útil a través de la pirólisis, una técnica prometedora para la recuperación eficaz de fibra de vidrio y carbono. Al enfocarse en la separación efectiva de estos materiales de las resinas termoendurecibles, el proceso propuesto no solo reduce significativamente los residuos, sino que también promueve la reintegración de materiales reciclados en la economía circular, especialmente dentro de la industria eólica. La investigación anticipa una alta pureza en las fibras recuperadas, conservando una considerable resistencia mecánica, lo que amplía su potencial de reutilización en diversas aplicaciones industriales. Además, el estudio destaca la posibilidad de aprovechar los subproductos de la pirólisis, como gases combustibles y residuos sólidos, para la generación de energía y la creación de nuevos materiales. Un análisis preliminar del ciclo de vida sugiere que este enfoque de reciclaje podría ofrecer una reducción notable del impacto ambiental en comparación con métodos de disposición convencionales, reafirmando el compromiso de la energía eólica con la sostenibilidad. Este estudio subraya el potencial transformador de aplicar técnicas de pirólisis en la gestión de desechos de la industria eólica, alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad y reducción del cambio climático.

PALABRAS CLAVE: Reciclaje de palas eólicas, pirólisis, fibras de vidrio y carbono, economía circular, sostenibilidad en energía eólica.

ABSTRACT: The present study addresses the challenge of recycling end-of-life wind turbine blades through pyrolysis, a promising technique for the efficient recovery of glass and carbon fibers. By focusing on the effective separation of these materials from thermosetting resins, the proposed process not only significantly reduces waste, but also promotes the reintegration of recycled materials into the circular economy, especially within the wind industry. The research anticipates high purity in the recovered fibers, while retaining considerable mechanical strength, which expands their potential for reuse in various industrial applications. In addition, the study highlights the possibility of taking advantage of pyrolysis by-products, such as combustible gases and solid residues, for energy generation and the creation of new materials. A preliminary life cycle analysis suggests that this recycling approach could offer a notable reduction in environmental impact compared to conventional disposal methods, reaffirming wind energy's commitment to sustainability. This study underscores the transformative potential of applying pyrolysis techniques in wind industry waste management, aligning with global sustainability and climate change reduction goals.

KEYWORDS: Wind blade recycling, pyrolysis, glass and carbon fibers, circular economy, sustainability in wind energy.

INTRODUCCIÓN

Actualmente el mundo está en búsqueda de generar la menor contaminación posible, con el objetivo de reducir el calentamiento global. Esto le abre las puertas cada vez más a las energías renovables y limpias, sin embargo, se conoce que no son 100% limpias, debido a los factores de fabricación, transporte, entre otros.

La energía eólica se refiere a aprovechar la energía cinética del viento, transformarla en energía mecánica y de esta forma, convertirla en energía eléctrica.

La energía eólica cada vez se expande más por todo el mundo, se espera que para el 2030, la energía eólica sustente el 30% de toda la demanda de electricidad en Europa, actualmente sustenta el 15% [1].

El Informe Eólico Global, publicado por el Consejo Mundial de Energía Eólica (GWEC, 2023), reveló que la capacidad instalada global de energía eólica ha alcanzado los 906 GW. Esta capacidad instalada ha contribuido a la reducción anual de 1.2 billones de toneladas de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) [2].

En Estados Unidos, se remueven aproximadamente 8000 palas cada año del 2021 al 2025. En Europa se remueven alrededor de 3,800 palas anualmente.

Las turbinas eólicas están diseñadas para tener una vida de 20 a 25 años. Estas están formadas por los cimientos, una torre, las tres palas, un subsistema de transmisión y un generador. El 85% de una turbina eólica está constituida por materiales metálicos que pueden ser reciclados, el otro 15% lo constituyen las palas, que están hechas de compuestos de polímeros reforzadas con fibra de vidrio. Estas palas están fabricadas para funcionar por décadas, sin embargo, no se pueden reciclar fácilmente, lo que las convierte en desechos. Un MW de capacidad instalada puede generar de 12 a 15 toneladas de desechos. Lo que hace muy complicado el reciclar las palas de las turbinas, es justamente su proceso de fabricación, pues en el procedimiento de curado de las palas, la resina termoendurecible se entrecruza inevitablemente con las fibras de refuerzo, lo que dificulta su recuperación [3].

En este contexto, la mayoría de las partes de una turbina eólica (góndola, cimientos y la torre) están fabricadas de concreto y metales, estas pueden ser reciclados con un riesgo ambiental bajo. Por otra parte, aun no hay un método de reciclaje establecido o estandarizado para las palas que comúnmente están fabricadas de fibra de vidrio reforzada con compuestos de polímero [4].

Cuando hablamos de parques eólicos, hay que tener en cuenta que estos no están formados solo de 1 o 2 turbinas eólicas. El parque eólico La Venta II, ubicado en Oaxaca (Figura 1), cuenta con una potencia nominal total de 83,300 kW, lo que se traduce a 98 turbinas eólicas de la marca Gamesa con una potencia de 850 kW cada una. Teniendo en cuenta que México cuenta con 8 parques eólicos, y solo La Venta II tiene 294 palas, ¿Cuántas palas se tendrán actualmente en todos los parques eólicos de México?, o incluso, ¿Cuántas palas existirán en todo el mundo?



Figura 1. Parque eólico La Venta II - Oaxaca, México.

Fuente: El Universal, 2021.

Una vez cumplido su tiempo de vida útil, a las palas eólicas se les considera desechos (Figura 2), esto debido a que están fabricadas de materiales que son difíciles de reciclar; considerando también que no tienen las mismas características dimensionales debido a que varían debido a su capacidad de empuje y marca del fabricante, por ejemplo, las de parque de La Venta II pesan 1,900 kg según la hoja de datos, el modelo del aerogenerador es G52-850 kW [5]. Por lo que podemos deducir que dentro de unos años el parque de La Venta II producirá una cantidad de 558.6 toneladas de desechos.



Figura 2. Pala de aerogenerador eólico.

Fuente: BBVA, 2023.

Por todo lo anterior, consideramos que es de gran importancia la presente investigación para aportar bases teóricas para reciclar todas estas palas, o al menos, una gran cantidad de ellas, y de esta forma se dejen de considerar desechos y que la energía eólica se siga considerando una energía limpia [5].

Uno de los mejores años en la industria de la energía eólica ha sido el 2020, se registró la capacidad instalada en turbinas eólicas de más de 110 GW, logrando así una capacidad instalada total de 732 GW [6].

Estas turbinas eólicas suelen instalarse en conjunto, formando un sistema de una gran cantidad de turbinas eólicas, dando el nombre de parques eólicos. Estos obviamente se instalan en ubicaciones favorables, detrás de cada parque eólico hay un sinnúmero de investigaciones, como: potencial eólico, rentabilidad, impacto ambiental, impacto social, entre otros.

La generación de electricidad mediante la tecnología eólica produce una contaminación mucho menor que una generación de electricidad con fuentes convencionales [7]. Durante los últimos años se han instalado muchos parques eólicos, los cuales han dado de que hablar, ya que mucha gente está en desacuerdo con estos, ya que creen que las turbinas eólicas tienen un gran impacto visual negativo al paisaje; sin embargo, no todos tienen esta forma de ver las cosas, ya que otra gran parte de la población les parece que los parques eólicos se ven hermosos.

Dentro de la energía eólica, tenemos distintas divisiones de instalaciones de turbinas eólicas: las turbinas eólicas de eje vertical y las turbinas eólicas de eje horizontal Figura 3, siendo esta última la más popular en todo el mundo.

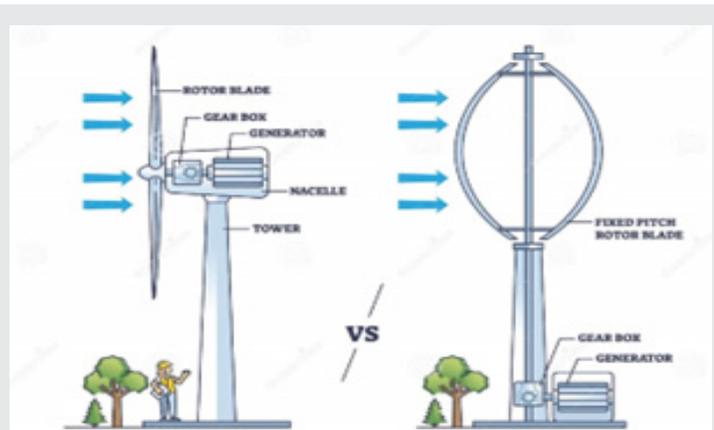


Figura 3. Aerogenerador eólico horizontal (izq) y vertical (der). Fuente: Dreamstime, 2024.

Las turbinas eólicas de eje horizontal son las más populares debido a que son más factibles a la hora de generar energía en grandes cantidades. Estas turbinas son las que conforman la mayoría de los parques eólicos alrededor del mundo; los parques eólicos conformados por este tipo de turbinas pueden ser de dos tipos: offshore y onshore.

Los parques eólicos onshore son los más comunes hasta la fecha, estos son los que se instalan sobre tierra. Mientras que los parques eólicos offshore son aquellos que se instalan sobre el mar.

Como se ha mencionado, el planeta está en un momento crucial donde se busca reducir la contaminación

debido al calentamiento global que está viviendo el mundo. La energía eólica cuenta con la gran ventaja que su generación tiene emisiones de gases de efecto invernadero prácticamente nulas comparada con otro tipo de generación de energía [8].

Dentro de las normas y certificaciones de las turbinas eólicas se debe tener en cuenta que los parques eólicos deben funcionar sin supervisión y permanecer dentro de sus límites de diseño durante 20 años bajo una amplia gama de condiciones, incluyendo eventos extremos. Además de que cada sitio cuenta con eventos distintos que hay que tener en cuenta a la hora de hacer la selección de turbina eólica más conveniente para el lugar.

El gran tamaño de las palas genera desventajas que se mencionan a continuación:

- Dificultad para hacer pruebas de calibración y de vida útil.
- Dificultad de transporte, debido a su peso y dimensiones.
- Dificultad geográfica de manejo (montañas en tierra o el oleaje en el mar).

Estas desventajas, dificultan el reciclado de las palas de los aerogeneradores cuando cumplen su tiempo de vida, aunado a que los métodos de reciclado aun son complejos y costosos.

La descripción de materiales de que constituyen un aerogenerador es crítica para analizar diferentes opciones de gestión, una vez alcanzado el final de su vida útil. Hoy en día, la mayoría de los componentes de las turbinas eólicas son reciclables, con una tasa de reciclabilidad que equivale al 85-90%. El metal de las torres se puede procesar como materia prima para la fabricación de acero, mientras que el hormigón de los cimientos se utiliza para materiales de construcción, construcción de carreteras o incluso se recicla para construir nuevas turbinas eólicas [9]. Sin embargo, lo que es un desafío es el reciclaje de las palas de los aerogeneradores.

Las palas de las turbinas eólicas se construyen a partir de laminados multicapa, hechas de fibra de vidrio o de carbono, y una matriz de polímero termoestable, unidas por capas adhesivas y parcialmente rellenas de espuma. El material termoendurecible dificulta el reciclaje de estas. El que sea tan difícil poder reciclar las palas de los aerogeneradores se ha vuelto un temor, ya que pueden generar un impacto negativo al cambio climático. Por esta misma razón plantea riesgos de contaminación del suelo y del agua durante cientos de años, ya que las palas contienen materiales no biodegradables.

Las palas tienen una estructura compuesta de resinas poliméricas reforzadas con fibras. Según los datos reportados en literatura, la fibra de vidrio y la

fibra de carbono son los tipos de fibras más comunes utilizadas en la producción de palas debido a su alto rendimiento mecánico y alta estabilidad térmica y química. Este tipo de fibras se pueden utilizar en una matriz separada o como compuestos híbridos para dotar a las palas de nuevas propiedades. Sin embargo, y debido a la preocupación ambiental de este tipo de fibras, las fibras naturales como la madera de balsa han recibido cierta atención recientemente debido a su bajo costo, disponibilidad y eco ambientales. Sin embargo, la madera de balsa todavía no se utiliza mucho debido a limitaciones relacionadas con la capacidad de carga, la baja estabilidad térmica y química y la alta absorción de humedad. Por lo tanto, la fibra de vidrio sigue siendo el tipo de fibra más utilizada en la fabricación de palas, seguida de la fibra de carbono. Aunque la fibra de carbono tiene una fuerza de resistencia a la abrasión excepcionales en comparación con la fibra de vidrio, es más caro en comparación con la fibra de vidrio, por eso la fibra de vidrio es la mejor opción para las palas [10].

La resina representa la materia responsable del ensamblaje y adhesión de las capas de fibra entre sí. La resina de poliéster insaturado se encuentra entre las resinas más utilizadas en esta aplicación debido a su bajo costo, rentabilidad y durabilidad. Sin embargo, la resina de poliéster insaturado contiene principalmente un compuesto de estireno altamente tóxico (según los definidos por la Agencia Europea de Productos Químicos y la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.) que puede causar contaminación del suelo durante su eliminación en vertederos.

Aunque no hay estadísticas específicas disponibles sobre palas de turbinas eólicas que contengan una configuración de fibra de carbono con resina de poliéster insaturado, la situación está empeorando con el tiempo debido al aumento de la demanda de energía eólica, esto implica un aumento de acumulación de palas de turbinas eólicas. Se espera que para 2050 se alcancen los 43 millones de toneladas de desechos de palas de turbinas eólicas.

Según las soluciones de reciclaje de palas de turbinas eólicas desarrolladas recientemente, la fracción de fibras, incluida la fibra de carbono, generalmente se extraen de estos desechos quitando la resina que cubre la superficie de las fibras mediante enfoques mecánicos, térmicos y químicos.

Es importante mencionar que aún no existen soluciones de reciclaje bien establecidas para determinadas piezas. Según GenVind, se desmantelan aproximadamente 10 toneladas de palas de turbinas eólicas cuando se desinstala 1 MW de capacidad instalada de energía eólica. Para poder combatir este desafío, se tiene como propuesta principal la

pirólisis, ya que, dado al proceso, se piensa que se puede llegar a separar la fibra de vidrio de la resina y de esta forma, darle una segunda vida a la materia utilizada. En este sentido, la pirólisis surge como la técnica de reciclado óptimo debido a que es un tipo de conversión termoquímica que implica la conversión de hidrocarburos complejos en compuestos de valor agregado utilizando calor y poco o nada de oxígeno [11].

MATERIAL Y MÉTODOS

El enfoque propuesto se centra en el diseño y mejora de un sistema de reciclaje para palas de turbinas eólicas utilizando el método de pirólisis. Este estudio se enfocará tanto en la recuperación efectiva de materiales como en la evaluación de la factibilidad técnica y ambiental del método.

Se escogerán palas de turbinas eólicas que hayan terminado su ciclo de vida, en particular modelos habituales como el G52 de 850 kW, que pesan cerca de 1,900 kg cada una. Estas palas se componen principalmente de resina termoestable y fibras de refuerzo, tales como fibra de vidrio o carbono.

Se empleará un reactor de pirólisis apto para el tratamiento térmico de las palas sin presencia de oxígeno. Este equipo deberá ser capaz de alcanzar y sostener las temperaturas necesarias para la descomposición adecuada de los compuestos poliméricos y la extracción de las fibras de refuerzo.

Para analizar los materiales recuperados y los subproductos del proceso de pirólisis, se utilizarán técnicas como la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR), la cromatografía de gases con espectrometría de masas (GC-MS) y análisis termogravimétricos (TGA).

Las palas serán primeramente seccionadas en partes manejables mediante herramientas industriales de corte. Luego, estas secciones serán limpiadas y preparadas para garantizar la uniformidad en el tamaño de las muestras para la pirólisis.

Se realizarán diferentes pruebas a diferentes temperaturas para obtener la optimización de recuperación de fibras y la minimización de desechos. Este proceso será monitoreado de cerca para evaluar la eficiencia en la separación y la calidad de los materiales obtenidos.

Las fibras de vidrio y carbono recuperadas serán examinadas para valorar su pureza, resistencia mecánica y viabilidad para ser reutilizadas en nuevos productos o aplicaciones. Igualmente, los subproductos de la pirólisis, como gases y residuos sólidos, serán estudiados para entender su impacto ambiental y potencial de reutilización.

Se llevará a cabo un análisis del ciclo de vida para medir el impacto ambiental del sistema de reciclaje sugerido, comparándolo con el depósito habitual de las palas en vertederos. Este análisis servirá para hallar puntos de mejora y confirmar la viabilidad del método de reciclaje propuesto Figura 4.

como metano y etano, que podrían utilizarse como fuentes alternativas de energía. Además, se espera que los residuos sólidos, compuestos mayormente por cenizas carbonosas y trazas de metales, encuentren usos en sectores como la construcción o en la creación de nuevos compuestos.

Desde una óptica ambiental, el esquema de reciclaje propuesto promete ser una alternativa más ecológica en comparación con el depósito tradicional en vertederos. Los estudios preliminares del análisis de ciclo de vida indican una disminución notable en el impacto ecológico, atribuible en gran medida a la reutilización de materiales y la valorización de los subproductos, aspecto vital para reducir la huella de carbono vinculada al ciclo de vida de las infraestructuras eólicas.

En cuanto a la eficacia global del proceso de reciclaje, se anticipa una tasa satisfactoria que refleje tanto la calidad de los materiales obtenidos como la reducción de desechos producidos. Esta eficiencia, proyectada en un 75%, señalaría un método de reciclaje efectivo y sustentable para las palas de turbinas eólicas Tabla 1.

Tabla 1 Estratificación por grupos

Tipo de Material	% de eficacia del proceso de pirólisis	% de Extracción	% de conservación de propiedades mecánicas	Subproductos de la pirólisis
Fibra de vidrio	75	95	85	Metano, etano y cenizas.
Fibras de carbono		98	90	

Fuente: Elaboración propia (2020).

Estas expectativas destacan el potencial de la estrategia planteada para enfrentar el reto del reciclaje de componentes eólicos al término de su vida útil, marcando un progreso significativo hacia la gestión sustentable de residuos en el sector eólico y contribuyendo a los esfuerzos globales por fomentar prácticas renovables más respetuosas con el medio ambiente.

CONCLUSIONES

El innovador proyecto de investigación propone un enfoque novedoso para reciclar aspas de aerogeneradores mediante pirólisis, ofreciendo una posible solución a uno de los principales retos en la sostenibilidad de la energía eólica. Los anticipados resultados teóricos se resumen de la siguiente manera:

- Se prevé que el método de pirólisis para recuperar fibras de vidrio y carbono de aspas eólicas sea prometedor, con una pureza proyectada que indica una exitosa separación de las resinas termoendurecibles.
- Este avance no sólo fomenta la minimización de desechos, sino que también, facilita la reintegración de materiales valiosos en el mercado, impulsando la economía circular en la industria eólica.
- Se espera que la integridad de las fibras recuperadas conserve gran parte de su resistencia mecánica original.

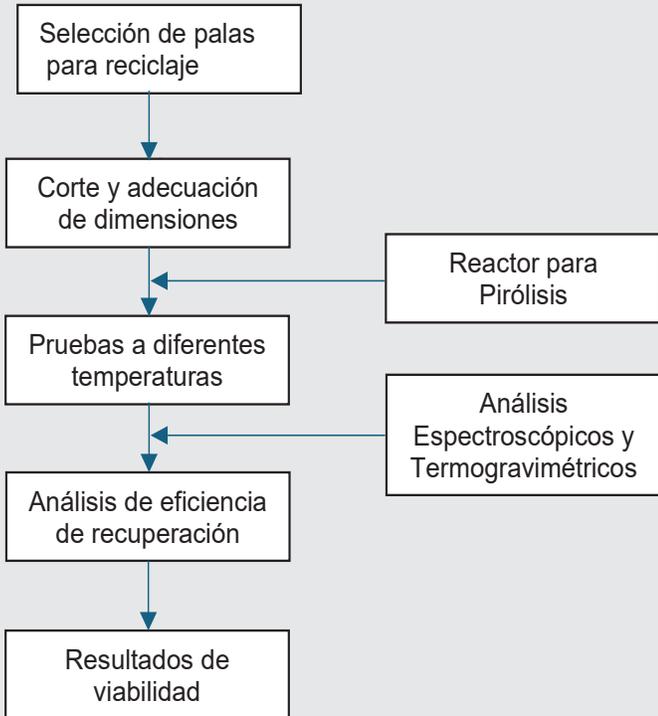


Figura 4. Propuesta metodológica para el reciclaje de palas eólicas.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

A través del marco planteado para el reciclaje de palas eólicas mediante pirólisis, encontramos resultados alentadores en aspectos fundamentales.

Lograríamos una extracción exitosa de fibras de vidrio y carbono con una pureza sobresaliente, previéndose un 95% para la fibra de vidrio y un 98% para las fibras de carbono. Este alto nivel de pureza muestra una separación eficaz de las fibras del compuesto termoestable, resaltando la eficiencia del proceso de pirólisis sugerido.

En cuanto a la calidad de las fibras extraídas, se proyecta que conserven una parte considerable de su resistencia mecánica original. Las estimaciones apuntan a que las fibras de vidrio mantendrían alrededor del 85% de su fortaleza, mientras que las de carbono preservarían hasta el 90%. Estas expectativas abren la posibilidad de reincorporar las fibras en usos secundarios o en la fabricación de nuevos materiales compuestos.

El análisis de los subproductos de la pirólisis indica el potencial de generar gases combustibles, tales

Esto podría reducir la dependencia de materiales nuevos y estimular el desarrollo de innovaciones en materiales y productos en industrias afines.

- Los subproductos resultantes, incluidos gases combustibles y residuos sólidos, ofrecen oportunidades para la generación de energía y la producción de nuevos materiales.
- Este enfoque holístico en el reciclaje resalta la necesidad de considerar el ciclo de vida completo de los materiales para maximizar los impactos positivos tanto ambientales como económicos.

Un análisis preliminar del ciclo de vida sugiere que este método de reciclaje podría significar una notable reducción del impacto ambiental en comparación con la convencional disposición en vertederos. Esta mejora en la huella de carbono refuerza el posicionamiento de la energía eólica como una fuente renovable genuinamente sostenible, enfrentando las críticas sobre los efectos ambientales al final de la vida útil de sus componentes.

A nivel global, estos hallazgos subrayan el potencial revolucionario de la pirólisis en la gestión de residuos de aspas eólicas, alineándose con objetivos de sostenibilidad más amplios y la lucha contra el cambio climático. La eficiente implementación de tales técnicas podría definir nuevos paradigmas para el sector eólico, garantizando que su aporte a la matriz energética global sea no solo libre de carbono, sino también responsable en términos de gestión de ciclo de vida.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Mishnaevsky Jr. Leon, *Recycling of wind turbine blades: Recent developments*, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, Volume 39, 2023, 100746, ISSN 2452-2236, <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100746>.

[2] Weiwei Zhang, Hao Yu, Binbin Yin, Arslan Akbar, K.M. Liew, *Sustainable transformation of end-of-life wind turbine blades: Advancing clean energy solutions in civil engineering through recycling and upcycling*, *Journal of Cleaner Production*, Volume 426, 2023, 139184, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139184>.

[3] Ming-xin Xu, Hai-wen Ji, Xiang-xi Meng, Jie Yang, Ya-chang Wu, Jin-yi Di, Hao Jiang, Qiang Lu, *Effects of core materials on the evolution of products during the pyrolysis of end-of-life wind turbine blades*, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Volume 175, 2023, 106222, ISSN 0165-2370, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106222>.

[4] Wooyoung Yang, Ki-Hyun Kim, Jechan Lee, *Up-cycling of decommissioned wind turbine blades through pyrolysis*, *Journal of Cleaner Production*, Volume 376, 2022, 134292, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134292>.

[5] Rahmani, F. M., & Zohuri, B. (2022). *Knowledge is power in four dimensions: Models to forecast future paradigm with artificial intelligence integration in energy and other use cases*. Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/book/9780323951128/knowledge-is-power-in-four-dimensions-models-to-forecast-future-paradigm>.

[6] Belachew Desalegn, Desta Gebeyehu, Bimrew Tamrat, Tassew Tadiwose, Ababa Lata, *Onshore versus offshore wind power trends and recent study practices in modeling of wind turbines' life-cycle impact assessments*, *Cleaner Engineering and Technology*, Volume 17, 2023, 100691, ISSN 2666-7908, <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100691>.

[7] Erik Lundtang Petersen, Peter Hauge Madsen, *Wind Farms*, Editor(s): Cutler J. Cleveland, *Encyclopedia of Energy*, Elsevier, 2004, Pages 449-463, ISBN 9780121764807, <https://doi.org/10.1016/B012-176480-X/00337-5>.

[8] Muhammad Irfan Sohail, Aisha A Waris, Muhammad Ashar Ayub, Muhammad Usman, Muhammad Zia ur Rehman, Muhammad Sabir, Tehmina Faiz, *Chapter One - Environmental application of nanomaterials: A promise to sustainable future*, Editor(s): Sandeep Kumar Verma, Ashok Kumar Das, *Comprehensive Analytical Chemistry*, Elsevier, Volume 87, 2019, Pages 1-54, ISSN 0166-526X, ISBN 9780128213209, <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2019.10.002>.

[9] Francesca Spini, Paolo Bettini, *End-of-Life wind turbine blades: Review on recycling strategies*, *Composites Part B: Engineering*, Volume 275, 2024, 111290, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111290>.

[10] Samy Yousef, Justas Eimontas, Inga Stasiulaitiene, Kęstutis Zakarauskas, Nerijus Striūgas, *Recovery of energy and carbon fibre from wind turbine blades waste (carbon fibre/unsaturated polyester resin) using pyrolysis process and its life-cycle assessment*, *Environmental Research*, Volume 245, 2024, 118016, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.118016>.

[11] Vikesh G. Lade, Sanjeevani K. Chavhan, Sanjay P. Shirsat, Bharat A. Bhanvase, *6 - Processes for the treatment of biomedical wastes: challenges and issues*, Editor(s): Nishikant A. Raut, Dadasaheb M. Kokare, Bharat A. Bhanvase, Kirtikumar R. Randive, Sanjay J. Dhoble, *360-Degree Waste Management*, Volume 2, Elsevier, 2023, Pages 123-138, ISBN 9780323909099, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90909-9.00007-1>.