DOI: 10.5281/zenodo.21780987

Obtención de Hidrógeno Verde Electrolítico y Fotocatalítico Mediante la Actividad del Grafeno

Obtaining of Electrolytic and Photocatalytic Green Hydrogen Through the Activity of Graphene

Margoth M. Gamboa L.[1], **Pedro López O.**[2, 3], **Jorge A. Mendoza P.**[3].

[1]Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ciencias Químico Biológicas.

Autor de correspondencia: jmendozap@ipn.mx

[2]Unidad Profesional Interdisciplinaria de biotecnología, Departamento de Bioingeniería del Instituto Politécnico Nacional.

[3]Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional, Maestría en Sostenibilidad e Innovación en Tecnología Ambiental.

Resumen

El cambio climático universal ha fomentado la demanda de recursos energéticos sostenibles, debido a que los hidrocarburos derivados de los combustibles fósiles contribuyen en acelerar el deterioro del medio ambiente. En este contexto, la eficiencia energética representa una de las soluciones energéticas sostenibles lo cual genera diferentes perspectivas con base en las energías renovables. Por lo que, la energía de hidrógeno (H_2) verde es una de las tecnologías emergentes optimizada hacia la sostenibilidad, debido a la densidad gravimétrica y a la eficiencia del combustible H_2. Este artículo presenta un estudio sobre la generación de H_2 verde a través de la división global del agua utilizando grafeno y sus derivados. Asimismo, se discuten los desafíos y beneficios del H_2 verde como fuente de energía renovable y se exploran los procesos de electrólisis y fotocatálisis para su producción resaltando el papel crucial que desempeña el grafeno y el óxido de grafeno en la mejora de la eficiencia de generación de H_2 a partir de energías renovables.

Palabras clave: *Hidrógeno verde, grafeno, electrólisis, fotocatálisis, energía renovable.*

Abstract

The global climate change crisis has fueled demand for sustainable energy resources, as fossil fuels contribute to accelerating environmental degradation. In this context, energy efficiency represents one of the sustainable energy solutions, offering various possibilities based on renewable energy sources. Therefore, green hydrogen (H_2) energy is an emerging technology optimized for sustainability, due to the gravimetric density and the efficiency of H_2 fuel. This article presents a study on green H_2 production through water splitting using graphene and its derivatives. It also discusses the challenges and benefits of green H_2 as a renewable energy source and explores the electrolysis and photocatalysis processes for its production, highlighting the crucial role that graphene and graphene oxide play in improving the efficiency of H_2 generation from renewable energy sources.

Keywords: *Green hydrogen, graphene, electrolysis, photocatalysis, renewable energy.*

Recibido: 20/05/2026; Aceptado: 12/06/2026; Publicado 03/08/2026

CC BY-NC-SA 4.0

Introducción

La conversión de la luz solar en hidrógeno (H2) mediante la división fotocatalítica del agua es una tecnología atractiva para producir energía limpia sin contaminación ni subproductos. Esta tecnología es una de las soluciones prometedoras para hacer frente a la creciente demanda de energía reduciendo los problemas medioambientales asociados.

En años recientes, se ha prestado gran atención al H2 como vector energético potencial y al uso de la tecnología en la división del agua como medio limpio y renovable para generar H2 verde utilizando la energía solar. El H2 verde ha sido reconocido como una alternativa prometedora de energía almacenable y limpia para el futuro. Esta tecnología puede potenciar nuevos métodos para generar H2 a partir de recursos renovables y sostenibles, con el fin de evitar la producción de gases de efecto invernadero derivados del consumo de combustibles fósiles y eludir los gravámenes impositivos a las emisiones de carbono que residen en una transición global desde las fuentes convencionales de energía hacia energías renovables (ER). Estas ER desempeñan un papel esencial para lograr un sistema de energía limpia y sostenible [1]. No obstante, un obstáculo inherente radica en la variabilidad e intermitencia de estas fuentes, lo cual exige el desarrollo de sistemas de almacenamiento a gran escala para gestionar estas fluctuaciones [2]. Uno de los sistemas de almacenamiento para el H2 más utilizados son los tanques presurizados, estos depósitos ayudan a mantener al H2 en forma gaseosa o líquida, así como, en forma sólida a través de hidruros metálicos [3]. Por otra parte, el H2 verde, gracias a su alto valor calorífico, se erige como un energético eficiente de almacenamiento. Además, presenta un rendimiento y capacidad calorífica similares a los combustibles fósiles tradicionales en términos de suministro y potencia [4]. Sin embargo, el H2 verde enfrenta desafíos que limitan su viabilidad comercial en el mercado energético mundial, debido a que almacenar H2 se convierte en un reto por su baja densidad [5]. Además, su producción a partir de una fuente primaria conlleva pérdidas y aumento en los costos de producción [6].

Nnabuife et al. [5] reportan que, resolver los desafíos técnicos y científicos en torno a la economía del H2 implica desarrollar infraestructura de distribución eficiente y limpia. Además, educar a las personas acerca de la producción de H2 verde, sus ventajas ambientales y sus aplicaciones en diversas industrias es esencial para maximizar su potencial [7]. A su vez, los países que cuentan con mayor proporción de ER (energía solar y eólica) y una infraestructura de gasoductos avanzada, tienen una ventaja en cuanto a costos de producción de H2 verde [3]. No obstante, McKenzie, [8] reporta que, se debe priorizar el enfoque en las ER y considerar el subsidio al H2 en etapas más avanzadas.

Sin embargo, los fotocatalizadores como el grafeno ofrecen una oportunidad interesante para generar H2 verde de una manera más eficiente desde el punto de vista energético mediante los procesos de la electrólisis y fotocatálisis [9]. Estas tecnologías son opciones prometedoras para producir H2. Por lo que, la conversión de la energía solar en energía química en forma de H2 se ha convertido área de investigación crítica, desafiante y atractiva. En la actualidad, la producción de H2 verde se erige como la opción sostenible óptima, ya que utilizando energías renovables procedentes de la energía solar, eólica o hidroeléctrica se puede dividir la molécula de agua en H2 y oxígeno (O2) mediante electrólisis [10].

Por otro lado, la división fotocatalítica del agua en H2 y O2 mediante catalizadores es un método eficaz para convertir la energía solar en H2 limpio y renovable. Este proceso es la opción más prometedora y renovable para la generación de H2. Recientemente, la división fotocatalítica del agua se ha empleado en el tratamiento de efluentes industriales y ha atraído una atención considerable. Por lo tanto, el objetivo de artículo fue evaluar la importancia de usar compuestos específicos basados en grafeno que puedan producir H2 verde mediante la electrólisis y fotocatálisis del agua.

Desarrollo

A. Los colores en el arcoíris del hidrógeno

En la Figura 1, se muestra la clasificación del H2 en ocho categorías denominadas colores de acuerdo al método de producción.

B. Hidrógeno de energías renovables

El H2 está catalogada como una energía secundaria cuya obtención depende de una fuente de energía primaria [6]. Actualmente, diversas tecnologías, como el reformado y descomposición de combustibles fósiles, generan cuatro mil millones de toneladas de H2 anualmente. El 95 % de esta producción es proveniente de combustibles fósiles que emiten CO2 [11]. Sin embargo, para mitigar este impacto se ha comenzado a explorar el uso de energías renovables para producir H2 sin emisiones. Por lo que, el H2 verde, obtenido mediante electrólisis utilizando energía solar o eólica podría proporcionar electricidad con emisiones nulas de CO2 y mitigación al cambio climático [9].

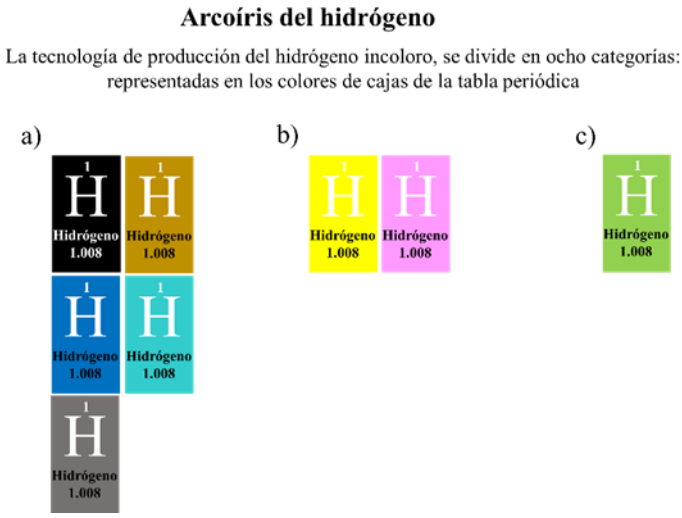

Figura 1. *Categoría del hidrógeno a) Colores negro, marrón, azul, turquesa y gris, se obtienen de combustibles fósiles, b) amarillo y rosa, se producen mediante electrolisis, c) verde, se genera mediante electrólisis y fotocálisis [8].*

C. Procesos de hidrógeno verde, separación de agua electrolítica y fotocatalítica y fotorreformado de compuestos orgánicos en fase líquida o gaseosa

La electrólisis es un procedimiento químico que emplea la electricidad para descomponer una sustancia por medio de reacciones de óxido-reducción (REDOX). Esta operación se realiza sumergiendo electrodos en un electrolito, que es una solución conductora, y aplicando una corriente eléctrica. Los iones presentes en el electrolito se desplazan hacia los electrodos y experimentan reacciones químicas en el ánodo y el cátodo, lo cual produce la descomposición o formación de nuevos compuestos [12].

La división fotocatalítica es un proceso que aprovecha la energía lumínica para catalizar rupturas de enlaces químicos en moléculas, lo que conduce a la descomposición de la sustancia en productos más simples [13]. Durante este proceso, se emplea un material fotocatalizador que, al absorber la luz, produce pares electrón-hueco (un electrón excitado y un hueco de carga positiva). Estos portadores de carga provocan las rupturas de los enlaces químicos, originando la formación de productos más simples como óxidos de carbono, de nitrógeno y de azufre. Este proceso es utilizado principalmente para

degradar contaminantes en el agua y aire, así también, es aplicado para la generación de H2 mediante la fotólisis del agua [14, 15, 16].

Por otro lado, la fotoformación de compuestos orgánicos es un procedimiento que implica la síntesis de compuestos orgánicos de bajo peso molecular y ricos en CHON, a través del aprovechamiento de la luz, que estimula las reacciones químicas. Esta técnica utiliza fotocatalizadores para liberar energía que activa la reacción de los sustratos orgánicos [10, 13]. Esta reacción favorece la síntesis de compuestos orgánicos que pasan de simples a complejas, lo que permite la producción de moléculas útiles en las industrias farmacéutica, agroquímica y de materiales. Además, la fotoformación de compuestos orgánicos presenta ventajas sobre los métodos de síntesis tradicionales. Estas ventajas inducen a ser más selectiva, sostenible y permite condiciones de reacción menos contaminantes [17].

D. Métodos de separación del agua

Fotólisis del agua utilizando fotocatalizadores

La fotólisis del agua, causa la división de la molécula de agua en H2 y O2 [18]. Para llevar a cabo este proceso se utilizan fotocatalizadores como óxido de titanio (TiO2) y óxido de grafeno (OG). Estos fotocatalizadores tienen la capacidad de absorber radiación solar y crear pares electrón-hueco [19, 20]. Esta reacción se representa mediante (1).

$$2H_2O + \text{luz solar} \rightarrow 2H_2 + O_2 \quad (1)$$

Fotoelectrocatálisis de materiales semiconductores

La Fotoelectrocatálisis es un proceso donde un fotocatalizador libera un flujo de electrones que son aprovechados en reacciones REDOX para la síntesis de moléculas orgánicas [21, 22]. En este proceso los materiales semiconductores como el TiO2, óxido de zinc (ZnO) y óxido de cerio (CeO2), actúan como fotocatalizadores al absorber luz solar, que generan pares de electrón-hueco. En este método no usa agua, si no, se emplean sustancias ricas en H2 como etanol o glicerol [14]. Los fotocatalizadores al ser excitados por la radiación solar, generan pares electrón-hueco que interactúan con moléculas de metanol en solución acuosa, lo cual se oxida en presencia de los electrones generados por el fotocatalizador, produciendo productos intermedios como formaldehído y ácido fórmico, y liberando finalmente H2 como producto principal [18, 23].

Fotoelectrocatálisis en celdas solares

La fotoelectrocatálisis es una tecnología que divide la molécula de agua en O2 y H2 a través de celdas solares como fotocatalizador utilizando la radiación solar como fuente de energía [24]. Además, esta tecnología puede degradar contaminantes logrando una alta eficiencia en la conversión de energía solar a energía química, generando H2 verde [25, 26]. La reacción que representa mejor la fotoelectrocatálisis en celdas solares es:

$$2H_2O + \text{luz solar} + \text{electricidad} \rightarrow 2H_2 + O_2 \quad (2)$$

En este proceso, se produce H2 y O2 como derivados de la desunión de la molécula de agua, a través de la electricidad lo cual es generada en una celda solar. Esta combinación de tecnologías permite mayor eficiencia en la generación de H2 a partir de la energía solar, ya que se aprovechan tanto la luz como la electricidad generada. Esta es una alternativa prometedora y viable para producir H2 debido a que reduce costos y complejidad [27].

E. Obtención de hidrógeno mediante actividad fotocatalítica de materiales a base de carbono (grafeno)

La producción de H2 generada por la división fotocatalítica de agua, basada en semiconductores como el grafeno y sus derivados implica dos opciones conceptuales: primero: el sistema está formado por dos dispositivos separados, uno para la recolección de luz y otro para la electrolización del agua (electrólisis acoplada a un panel fotovoltaico: PV). Segundo: el sistema integrado combina el componente de recolección de luz y la interfaz de división catalítica del agua en el mismo material llevando a cabo una reacción fotoelectroquímica [28].

F. Contribución de la fotocatálisis en la era del grafeno

La generación de H2 a través de la fotocatálisis utilizando el grafeno como fotocatalizador puede dividir la molécula de agua en O2 y H2 mediante la luz solar [13]. En este sentido, tanto el grafeno como su derivado (óxido de grafeno), se destacan por sus propiedades fotocatalíticas [19]. De acuerdo a lo descrito por An y Jimmy en 2011 [20], el óxido de grafeno mejora la sensibilidad a la luz, generando pares electrón-hueco con mayor eficiencia. Por lo cual, su actividad fotocatalítica se incrementa debido a sus propiedades modificadas, haciendo eficaz la desunión del H2 y O2 en la molécula del agua, bajo radiación solar. Además, la versatilidad del grafeno hace prometedora la generación de H2 a partir de diversas fuentes de ER, contribuyendo a la creación de una energía sostenible [18].

G. El desbordante entusiasmo de la novedad: buscando la cuadratura del círculo.

El mejor método para producir H2, en términos de impacto ambiental, es por medio de la electrólisis del agua, ya que el único subproducto es el O2 puro y la electricidad puede obtenerse a través de energía solar y

eólica [29]. Por otro lado, se han implementado cuatro tecnologías de electrólisis de agua para generar H2 verde. Por lo cual, cada una de estas tecnologías tiene ventajas y desventajas en su aplicación. Kumar & Lim [30] reportan que, la Primera tecnología: Electrólisis de agua alcalina (EAA) tiene ciertas ventajas por ser una tecnología bien establecida, consta de electrocatalizadores libres de metales solubles, bajo costo, tiene una estabilidad a largo plazo y es comercializada para aplicaciones industriales. Sin embargo, sus desventajas constan de densidades de corriente limitadas, cruce de gases y electrolito líquido de alta concentración (KOH a 5M). Segunda tecnología: Electrólisis del agua por intercambio de aniones a través de membrana (IAM) posee ventajas por ser electrocatalizadores libres de metales nobles y electrolito líquido de baja concentración (KOH a 1M). No obstante, sus desventajas son que, cuentan con una estabilidad limitada y su desarrollo terminal. Tercera tecnología: Electrólisis de agua por Intercambio de Protones a través de Membrana (IPM) dispone de ventajas por ser una tecnología comercializada, opera a densidades de corriente más altas, alta pureza de los gases, su diseño de sistema es compacto y brinda una respuesta rápida, pero, su costo de los componentes de la celda, electrocatalizadores de metales nobles y electrolito ácido son altos. Finalmente, la cuarta tecnología: la electrólisis de agua de óxido-sólido (EAOS): puede llevarse a cabo a altas temperaturas de trabajo y alta eficiencia, sin embargo, su estabilidad es limitada y su desarrollo es terminal.

Por otra parte, la división fotoelectroquímica del agua tiene gran potencial para la producción del H2 verde, sostenible a bajo costo. Sin embargo, requiere fotocatalizadores capaces de colectar espectros luminosos en la región visible [31, 32, 33].

H. Grafeno: el punto de conexión.

El grafeno, tiene una capa plana única de grafito, posee propiedades muy importantes como una alta movilidad del portador de carga, gran área de superficie, alta rigidez mecánica, además de ser de naturaleza biocompatible [34]. Por su alta movilidad de electrones y su gran área superficial el grafeno es un receptor de electrones eficaz para mejorar la transferencia de carga fotoinducida. Así mismo restringe la reacción inversa mediante la separación de los sitios de evolución del H2 y O2 en la desunión de la molécula del agua, mejorando así la obtención de H2 verde [28]. Por lo tanto, el grafeno y sus derivados se pueden combinar con óxidos metálicos (TiO2, VO2) con la finalidad de mejorar la obtención de H2 verde [28, 35].

I. Comparación del electrólisis frente a la fotocatálisis en términos técnicos y científicos para mejorar y lograr el desarrollo tecnológico del hidrógeno verde.

Dingenen & Verbruggen en 2021 [36], reportaron que la generación de H2 tomando como base al agua de mar, requiere cambios de pH mínimos en comparación con la electrólisis en agua de fuente natural, donde se podría aplicar cambios hasta de 9 unidades de pH. Estos cambios de pH en la fotocatálisis pueden causar reacciones secundarias adversas, como la formación de Cl2 y ClO−, corrosión e incrustaciones inducidas por ácidos o bases. Por otro lado, los requisitos adicionales para las celdas electrolíticas, como las membranas y el aporte eléctrico, no se requieren en los sistemas fotocatalítico [36].

Anantha et al., 2020 [37], compararon las eficiencias de eliminación de tres técnicas diferentes de tratamientos de fotocatálisis, adsorción y electrólisis para la eliminación de azul de metileno utilizando nanopartículas modificadas en la superficie. El menos eficiente fue fotocatalítico, pues los resultados indicaron que tuvo ~1, la adsorción 60 % a 70 % de eliminación de tinte a concentraciones de tinte iniciales más altas elegidas de 25 mg/L y 50 mg/L, mientras que los métodos de electrólisis mostraron una eliminación de tinte de 94 % a 95 % incluso a concentraciones iniciales más altas de tinte (50 mg/L). Estos autores, consideran que los resultados obtenidos pueden ser debidos al flujo continuo de corriente eléctrica, que genera cargas negativas capaces de degradar el tinte con mayor eficacia [34].

J. Hidrógeno como negocio sostenible, perspectivas globales y producción potencial en América Latina y México.

De Oliveira en 2019 [38], reportó que las emisiones de carbono generada por la electricidad (ACI) para América Latina y el Caribe se derivó por la combinación de combustibles fósiles y los efectos geográficos desde 1990 a 2015. En este periodo el ACI global disminuyó alrededor del 5 % en América Latina. Sin embargo, en el Caribe aumentó el 10 %. Por otro lado, en México la eficiencia térmica y la mezcla de combustibles mejoraron apreciablemente. Sin embargo, no fue suficiente para contrarrestar el aumento del ACI regional [38]. Bersalli et al., en 2020 [39], reportaron a través de un análisis econométrico de la efectividad de las políticas de energías renovables, mediante este estudio se analizó una base de datos durante 20 años en 20 países latinoamericanos y 30 europeos. Además, estos autores, reportan que estas políticas de desarrollo tienen un impacto positivo sobre la inversión en este tipo de energías. Por lo que, los incentivos fiscales otorgados a los posibles inversores, son deficientes para asegurar el despliegue de las ER en ambas regiones [39].

Conclusiones

La obtención de H2 verde a través de la actividad catalítica del grafeno en la electrólisis y fotocatálisis presenta beneficios en términos de eficiencia y sostenibilidad. Este alótropo del carbono puede mejorar la eficiencia en la obtención de H2 verde a partir de ER. En el tratamiento de electrólisis del agua utilizando grafeno como electrodo, es un proceso eficaz y estable, genera exclusivamente O2 puro como subproducto. Por otro lado, la fotocatálisis con grafeno como co-catalizador en presencia de la luz solar permite mayor eficiencia en la desunión del H2 y O2 de la molécula del agua. Esto se debe a sus propiedades conductoras y fotocatalíticas del grafeno, lo cual provoca mayor sensibilidad a la luz, mejora la obtención de pares electrón-hueco, lo que optimiza la descomposición del agua en H2 y O2 generando H2 verde como una energía alternativa sostenible.

Referencias

[1] Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. Energy Strategy Reviews, 24, 38-50.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006.

[2] Jin, C., Xiao, J., Hou, J., Wu, X., Zhang, J., & Du, E. (2021). Flexibility improvement evaluation of hydrogen storage based on electricity–hydrogen coupled energy model. Global Energy Interconnection, 4(4), 371-383.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.gloei.2021.09.004.

[3] Ye, Y., Lu, J., Ding, J., Wang, W., & Yan, J. (2022). Performance improvement of metal hydride hydrogen storage tanks by using phase change materials. Applied Energy, 320, 119290.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119290.

[4] Osman, A. I., Mehta, N., Elgarahy, A. M., Hefny, M., Al-Hinai, A., Al-Muhtaseb, A. A. H., & Rooney, D. W. (2022). Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. Environmental Chemistry Letters, 20(1), 153-188.
DOI: https://doi.org/10.1007/s10311-021-01322-8

[5] Nnabuife, S. G., Ugbeh-Johnson, J., Okeke, N. E., & Ogbonnaya, C. (2022). Present and projected developments in hydrogen production: a technological review⋆. Carbon Capture Science & Technology, 3, 100042.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100042.

[6] Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., & Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 146, 111180.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180

[7] Blohm, M., & Dettner, F. (2023). Green hydrogen production: Integrating environmental and social criteria to ensure sustainability. Smart Energy, 11, 100112.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.segy.2023.100112

[8] McKenzie, B. (2020). Shaping Tomorrow's Global Hydrogen Market. Vie De-Risked Investments.

[9] Dasari, A. (2025). Recent progress in graphene based metal oxide and metal sulfide hybrid composites for hydrogen production via photocatalytic water splitting: A review. Review of Materials Research, 100111.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.revmat.2025.100111

[10] Zamfirescu, C., Naterer, G. F., & Dincer, I. (2012). Photo-electrochemical chlorination of cuprous chloride with hydrochloric acid for hydrogen production. International journal of hydrogen energy, 37(12), 9529-9536.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.01.183

[11] Megía, P. J., Vizcaíno, A. J., Calles, J. A., & Carrero, A. (2021). Hydrogen production technologies: from fossil fuels toward renewable sources. A mini review. Energy & Fuels, 35(20), 16403-16415. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02501

[12] Bard, A. J., Faulkner, L. R., & White, H. S. (2022). Electrochemical methods: fundamentals and applications. John Wiley & Sons.

[13] Hou, H., Zeng, X., & Zhang, X. (2020). Production of hydrogen peroxide by photocatalytic processes. Angewandte Chemie International Edition, 59(40), 17356-17376.
DOI: https://doi.org/10.1002/anie.201911609

[14] Ran, J., Zhang, J., Yu, J., Jaroniec, M., & Qiao, S. Z. (2014). Earth-abundant cocatalysts for semiconductor-based photocatalytic water splitting. Chemical Society Reviews, 43(22), 7787-7812.
DOI:10.1039/C3CS60425J

[15] Osterloh, F. E. (2008). Inorganic materials as catalysts for photochemical splitting of water. Chemistry of Materials, 20(1), 35-54. DOI: https://doi.org/10.1021/cm7024203

[16] Cheng, P., Yang, Z., Wang, H., Cheng, W., Chen, M., Shangguan, W., & Ding, G. (2012). TiO2–graphene nanocomposites for photocatalytic hydrogen production from splitting water. International Journal of Hydrogen Energy, 37(3), 2224-2230. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.004

[17] Sugioka, K., Matsuda, T., & Ito, Y. (2018). Photofabrication. In Photochemistry for Biomedical Applications: From Device Fabrication to Diagnosis and Therapy (pp. 51-82). Singapore: Springer Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-0152-0

[18] Yeh, T. F., Cihlář, J., Chang, C. Y., Cheng, C., & Teng, H. (2013). Roles of graphene oxide in photocatalytic water splitting. Materials Today, 16(3), 78-84.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.mattod.2013.03.006

[19] Yutomo, E. B., Noor, F. A., & Winata, T. (2021). Effect of the number of nitrogen dopants on the electronic and magnetic properties of graphitic and pyridinic N-doped graphene–a density-functional study. RSC advances, 11(30), 18371-18380.
DOI: https://doi.org/10.1039/D1RA01095F

[20] An, X., & Jimmy, C. Y. (2011). Graphene-based photocatalytic composites. Rsc Advances, 1(8), 1426-1434.
DOI: 10.1039/C1RA00382H

[21] Rajput, H., Kwon, E. E., Younis, S. A., Weon, S., Jeon, T. H., Choi, W., & Kim, K. H. (2021). Photoelectrocatalysis as a high-efficiency platform for pulping wastewater treatment and energy production. Chemical Engineering Journal, 412, 128612.
DOI: https://doi.org/10.1016/j. cej.2021.128612.

[22] Brillas, E., & Garcia-Segura, S. (2023). Recent progress of applied TiO2 photoelectrocatalysis for the degradation of organic pollutants in wastewaters. Journal of Environmental Chemical Engineering, 11(3), 109635.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109635.

[23] Nomikos, G. N., Panagiotopoulou, P., Kondarides, D. I., & Verykios, X. E. (2014). Kinetic and mechanistic study of the photocatalytic reforming of methanol over Pt/TiO2 catalyst. Applied Catalysis B: Environmental, 146, 249-257.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.03.018

[24] Durante, C., Mazzucato, M., Bellardita, M., & Parrino, F. (2023). Fundamentals of photoelectrocatalysis. In Photoelectrocatalysis (pp. 7-81). Elsevier.
DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823989-6.00003-5.

[25] Balaić, D., Antonije Oreški, G., Radić, G., Kušić, H., Perović, K., & Kraljić Roković, M. (2023). Photoelectrocatalytic hydrogen production supported by ascorbic acid. Kemija u industriji: Časopis kemičara i kemijskih inženjera Hrvatske, 72(3-4), 179-186.
DOI: https://doi.org/10.15255/KUI.2022.050

[26] Ni, J., Wen, Y., Pan, D., Bai, J., Zhou, B., Zhao, S., ... & Zeng, Q. (2023). Light-driven simultaneous water purification and green energy production by photocatalytic fuel cell: A comprehensive review on current status, challenges, and perspectives. Chemical Engineering Journal, 473, 145162.
DOI: https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2023.145162.

[27] Ahmad, H., Kamarudin, S. K., Minggu, L. J., & Kassim, M. (2015). Hydrogen from photo-catalytic water splitting process: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43, 599-610.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.101

[28] Khan, M., Assal, M. E., Tahir, M. N., Khan, M., Ashraf, M., Hatshan, M. R., ... & Adil, S. F. (2022). Graphene/inorganic nanocomposites: Evolving photocatalysts for solar energy conversion for environmental remediation. Journal of Saudi Chemical Society, 26(6), 101544.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.jscs.2022.101544

[29] Khan, M. A., Zhao, H., Zou, W., Chen, Z., Cao, W., Fang, J., ... & Zhang, J. (2018). Recent progresses in electrocatalysts for water electrolysis. Electrochemical Energy Reviews, 1, 483-530.
DOI: https://doi.org/10.1007/s41918-018-0014-z

[30] Kumar, S. S., & Lim, H. (2022). An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. Energy reports, 8, 13793-13813.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.127

[31] Xiao, N., Li, S., Li, X., Ge, L., Gao, Y., & Li, N. (2020). The roles and mechanism of cocatalysts in photocatalytic water splitting to produce hydrogen. Chinese Journal of Catalysis, 41(4), 642-671.
DOI: https://doi.org/10.1016/S1872-2067(19)63469-8

[32] Huang, K., Li, C., Zheng, Y., Wang, L., Wang, W., & Meng, X. (2022). Recent advances on silver-based photocatalysis: Photocorrosion inhibition, visible-light responsivity enhancement, and charges separation acceleration. Separation and Purification Technology, 283, 120194.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120194.

[33] Xu, W., Liu, M., Xu, K., & Li, B. (2025). Recent advances in improving utilization efficiency of precious metal catalysts for hydrogen generation from hydrolysis of ammonia borane. Coordination Chemistry Reviews, 529, 216445.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.216445

[34] Singh, P., Shandilya, P., Raizada, P., Sudhaik, A., Rahmani-Sani, A., & Hosseini-Bandegharaei, A. (2020). Review on various strategies for enhancing photocatalytic activity of graphene based nanocomposites for water purification. Arabian Journal of Chemistry, 13(1), 3498-3520.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.12.001.

[35] Hafeez, H. Y., Lakhera, S. K., Bellamkonda, S., Rao, G. R., Shankar, M. V., Bahnemann, D. W., & Neppolian, B. (2018). Construction of ternary hybrid layered reduced graphene oxide supported g-C3N4-TiO2 nanocomposite and its photocatalytic hydrogen production activity. international journal of hydrogen energy, 43(8), 3892-3904.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.09.048

[36] Dingenen, F., & Verbruggen, S. W. (2021). Tapping hydrogen fuel from the ocean: A review on photocatalytic, photoelectrochemical and electrolytic splitting of seawater. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 142, 110866.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110866

[37] Anantha, M. S., Olivera, S., Hu, C., Jayanna, B. K., Reddy, N., Venkatesh, K., ... & Naidu, R. (2020). Comparison of the photocatalytic, adsorption and electrochemical methods for the removal of cationic dyes from aqueous solutions. Environmental Technology & Innovation, 17, 100612.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100612

[38] De Oliveira-De Jesus, P. M. (2019). Effect of generation capacity factors on carbon emission intensity of electricity of Latin America & the Caribbean, a temporal IDA-LMDI analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 101, 516-526.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.030

[39] Bersalli, G., Menanteau, P., & El-Methni, J. (2020). Renewable energy policy effectiveness: A panel data analysis across Europe and Latin America. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 133, 110351. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110351