

Bibliometric Analysis on Nanofluids Applied to Cooling Systems

Renny Nazario-Naveda¹, Santiago M. Benites¹, Frank Tomas-Caballero², Jennifer Carrasco-Acosta², Paolo Meza-Vives² and Ingrid Ramírez-Huancas²

¹Vicerrectorado de Investigación, Universidad Autónoma del Perú, Lima 15842, Perú, renny.nazario@autonoma.pe, santiago.benites@autonoma.pe

²Departamento de Ciencias, Universidad Tecnológica del Perú, Trujillo 13001, Perú; c26174@utp.edu.pe

Abstract— This study presents a bibliometric analysis on nanofluids applied to cooling systems. The findings reveal a sustained growth in publications between 2009 and 2025, reflecting the growing interest in the development of nanofluids and their use as refrigerants, driven by advances in nanoparticle synthesis and characterization technology, the increasing importance of sustainable methodologies, and the urgency of optimizing the energy and thermal efficiency of refrigeration systems. The bibliometric analysis reveals the dominance of Asian researchers (Kadirgama K, Ramasamy D, Yang L) and countries such as China, India, and Malaysia in scientific production, evidencing regional leadership in thermal applications. The co-occurrence analysis of indexed keywords allowed us to identify current lines of research, highlighting the development of hybrid photovoltaic-thermal systems, thermal management of Li-ion batteries, and heat exchanger optimization. Future projections highlight four strategic axes: consolidation of renewable systems, development of solutions for electronic systems, advances in multiscale modeling, and integration of artificial intelligence for the design of nanostructured materials. These findings underscore the key role of nanofluids in the energy transition, particularly for applications requiring sustainable and efficient thermal management, marking trends toward industrial innovation with a focus on sustainability.

Keywords—Nanofluid, cooling system, coolant, heat, temperature control.

Análisis Bibliométrico sobre Nanofluidos Aplicados a Sistemas de Refrigeración

Renny Nazario-Naveda¹, Santiago M. Benites¹, Frank Tomas-Caballero², Jennifer Carrasco-Acosta², Paolo Meza-Vives² and Ingrid Ramírez-Huancas²

¹Vicerrectorado de Investigación, Universidad Autónoma del Perú, Lima 15842, Perú, renny.nazario@autonoma.pe, santiago.benites@autonoma.pe

²Departamento de Ciencias, Universidad Tecnológica del Perú, Trujillo 13001, Perú; c26174@utp.edu.pe

Resumen— El presente estudio presenta un análisis bibliométrico sobre nanofluidos aplicados a sistemas de refrigeración. Los hallazgos revelan un crecimiento sostenido en las publicaciones entre 2009 y junio del 2025, reflejando el creciente interés en el desarrollo de nanofluidos y su uso como refrigerantes, impulsado por los avances en tecnología de síntesis y caracterización de nanopartículas, la creciente importancia de las metodologías sostenibles y la urgencia de optimizar la eficiencia energética y térmica de los sistemas de refrigeración. El análisis bibliométrico revela el dominio de investigadores asiáticos (Kadirgama K, Ramasamy D, Yang L) y países como China, India y Malasia en la producción científica, evidenciando un liderazgo regional en aplicaciones térmicas. El análisis de co-ocurrencia de palabras clave indexadas permitió identificar líneas actuales de investigación, destacando el desarrollo de sistemas híbridos fotovoltaico-térmicos, gestión térmica de baterías Li-ion, y optimización de intercambiadores de calor. Las proyecciones futuras destacan cuatro ejes estratégicos: consolidación de sistemas renovables, desarrollo de soluciones para sistemas electrónicos, avances en modelado multiescala, e integración de inteligencia artificial para diseño de materiales nanoestructurados. Estos hallazgos subrayan el papel clave de los nanofluidos en la transición energética, particularmente para aplicaciones que exigen gestión térmica sostenible y eficiente, marcando tendencias hacia la innovación industrial con enfoque en sostenibilidad.

Palabras clave—Nanofluido, sistema de refrigeración, refrigerante, calor, control de temperatura.

I. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global, reconocido como uno de los desafíos ambientales más críticos de la actualidad, resulta principalmente de la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, los cuales alteran el equilibrio térmico del sistema climático terrestre. Si bien este fenómeno se asocia principalmente con las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) procedentes de la combustión de hidrocarburos, otros compuestos, como los refrigerantes industriales, contribuyen significativamente a esta problemática. Estos fluidos, caracterizados por su capacidad de absorber y transferir calor en condiciones variables de temperatura y presión, son ampliamente utilizados en aplicaciones domésticas (refrigeración de alimentos), comerciales (climatización de espacios) e industriales (sistemas de refrigeración para transporte) [1]. Entre ellos, los hidrofluorocarbonos (HFC) —a diferencia de los

clorofluorocarbonos (CFC) e hidroclorofluorocarbonos (HCFC), que degradan la capa de ozono— exhiben un elevado potencial de calentamiento global (PCG), siendo hasta miles de veces más eficaces que el CO₂ en la retención de radiación infrarroja [2,3].

Ante este escenario, numerosos estudios se han orientado hacia el desarrollo de fluidos alternativos ambientalmente sostenibles, donde los nanofluidos han surgido como una solución innovadora en el ámbito de la refrigeración. Estos sistemas consisten en un fluido base convencional —como agua, glicoles o aceites— en el que se le incorporan nanopartículas metálicas o no metálicas (como óxidos, metales o nanotubos de carbono), modificando sustancialmente sus propiedades termofísicas [4]. Su elevada conductividad térmica y capacidad mejorada de transferencia de calor permiten incrementar la eficiencia energética en sistemas de refrigeración, reduciendo tanto el consumo de energía como las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero [5]. Si bien su implementación a escala industrial aún requiere investigación adicional, los nanofluidos constituyen una alternativa promisorio para optimizar el desempeño térmico en aplicaciones críticas —incluyendo sistemas electrónicos, procesos industriales y automotrices— bajo un enfoque de sostenibilidad ambiental. En este contexto, la literatura científica ha examinado exhaustivamente los efectos de la incorporación de nanopartículas en refrigerantes convencionales, buscando equilibrar eficiencia técnica y mitigación del impacto climático.

Diversos estudios han caracterizado sistemáticamente el impacto de nanofluidos en refrigerantes convencionales, empleando metodologías experimentales y numéricas [6]. Hernández et al. demostraron que la adición de nanopartículas de óxido de aluminio (Al₂O₃) a refrigerantes mejora significativamente sus propiedades térmicas mediante análisis de conductividad calorimétrica [7]. En paralelo, Barbosa et al. cuantificó un incremento en la conductividad térmica al dispersar nanopartículas en aceite mineral, sin afectar críticamente su viscosidad dinámica [8]. Para sistemas de refrigeración primaria, algunos estudios validaron que nanofluidos con TiO₂ aumentan el coeficiente de rendimiento gracias a su mayor miscibilidad con aceites lubricantes [9]. la aplicación de nanofluidos de Al₂O₃ como refrigerante en un

generador eléctrico diésel resultó en una reducción de la eficiencia de la cogeneración [10]. Otros investigadores caracterizaron basados en propilenglicol usando Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO y SiC , reportando mejoras en la transferencia de calor [11-13]. Sundar et al. cuantificaron mejoras del 29% en conductividad térmica y $1.5\times$ en viscosidad para nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT)/ Fe_3O_4 mediante el método numérico de Nusselt [14]. Para optimizar diseños, Song et al. desarrolló modelos de machine learning que predicen el comportamiento reológico of ZnO (50%)-MWCNTs (50%) / Ethylene glycol (20%)-water (80%) nano-refrigerant [15]. Finalmente, Suresh et al. demostraron que nanofluidos híbridos Al_2O_3 -Cu/agua incrementan el número de Nusselt en un 13.56% [16].

En los últimos tiempos, el análisis bibliométrico se ha consolidado como una herramienta clave para identificar las tendencias en distintas áreas de investigación y detectar posibles vacíos de conocimiento. Esta metodología permite evaluar la producción científica mediante indicadores cuantificables, como el número de citas, publicaciones, autores, palabras clave, y revistas especializadas. A través de este enfoque, es posible medir con precisión el impacto de investigadores e instituciones dentro de la comunidad académica, así como anticipar y describir sus dinámicas. La finalidad de la investigación fue identificar las tendencias actuales de investigación sobre nanofluidos aplicados a sistemas de refrigeración, orientando futuras líneas de investigación y evaluando las contribuciones científicas en este campo. Este análisis bibliométrico examinó las interconexiones y correlaciones entre las publicaciones científicas indexadas en Scopus entre 2009 y 2025, evaluando las tendencias de investigación según su importancia para el avance del conocimiento científico.

II. METODOLOGÍA

La base de datos Scopus, reconocida por su amplitud y rigor, se destaca como una de las fuentes más completas de resúmenes y citas de literatura científica revisada por pares, abarcando múltiples disciplinas. Scopus cuenta con una amplia aceptación en la comunidad académica, es, además, una de las bases de datos con mayor volumen de metadatos disponibles, con aproximadamente 20,000 revistas indexadas [17]. El siguiente estudio se enfocó exclusivamente en artículos científicos relacionados con el tema de “nanofluidos aplicados a sistemas de refrigeración”, bajo distintas formulaciones como “Nanofluids as coolants” o “Nanofluids as refrigerants”, recopilados de la base de datos Scopus durante el período comprendido entre 2009 y junio del 2025. Se tomó en cuenta los documentos en idioma inglés y se excluyeron los documentos que no eran de tipo artículo y conference proceeding. Los datos extraídos fueron depurados previamente para garantizar su precisión y luego estructurados en Microsoft Excel. En el proceso se organizaron variables como títulos, años de publicación, revistas, categorías

temáticas, autores, afiliaciones institucionales, países de origen, palabras clave y el número de citas. Esta metodología ayudó a identificar áreas de investigación centrales, temas interdisciplinarios, tendencias emergentes y campos especializados. La información general de la búsqueda se encuentra en la Tabla 1. Finalmente, el procesamiento y la visualización de redes temáticas se realizaron utilizando herramientas especializadas como Biblioshiny by RStudio (versión 4.3.3), Microsoft Excel (versión 16) y VOSviewer (versión 1.6.15).

TABLA I
INFORMACIÓN GENERAL SOBRE LA BÚSQUEDA EN SCOPUS

Descripción	Resultados
Periodo	2009 - 2025
Fuentes	57
Idioma	Inglés
Documentos	200
Palabras clave Plus	1530
Palabras clave de autor	747
Autores	783
Co-Autores por Documento	4.51
Co-autorías internacionales (%)	35.5

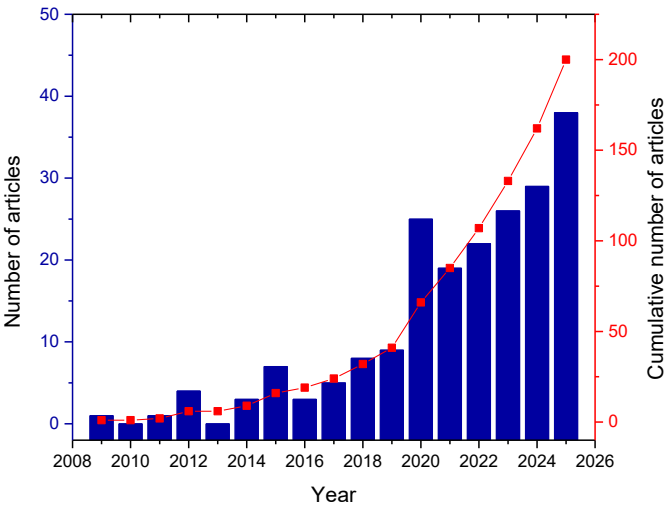


Fig. 1 Número de artículos publicados en el período 2009-2025.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Fig. 1 muestra la evolución temporal de las publicaciones en el tema de nanofluidos aplicados a sistemas de refrigeración, con un aumento constante del número acumulado de documentos entre 2009 y 2025. Este patrón refleja el creciente interés en el desarrollo de nanofluidos y su uso como refrigerantes, impulsado por los avances en tecnología de síntesis y caracterización de nanopartículas [18]. Este aumento de la producción científica puede también estar

vinculado a la creciente importancia de las metodologías sostenibles y la urgencia de optimizar la eficiencia energética y térmica de los sistemas de refrigeración [19,20]. En este sentido, se anticipa que la investigación sobre nanofluidos

aplicados a sistemas de refrigeración seguirá en expansión, dado su potencial para fortalecer tecnologías sostenibles y de alto rendimiento en transferencia de calor [21-24].

TABLA II
PUBLICACIONES MÁS CITADAS A NIVEL GLOBAL

Artículo	DOI	Citaciones Totales	CT por Año	CT Normalizadas
Leng C, 2015, Energy Convers Management	10.1016/j.enconman.2015.01.004	127	11.55	2.18
Yang L, 2019, Powder Technology	10.1016/j.powtec.2019.08.031	118	16.86	4.18
Khoshvaght-Aliabadi M, 2014, Energy Convers Manage	10.1016/j.enconman.2014.08.042	114	9.50	2.92
Amiri A, 2015, Energy Convers Manage	10.1016/j.enconman.2015.06.019	90	8.18	1.54
Wan Z, 2020, Energy Convers Manage	10.1016/j.enconman.2019.112386	66	11.00	3.59
Elnaggar Mha, 2011, Energy Convers Manage	10.1016/j.enconman.2011.03.001	64	4.27	1.00
Dib A, 2015, Powder Technol	10.1016/j.powtec.2014.08.074	64	5.82	1.10
Saadati H, 2018, Nucl Eng Technol	10.1016/j.net.2018.01.015	55	6.88	2.43
Normah G-M, 2015, Energy Convers Manage	10.1016/j.enconman.2015.02.008	55	5.00	0.94
Al Kalbani Ks, 2016, American J Heat Mass Transf	10.7726/ajhmt.2016.1012	51	5.10	1.58

En la Tabla 2 se muestran las publicaciones más relevantes sobre nanofluidos aplicados a sistemas de refrigeración. Leng C, 2015 con su publicación titulada “Optimization of thermal resistance and bottom wall temperature uniformity for double-layered microchannel heat sink” con 127 citas, ha servido como base teórica y de diseño para varias investigaciones sobre la optimización de sistemas de refrigeración [25]. Mientras que, Khoshvaght-Aliabadi M, 2014 (114 citas) en su publicación titulada “Influence of different design parameters and Al₂O₃-water nanofluid flow on heat transfer and flow characteristics of sinusoidal-corrugated channels” estudia el uso de nanofluido basado en agua y su efecto en las características de transferencia de calor [26]. Ambas resaltan como referencias fundamentales en el área de investigación. Por otro lado, Yang L, 2019 con 16.86 citas/año y un índice de citas normalizada de 4.18 emerge como contribución reciente con relevancia excepcional, el estudio titulado “Enhancing the thermal conductivity of SAE 50 engine oil by adding zinc oxide nano-powder: An experimental study” refleja avances en eficiencia energética y síntesis de nanopartículas [27]. En conjunto, los datos evidencian una evolución desde investigaciones pioneras hacia soluciones innovadoras con potencial industrial, donde la optimización termofísica y la sostenibilidad energética son ejes prioritarios. La predominancia de Energy Conversion and

Management como revista clave (5/10 estudios) subraya el enfoque en aplicaciones térmicas.

La Tabla 3 muestra los principales autores mediante el análisis bibliométrico de impacto local. Se observa una estratificación significativa en la productividad e influencia científica entre los autores que investigan nanofluidos en sistemas de refrigeración. Los datos muestran que Kadirgama K, investigador de la Universiti Malaysia Pahang [28], emerge como el investigador más influyente (h-index = 6, g-index = 8, CT = 83), evidenciando una trayectoria consolidada desde 2018 (m-index = 0.75). En contraste, Rahman MM (h-index = 5, CT = 102) exhibe mayor citación total pero menor densidad de publicaciones altamente citadas, sugiriendo contribuciones puntuales pero impactantes. Destaca especialmente el caso de LI S, cuya excepcional ratio de impacto anual (m-index = 1.0), pese a su reciente incorporación en 2023, refleja una adopción rápida de sus trabajos en la comunidad científica. La distribución asimétrica de métricas entre autores con similar antigüedad como Hamzah Waw y Maleque Ma, ambos con AP_inicio = 2020 sugiere divergencias en enfoques metodológicos o aplicaciones de los nanofluidos. Estos hallazgos subrayan la coexistencia de investigadores consolidados con influencia sostenida y nuevos actores con impacto inmediato, indicando tanto la madurez del campo como la emergencia de líneas innovadoras. La marcada variabilidad en el m-index (0.273–1.0) resalta la necesidad de

estudios longitudinales para discriminar entre tendencias efímeras y contribuciones perdurables en este dominio.

TABLA III
AUTORES MÁS RELEVANTES POR IMPACTO LOCAL

Autor	h-index	g-index	m-index	CT	NP	AP inicio
Kadargama K	6	8	0.75	83	8	2018
Rahman Mm	5	5	0.5	102	5	2016
Li Y	4	4	0.667	95	4	2020
Ramasamy D	4	5	0.5	44	5	2018
Hamzah Waw	3	3	0.5	43	3	2020
Li S	3	4	1	46	4	2023
Liu J	3	3	0.273	21	3	2015
Maleque Ma	3	3	0.5	28	3	2020
Sidik Nac	3	3	0.375	59	3	2018
Sopian K	3	4	0.5	50	4	2020
Urmi Wt	3	3	0.5	40	3	2020

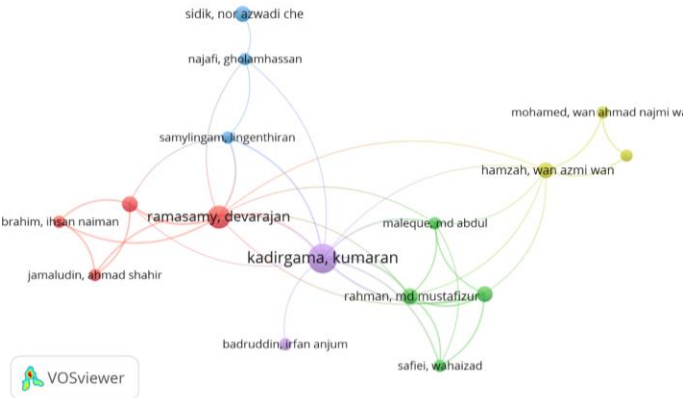


Fig. 2 Red de autores en coautoría (realizado en VOS-viewer).

La Fig. 2 muestra la red de coautoría, se revela un núcleo central de colaboración dominado por investigadores del sudeste asiático, particularmente de Malasia, como Kadargama, Kumaran y Ramasamy, Devarajan, quienes actúan como nodos principales conectando múltiples autores. Este núcleo de autores, sostiene una colaboración estrecha en publicaciones conjuntas, Ramasamy, quien trabaja en aplicaciones térmicas avanzadas en sistemas electroquímicos, es colaborador frecuente de Kadargama [29,30]. Esta estructura sugiere la existencia de un grupo consolidado de investigación, vinculado a instituciones académicas o proyectos colaborativos en áreas como ingeniería térmica o ciencia de materiales. Autores como Najafi, Gholamhassan (Iran), Mohamed, Wan Ahmad Najmi W. y Hamzah, Wan Azmi Wan aparecen más periféricos, lo que podría reflejar su incorporación reciente al grupo o roles secundarios en las publicaciones. La ausencia de autores occidentales en la red muestra una regionalización en la producción científica, donde

equipos asiáticos lideran las redes de conocimiento en este campo.

La Fig. 3 muestra la distribución de la producción científica por país, se usa un método de conteo completo, donde cada colaboración internacional suma una unidad a cada país. China, Malasia e India los países que lideran la lista con 220, 155 y 106 participaciones respectivamente [31], destacando la alta actividad investigadora en estos países y las colaboraciones recurrentes entre los autores observado en la Fig. 2. Por otro lado, el Reyno Unido destaca como el país occidental más activo, reflejando su tradición científica y su capacidad de integración en proyectos globales. La baja representación de EE.UU. y Canadá podría sugerir enfoques temáticos regionales o prioridades investigativas divergentes, mientras que casos como Nigeria y Kuwait reflejan posibles estrategias nacionales en investigación aplicada.

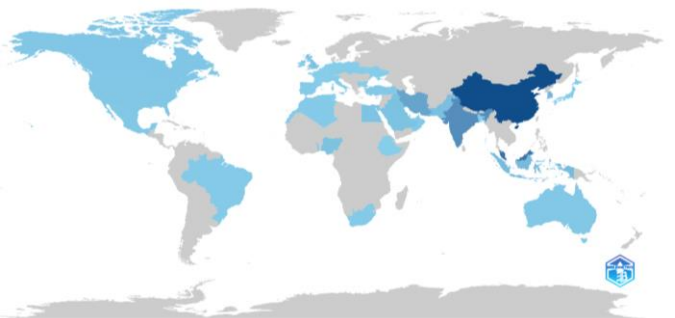
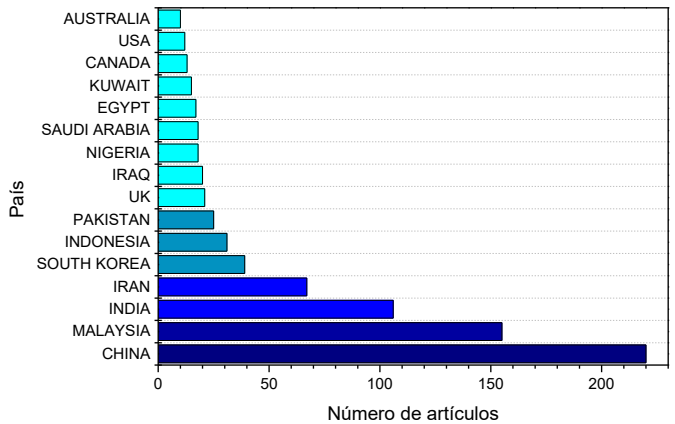


Fig. 3 Producción científica por país (realizado en Biblioshiny con R-Studio).

La Fig. 4 muestra: a) el número de publicación por países según autores correspondientes y b) las redes de colaboración entre países. Se destacan nuevamente, China, Malasia e India como los países con mayor cantidad de publicaciones con autores correspondiente. Entre estos tres países, China presenta una relación mayor entre Single Country Publication (SCP) y Multiple Country Publication (MCP), lo que sugiere que es uno de países con mayor iniciativa investigativa, representado por instituciones como Xi'an Jiaotong University, Nanjing Forestry University, Tongji University y

Guangdong University of Technology. Mientras que, Malasia e India tienen una relación SCP/MCP un poco más equilibrada, lo que sugiere el fuerte impulso en las redes colaborativas y su relación con su productividad científica. Aquí se destacan instituciones como Universiti Malaysia Pahang, Universiti Teknikal Malaysia Melaka, Universiti Teknologi Malaysia y Universiti Kebangsaan Malaysia en Malasia y National Institute of Technology, Tiruchirappalli en India [30,32,33].

Por otro lado, las redes de colaboración muestran cuatro núcleos dominados nuevamente por China, Malasia, India e Irán. Otros países como Reyno Unido y Arabia Saudita, aparecen con conexiones menos densas, pero con colaboraciones bien definidas mayormente con India y China. Formando un polo más aislado se encuentra Malasia, con conexiones con Iraq, Australia, Irán y Paquistán. Las alianzas estratégicas podrían deberse a intereses compartidos en el desarrollo de tecnologías relacionadas con el tema de estudio. Es notorio el liderazgo de países asiáticos demostrando su creciente interés regional en el desarrollo de nanofluidos como solución innovadora para mejorar la eficiencia energética en sistemas de refrigeración [34]. La intensa colaboración entre China, India, Malasia y otros países podría estar facilitando la transferencia de conocimiento y acelerando la innovación en este campo [35].

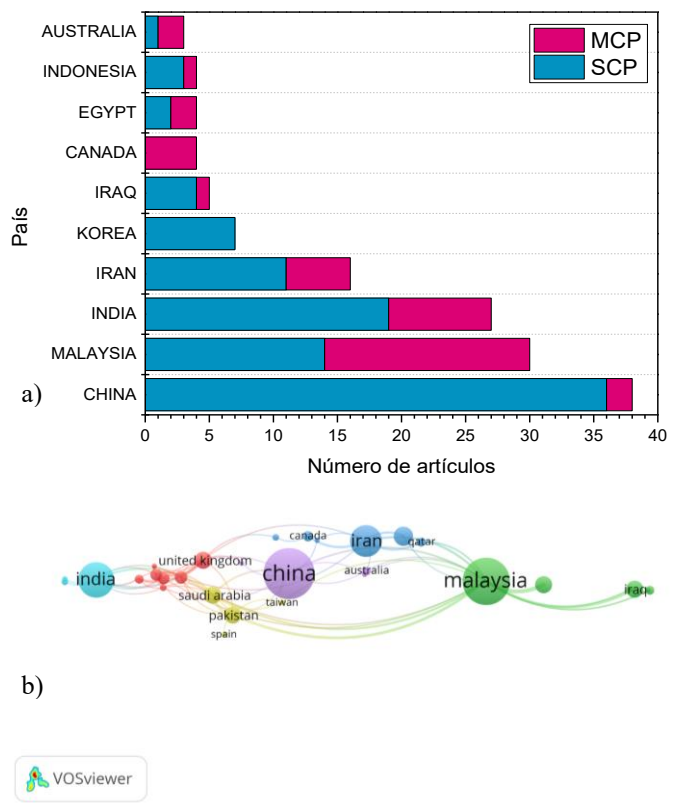


Fig. 4 a) Países de los autores correspondientes y b) Red de colaboración científica por países (realizado en VOS-viewer).

La Fig. 5 nos muestra la red de coocurrencia de palabras clave de índice que nos permite identificar patrones de asociación examinando la estructura temática y las relaciones conceptuales entre los términos clave. Entre los keywords más destacados tenemos “thermal” (17), “cooling” (16), “thermal conductivity” (14), “coolants” (14), “nanofluids” (13), “heat transfer performance” (12), “photovoltaic thermals” (11), “photovoltaic thermals” (11), “heat resistance” (9) y “energy efficiency” (8), estos se encuentran repartidos en 5 cluster (rojo, verde, azul, amarillo, y morado). El cluster rojo se centra en sistemas híbridos de energía solar térmica-fotovoltaica (PVT) con aplicaciones en refrigeración y gestión térmica avanzada, representado por palabras como “cooling”, “photovoltaic cells” and “collector efficiency”. El cluster refleja investigaciones interdisciplinarias en energías renovables hibridizadas, estos estudios podrían incluir el uso de nanofluidos como medio de transferencia de calor para mejorar la eficiencia térmica de los sistemas fotovoltaicos-térmicos [36-38]. El cluster verde se enfoca en la caracterización termofísica de nanofluidos y su aplicación en la transferencia de calor (“property”, “thermophysical”, “nanoparticles”, “nanofluids”, “thermal conductivity”, etc). Este cluster representa investigaciones sobre optimización de nanofluidos mediante sus propiedades termofísicas y su aplicación en ingeniería térmica como en sistemas de refrigeración por cambio de fase, intercambiadores de calor, o dispositivos de almacenamiento térmico [39,40].

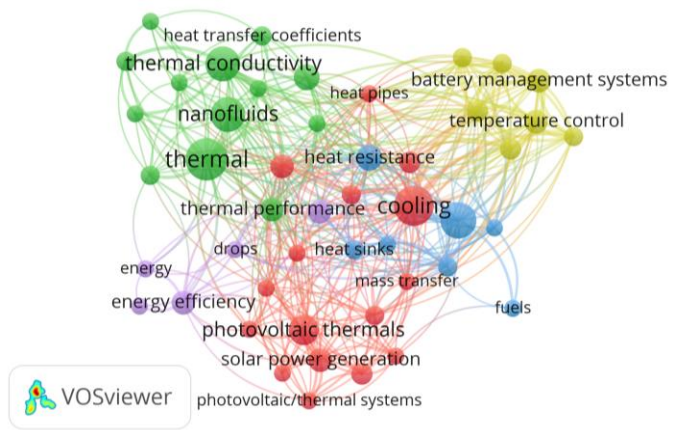


Fig. 5 Red de co-ocurrencia de palabras clave de índice (realizado en VOS-viewer).

El cluster amarillo, conformado por las palabras clave "lithium-ion battery", "battery pack", "battery management systems" y "temperature control", refleja una línea de investigación especializada en la gestión térmica y operativa de sistemas de almacenamiento energético basados en baterías de iones de litio. Esta línea de investigación combina ingeniería electroquímica, termodinámica y ciencia de materiales para mejorar la seguridad, vida útil y rendimiento de sistemas de baterías Li-ion mediante la termorregulación usando, por ejemplo, disipadores térmicos con nanofluidos

[5,35]. Finalmente, el cluster morado ("energy", "energy efficiency", "drops", "fins (heat exchange)", "energy utilization") se enfoca en sistemas de intercambio de calor orientados a la optimización energética, donde elementos como los disipadores son estudiados para mejorar la eficiencia en la transferencia térmica y el aprovechamiento de energía en aplicaciones industriales o renovables [41-43]. Por otro lado, el cluster azul ("coolants", "heat sinks", "microchannels", "heat resistance", "multiobjective optimization" and "genetic algorithms") aborda el diseño avanzado de sistemas de enfriamiento, combinando herramientas computacionales con estructuras innovadoras para minimizar la resistencia térmica y optimizar el rendimiento de disipadores y refrigerantes mediante enfoques multiobjetivo [25,44]. Ambos clusters reflejan la dualidad entre mejora de eficiencia energética (cluster morado) y solución de desafíos térmicos con métodos computacionales (cluster azul), destacando sinergias potenciales para aplicaciones en electrónica, climatización o energía sostenible.

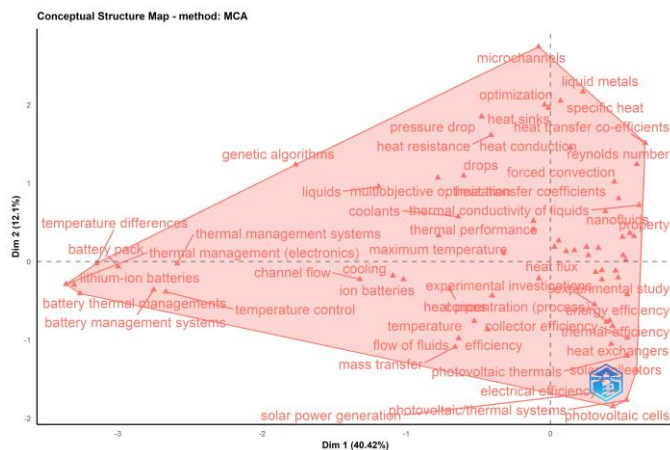


Fig. 6 Mapa de estructura conceptual (realizado en Biblioshiny con R-Studio).

El Mapa de Estructura Conceptual generado mediante el método de Análisis de Correspondencia Múltiple (Fig. 6) confirma una clara estratificación temática en la investigación sobre nanofluidos aplicados a sistemas de refrigeración, agrupando los conceptos en dos dimensiones principales. En el mapa se distinguen agrupamientos temáticos que reflejan las principales líneas de investigación dentro del campo. En el extremo derecho se concentran términos relacionados con propiedades térmicas fundamentales y aplicaciones, como "heat transfer coefficients", "thermal conductivity", "nanoparticles", "viscosity" y "photovoltaic cells", lo cual indica un enfoque en la optimización del rendimiento térmico mediante el uso de nanomateriales en aplicaciones energéticas. Hacia el centro se ubican conceptos técnicos y metodológicos como "coolants", "machine learning", "experimental study" y "thermal performance", que sugieren la integración de técnicas computacionales y experimentales para evaluar y mejorar la eficiencia de los nanofluidos. En la parte izquierda del mapa se agrupan temas relacionados con la gestión térmica de

baterías, como "thermal management systems", "battery pack" y "lithium-ion batteries", indicando una línea de investigación centrada en el control de temperatura en dispositivos electrónicos y de almacenamiento de energía. Este análisis revela un campo interdisciplinario con aplicaciones tanto en eficiencia energética como en la gestión térmica avanzada de sistemas tecnológicos. Estos hallazgos reflejan una dualidad en el campo, mientras algunos estudios se centran en aplicaciones específicas (por ejemplo, electrónica y energía), otros profundizan en los fundamentos técnicos y metodológicos, destacando oportunidades para la investigación interdisciplinaria que integra ambos enfoques.

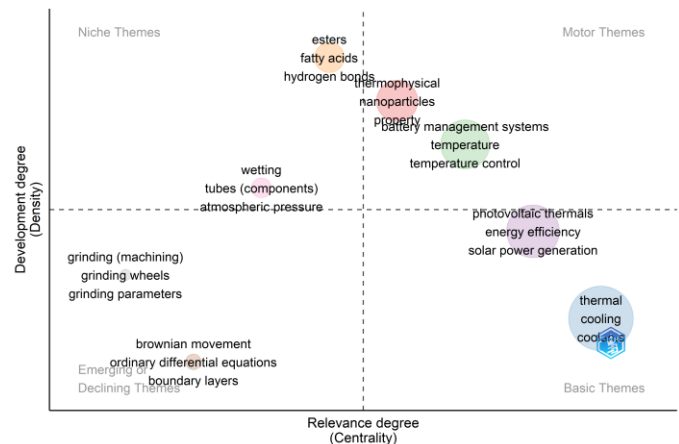


Fig. 7 Mapa temático (realizado en Biblioshiny con R-Studio).

El Mapa Temático mostrado en la Fig. 7 revela una estructura jerárquica de los temas asociados al uso de nanofluidos en sistemas de refrigeración, clasificados según su densidad (grado de desarrollo interno) y centralidad (relevancia transversal). En el cuadrante de Niche Themes, se identifican temas altamente especializados con bajo impacto interdisciplinario, como "wetting", "hydrogen bonds" y "tubes" (vinculados al Cluster Verde de caracterización termofísica), que reflejan investigación focalizada en propiedades de los fluidos y procesos de fabricación específicos. Por otro lado, los Emerging or Declining Themes, como el "brownian movement" y las "ordinary differential equations", sugieren un interés incipiente en el modelado matemático de fenómenos fundamentales y con oportunidades de crecimiento. Los Basic Themes, ubicados en regiones de alta centralidad, pero baja densidad, incluyen términos genéricos como "thermal" y "cooling", que actúan como puentes conceptuales entre clusters: conectan el Cluster Rojo (sistemas PVT), el Cluster Morado (eficiencia energética) y el Cluster Amarillo (gestión térmica de baterías). La presencia destacada de "photovoltaic thermal" (Cluster Rojo) y "energy efficiency" (Cluster Morado) en el cuadrante de alta densidad confirma la madurez de estas líneas de investigación aplicadas. La presencia de "thermophysical", "nanoparticles", "temperature control" y "battery management systems" en el cuadrante Motor Themes confirma que estas son líneas

prioritarias y maduras de investigación. Su alta densidad y centralidad refleja un enfoque en propiedades fundamentales de nanofluidos con aplicaciones críticas en gestión térmica en sistemas electrónicos (cluster verde y amarillo). La distribución mostrada en la Fig. 7 evidencia tres tendencias principales: (1) la consolidación de aplicaciones en energías renovables, (2) el desarrollo de soluciones para electrónica y movilidad eléctrica, y (3) los avances en comprensión fundamental de nanofluidos. La brecha entre estudios aplicados y fundamentales subraya la necesidad de integrar enfoques multiescala -desde el modelado nanométrico hasta el diseño de sistemas- para desarrollar nanofluidos con propiedades termofísicas optimizadas que respondan a desafíos críticos en eficiencia energética, refrigeración avanzada y almacenamiento sostenible [45,46].

IV. CONCLUSIONES

El análisis bibliométrico revela que la investigación en nanofluidos aplicados a sistemas de refrigeración está dominada por autores asiáticos, como Kadirgama K, Ramasamy D, (Malasia) y Yang L (China), cuyos trabajos destacan por su alto impacto local y colaboraciones internacionales. Los países con mayor producción científica son China, India, Malasia e Irán, evidenciando un liderazgo regional en el desarrollo de aplicaciones térmicas, mientras que naciones occidentales como EE.UU. y Reino Unido muestran menor participación. Geográficamente, el liderazgo de Asia en producción científica y redes de colaboración sugiere que continuarán dominando la innovación en este campo.

El estudio identificó cinco clusters clave: 1) Sistemas híbridos fotovoltaico-térmicos para energías renovables; 2) Caracterización termofísica de nanofluidos; 3) Gestión térmica de baterías; 4) Enfriamiento avanzado con microcanales; y 5) Eficiencia energética en intercambiadores de calor. El análisis factorial y el mapa temático proyecta cuatro ejes futuros en el área de investigación: 1) consolidación de sistemas híbridos fotovoltaicos-térmicos, 2) crecimiento en soluciones para termoregulación electrónica de baterías de iones de litio, 3) avances en modelado termofísico de nanofluidos, y 4) la integración de la inteligencia artificial para el diseño de nanofluidos y mejora en las propiedades de materiales nanoestructurados para nuevas aplicaciones que podrían redefinir el futuro de la gestión térmica sostenible. Estos hallazgos destacan el potencial de los nanofluidos para resolver desafíos críticos en gestión térmica sostenible, con especial relevancia en transición energética e innovación industrial.

REFERENCES

[1] Azmi, W. H., Sharif, M. Z., Yusof, T. M., Mamat, R., & Redhwan, A. A. M. Potential of nanorefrigerant and nanolubricant on energy saving in refrigeration system—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 415-428, 2017.

[2] Tollefson J. Nations agree to ban refrigerants that worsen climate change. *Nature*, 2016.

[3] Pearson, F. Refrigerants-past, present and future. *Refrigeration Technology*, 93(2), 2-7, 2004.

[4] Marcucci Pico, D. F., Parise, J. A. R., & Bandarra Filho, E. P. Nanolubricants in refrigeration systems: a state-of-the-art review and latest developments. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(2), 88, 2023.

[5] Tao, Q., Zhong, F., Deng, Y., Wang, Y., & Su, C. A review of nanofluids as coolants for thermal management systems in fuel cell vehicles. *Nanomaterials*, 13(21), 2861, 2023.

[6] Colangelo, G., Favale, E., Milanese, M., de Risi, A., & Laforgia, D. Cooling of electronic devices: Nanofluids contribution. *Applied Thermal Engineering*, 127, 421-435, 2017.

[7] Hernández, D. C., Nieto-Londoño, C., & Zapata-Benabithé, Z. Analysis of working nanofluids for a refrigeration system. *Dyna*, 83(196), 176-183, 2016.

[8] Barbosa, C. R. F., Sousa, E. H. V., Fontes, F. A. O., Almeida, I. M. G., & Azevedo, V. F. Characterization of nanofluids for use in refrigeration compressors: determination of dynamic viscosity, thermal conductivity and stability. *Holos*, 32(8), 36-46, 2016.

[9] Ahmed, F. Experimental investigation of Al₂O₃-water nanofluid as a secondary fluid in a refrigeration system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 101024, 2021.

[10] Kulkarni, D. P., Vajjha, R. S., Das, D. K., & Oliva, D. Application of aluminum oxide nanofluids in diesel electric generator as jacket water coolant. *Applied Thermal Engineering*, 28(14-15), 1774-1781, 2008.

[11] Akilu, S., Baheta, A. T., Kadirgama, K., Padmanabhan, E., & Sharma, K. V. Viscosity, electrical and thermal conductivities of ethylene and propylene glycol-based β -SiC nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*, 284, 780-792, 2019.

[12] Chilambaran, L., Prakash, R., Shanu, J. P., & Murugasen, P. Investigation on the electrical conductivity of aqueous glycol based ZnO nanofluids. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 12(3), 865-870, 2019.

[13] Palabiyyik, I., Musina, Z., Witharana, S., & Ding, Y. Dispersion stability and thermal conductivity of propylene glycol-based nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research*, 13(10), 5049-5055, 2011.

[14] Sundar, L. S., Singh, M. K., & Sousa, A. C. Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT-Fe₃O₄/water hybrid nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 52, 73-83, 2014.

[15] Song, X., Baghoolizadeh, M., Alizadeh, A. A., Jasim, D. J., Basem, A., Sultan, A. J., ... & Piromradian, M. Utilizing machine learning algorithms for prediction of the rheological behavior of ZnO (50%)-MWCNTs (50%)/Ethylene glycol (20%)-water (80%) nano-refrigerant. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 156, 107634, 2024.

[16] Suresh, S., Venkataraj, K. P., Selvakumar, P., & Chandrasekar, M. Effect of Al₂O₃-Cu/water hybrid nanofluid in heat transfer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 38, 54-60, 2012.

[17] Giwa, S. O., Adegoke, K. A., Sharifpur, M., & Meyer, J. P. Research trends in nanofluid and its applications: A bibliometric analysis. *Journal of Nanoparticle Research*, 24(3), 63, 2022.

[18] Bang, I. C., Heo, G. Y., Jeong, Y. H., & Heo, S. An axiomatic design approach of nanofluid-engineered nuclear safety features for generation III+ reactors. *Nuclear engineering and technology*, 41(9), 1157-1170, 2009.

[19] Said, Z., Rahman, S. M., Sohail, M. A., Bahman, A. M., Alim, M. A., Shaik, S., ... & El-Sharkawy, I. I. Nano-refrigerants and nano-lubricants in refrigeration: synthesis, mechanisms, applications, and challenges. *Applied Thermal Engineering*, 233, 121211, 2023.

[20] Fox, E. B., Visser, A. E., Bridges, N. J., & Amoroso, J. W. Thermophysical properties of nanoparticle-enhanced ionic liquids (NEILs) heat-transfer fluids. *Energy & Fuels*, 27(6), 3385-3393, 2013.

[21] Elnaggar, M. H., Abdullah, M. Z., & Mujeebu, M. A. (2011). Experimental analysis and FEM simulation of finned U-shape multi heat pipe for desktop PC cooling. *Energy Conversion and Management*, 52(8-9), 2937-2944, 2011.

[22] Zhao, D., Liu, Y., & Wu, C. Reductive dechlorination of 2, 4-dichlorophenol by using MWCNTs-Pd/Fe nanocomposites prepared in the presence of ultrasonic irradiation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 105, 106871, 2024.

- [23] Romatoski, R. R., Hu, L. W., & Forsberg, C. W. Thermal hydraulic licensing limits for a prismatic core fluoride salt cooled high temperature test reactor. *Proceedings of the International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP)*, 2014.
- [24] Mousavizadeh, S. M., Ansarifard, G. R., & Talebi, M. Assessment of the TiO₂-water nanofluid effects on heat transfer characteristics in VVER-1000 nuclear reactor using CFD modeling. *Nuclear Engineering and Technology*, 47(7), 814-826, 2015.
- [25] Leng, C., Wang, X. D., Wang, T. H., & Yan, W. M. Optimization of thermal resistance and bottom wall temperature uniformity for double-layered microchannel heat sink. *Energy Conversion and Management*, 93, 141-150, 2015.
- [26] Khoshvaght-Aliabadi, M. Influence of different design parameters and Al₂O₃-water nanofluid flow on heat transfer and flow characteristics of sinusoidal-corrugated channels. *Energy conversion and management*, 88, 96-105, 2014.
- [27] Yang, L., Mao, M., Huang, J. N., & Ji, W. Enhancing the thermal conductivity of SAE 50 engine oil by adding zinc oxide nano-powder: an experimental study. *Powder Technology*, 356, 335-341, 2019.
- [28] Kadrigama, K. Nanofluid as an alternative coolant in machining: a review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 69(1), 163-173, 2020.
- [29] Urmi, W. T., Rahman, M. M., Hamzah, W. A. W., Kadrigama, K., Ramasamy, D., & Maleque, M. A. Experimental Investigation on the stability of 40% ethylene glycol based TiO₂-Al₂O₃ hybrid nanofluids. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and thermal Sciences*, 69(1), 110-121, 2020.
- [30] Hisham, S. M., Sazali, N., Kadrigama, K., Ramasamy, D., Kamarulzaman, M. K., Samylingam, L., ... & Kok, C. K. Hybrid CNC-MXene Nanolubricant for Tribological Application: Characterization, Prediction, and Optimization of Thermophysical Properties Evaluation. *Processes*, 12(10), 2024.
- [31] Chen, J., Wang, S., Liu, X., Zhang, T., Chai, X., & He, H. Radioactive study of oxidation-corrosion materials activated by neutron in lead-bismuth eutectic reactors. *Annals of Nuclear Energy*, 211, 111037, 2025.
- [32] Hongkun, L., Noor, M. M., Wenlin, Y., Kadrigama, K., Badruddin, I. A., & Kamangar, S. Experimental research on heat transfer characteristics of a battery liquid-cooling system with $\perp$ -shaped oscillating heat pipe under pulsating flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 224, 125363, 2024.
- [33] Muhamed Rafaizul, N. I. A., Mohd Rosli, M. A., Salimen, N., Habibi, I. A., Permasari, A. A., & Herawan, S. G. Applications of Graphene Nanoplatelets as Working Fluids in Photovoltaic Thermal Systems: A Review. *International Journal of Nanoelectronics & Materials*, 17(3), 2024.
- [34] Urmi, W. T., Rahman, M. M., Kadrigama, K., Malek, Z. A. A., & Safiei, W. A comprehensive review on thermal conductivity and viscosity of nanofluids. *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, 91(2), 15-40, 2022.
- [35] Al Shdaifat, M. Y., Zulkifli, R., Sopian, K., & Salih, A. A. Effect of CuO/water nanofluid as a coolant for liquid cold plate on electric vehicle battery cells. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 2270-2283, 2024.
- [36] Radwan, A., Katsura, T., Memon, S., Abo-Zahhad, E. M., Serageldin, A. A., & Nagano, K. Analysis of a vacuum-based photovoltaic thermal collector. *Energy Reports*, 6, 236-242, 2020.
- [37] El-Nagar, D. H., Emam, M., El-Betar, A. A., & Nada, S. A. Combining active and passive cooling techniques for maximizing power generation and thermal utilization of photovoltaic panels. *Renewable Energy*, 123310, 2025.
- [38] Kazaz, O., & Abu-Nada, E. Thermal performance of nano-architected phase change energetic materials for a next-generation solar harvesting system. *Energy Conversion and Management*, 327, 119541, 2025.
- [39] Manimaran, M., Norizan, M. N., Kassim, M. H. M., Adam, M. R., Abdullah, N., & Norrahim, M. N. F. Critical review on the stability and thermal conductivity of water-based hybrid nanofluids for heat transfer applications. *RSC advances*, 15(18), 14088-14125, 2025.
- [40] Hemalatha, N., Kamaraja, A. S., Bhuvanesh, A., & Karthik Kumar, K. Analysis on insulating characteristics of natural high oleic ester and mineral oil based blended oil under accelerated thermal aging exposure. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(23), 30383-30400, 2024.
- [41] Patil, P. K., Dewangan, R., & Wagh, H. K. Performance Of A Vapour Compression Refrigeration System Using Different Concentrations Of Go Nanolubricants And A Safe Charge Of R600a Refrigerant. *Migration Letters*, 21(S3), 1337-1345, 2024.
- [42] Ikumapayi, O. M., Ogedengbe, T. S., Laseinde, O. T., Kazeem, R. A., Afolalu, S. A., Ogundipe, A. T., ... & Akinlabi, E. T. A concise review on the Suitability of Nano-Refrigerants for Residential Refrigeration Systems (RRS). In *E3S Web of Conferences*, 391, 01084, 2023.
- [43] Mukherjee, S., Ebrahim, S., Mishra, P. C., Ali, N., & Chaudhuri, P. A review on pool and flow boiling enhancement using nanofluids: Nuclear reactor application. *Processes*, 10(1), 177, 2022.
- [44] Muhammad, A., Allauddin, U., & Iranzo, A. Investigation of laminar flow and heat transfer performance of Gallium alloy based nanofluids in minichannel heat sink. *Thermal Science and Engineering Progress*, 56, 103000, 2024.
- [45] Li, S., Zhang, H., Li, S., Wang, J., Wang, Q., & Cheng, Z. Advances in hierarchically porous materials: Fundamentals, preparation and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 202, 114641, 2024.
- [46] Kada, B., Hussain, I., Pasha, A. A., Khan, W. A., Tabrez, M., Juhany, K. A., ... & Othman, R. Significance of gyrotactic microorganism and bioconvection analysis for radiative Williamson fluid flow with ferromagnetic nanoparticles. *Thermal Science and Engineering Progress*, 39, 101732, 2023.