

Generación de hidrógeno a partir de la gasificación solar de combustibles sólidos utilizando un reactor de medios porosos híbrido

Andrés Arriagada Romero^{1,2}, Natalia Arancibia Arancibia¹, Robert E. Hayes², Petr Nikrityuk², Mario Toledo Torres¹

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile. Email: andres.arriagada@usm.cl; natalia.garcia.14@sansano.usm.cl; mario.toledo@usm.cl

²Department of Chemical and Materials Engineering, University of Alberta, Canadá. Email: arriagad@ualberta.ca; hayes@ualberta.ca; nikrityu@ualberta.ca

Resumen

Hidrógeno (H₂) y gas de síntesis pueden ser producidos a partir de diversas fuentes mediante reformado de vapor y oxidación parcial. La combustión híbrida filtrada (HFC) consiste en la gasificación de combustibles sólidos o, simultáneamente, en el reformado de combustibles gaseosos y sólidos, sosteniendo reacciones homogéneas y heterogéneas, alcanzando altas temperaturas en el frente de reacción. Este trabajo desarrolla un modelo matemático para generar H₂ utilizando un reactor HFC, mediante gasificación del combustible sólido con aporte solar, utilizando COMSOL Multiphysics. Se consideró un lecho poroso de esferas de alúmina y partículas de carbón sub-bituminoso dispuestas aleatoriamente y concentrando la energía solar mediante una placa emisora. El rendimiento de hidrógeno fue 86.5%, eficiencia solar-combustible 49.5% y eficiencia energética 72.3% para 600 kW/m² de potencia solar. En base a los resultados, esta investigación proyecta la producción de H₂ a partir de combustibles fósiles, representando una línea base para la gasificación solar.

Palabras clave: Hidrógeno; Gasificación solar; Reactor de medios porosos híbrido; Eficiencia energética; COMSOL Multiphysics.

Abstract

Hydrogen (H₂) and syngas can be produced from various sources via steam reforming and partial oxidation. Hybrid filtration combustion (HFC) refers to the gasification of solid fuels or by simultaneous reforming of gaseous and solid fuels, supporting homogeneous and heterogeneous chemical reactions within the reactor, and reaching high temperatures in the reaction wave. This work aims to develop a simulation model to obtain H₂ utilizing a HFC reactor, through allothermal gasification of the solid fuel particles from solar energy. Solar gasification of sub-bituminous coal was numerically assessed by using COMSOL Multiphysics, considering a porous bed of aleatory arranged spherical particles and concentrating solar energy through an emitter plate. The H₂ yield reached 86.5%, solar-fuel efficiency 49.5%, and energy efficiency 72.3% for 600 kW/m². Driving the production of H₂ and syngas mainly from fossil fuels towards renewable generation represents a baseline for future perspective of HFC and solar gasification.

Keywords: Hydrogen; Solar gasification; Hybrid porous media reactor; Energy efficiency; COMSOL Multiphysics.

1. Introducción

El cambio climático es el resultado del excesivo consumo de combustibles fósiles [1], emisiones históricas de dióxido de carbono (CO₂) [2], así también de otros gases de efecto invernadero, que han propiciado el aumento sostenido de la temperatura global [3], por lo que encontrar fuentes de energía renovables y tecnológicamente factibles es crucial. En este contexto, el desarrollo de tecnologías de producción de hidrógeno (H₂) y gas de síntesis

(una mezcla de H₂ y monóxido de carbono, CO) han sido protagonistas de la concentración de esfuerzos hacia procesos eficientes y eco-amigables [4], con un enfoque particular sobre alternativas renovables y carbono-neutrales [5,6]. La combustión en medios porosos se ha reconocido como un método viable de generación de H₂ y gas de síntesis por oxidación térmica parcial, principalmente de combustibles gaseosos y líquidos [7–9]. No obstante, incorporando combustible sólido al lecho del reactor, el fenómeno de la combustión híbrida filtrada

(HFC), que consiste en la gasificación de combustibles sólidos o, de manera simultánea, del reformado de combustibles gaseosos y sólidos [10,11], ha sido estudiada considerando como materia prima carbón, biomasa, polietileno, entre otros, y como agente gasificante aire, vapor, CO₂, y flujo de premezcla aire/combustible [12,13]. La recirculación de calor dentro de los reactores HFC permite alcanzar altas temperaturas en el frente de reacción, sosteniendo reacciones homogéneas y heterogéneas en la unidad [14]. En efecto, el proceso de gasificación es endotérmico, y puede ocurrir de forma autotérmica donde el calor se produce por oxidación parcial, como también de forma alotérmica, donde la energía se puede suministrar desde una fuente externa [15,16].

Particularmente, la energía solar tiene la disponibilidad y flexibilidad de ser usada en variadas aplicaciones, como la generación de energía a través energía térmica y fotovoltaica, así también en el procesamiento de químicos para la producción de nuevos materiales y combustibles solares [17,18]. Dado que diversas rutas energéticas de tecnologías de conversión del recurso solar a H₂ se encuentran en la literatura; termoquímico solar, concentración solar y fotoelectroquímico [19], se han hecho esfuerzos exhaustivos por hibridar el proceso de combustión con radiación solar directa y comprender su efecto sobre el fenómeno. Nathan et al. [20] plantea que la sinergia entre energía renovable y fósil a través de un combustor solar híbrido (CSH) tiene el potencial de facilitar la transición desde tecnologías convencionales hacia un futuro renovable gracias al uso de infraestructura compartida y bajas pérdidas térmicas asegurando un proceso continuo disminuyendo las emisiones de CO₂. Adicionalmente, Medwell et al. [21] concluyó que agregar la radiación solar directa a una llama libre afectó de forma importante al comportamiento de las llamas y a la formación de hollín, lo que representa en sí mismo un problema crucial a resolver para escalar la tecnología de CSH. Una forma de integrar energía solar en plantas de generación de energía térmica convencional fue teórica y numéricamente evaluada por Hosseini et al. [22] a través del precalentamiento de aire en una planta de potencia de ciclo combinado operando en un modo de combustión sin llama. Esto permitió que las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) sean sumamente bajas debido a la distribución homogénea de calor y el diseño compacto.

La gasificación solar se ha mostrado como una tecnología prometedora para la producción de

hidrógeno desde diversos combustibles carbonosos [23–25]. Este proceso presenta varios beneficios, como una reducción notable de agentes contaminantes hacia la atmósfera [26–28] y el almacenamiento químico de energía solar. Además, el calor transferido a través del combustible puede limitar la tasa de gasificación dentro de un reactor de lecho empacado [26,29]. Ruiz et al., 2019 [17] investigó los perfiles de temperatura y flujos de calor en un lecho empacado calentado mediante radiación que simula un flujo de energía solar. Un quemador de medio poroso fue localizado en el fondo del lecho empacado para simular un flujo de calor solar concentrado impuesto. En este tipo de reactores, los mecanismos de transferencia de calor pueden ser intensificados por propiedades inherentes al uso de medios porosos, como las bajas emisiones, alta estabilidad térmica, recirculación de calor, y límites de inflamabilidad extendidos [30–32], donde ocurre la conducción entre partículas, radiación térmica, y convección entre fluido y partículas. En el proceso de interacción entre los mecanismos de transferencia de calor dominantes, se han analizado modelos discretos y diferentes enfoques considerando medios continuos, donde la conductividad térmica efectiva (λ_{eff}) ha sido analizada como un parámetro crítico dentro de reactores solares [13,33–37].

Este estudio tiene por objetivo desarrollar e implementar un modelo enfocado a un reactor solar para la producción de hidrógeno y gas de síntesis desde carbón sub-bituminoso y vapor de agua, utilizando el software COMSOL Multiphysics, analizando críticamente diversos parámetros operacionales.

2. Metodología

2.1 Esquema experimental

El estudio experimental de la producción de hidrógeno y gas de síntesis desde carbón sub-bituminoso usando aporte solar y vapor de agua se realiza utilizando tres sistemas principales, claramente demarcados en la Figura 1. Los principales componentes del sistema solar incluyen un baño termostático, modulador de potencia, una caldera de funcionamiento dual (electricidad y/o energía solar), y circuitos de almacenamiento y suministro de energía solar, mientras se trabaja con un reactor con tecnología de combustión híbrida filtrada (HFC) [12].

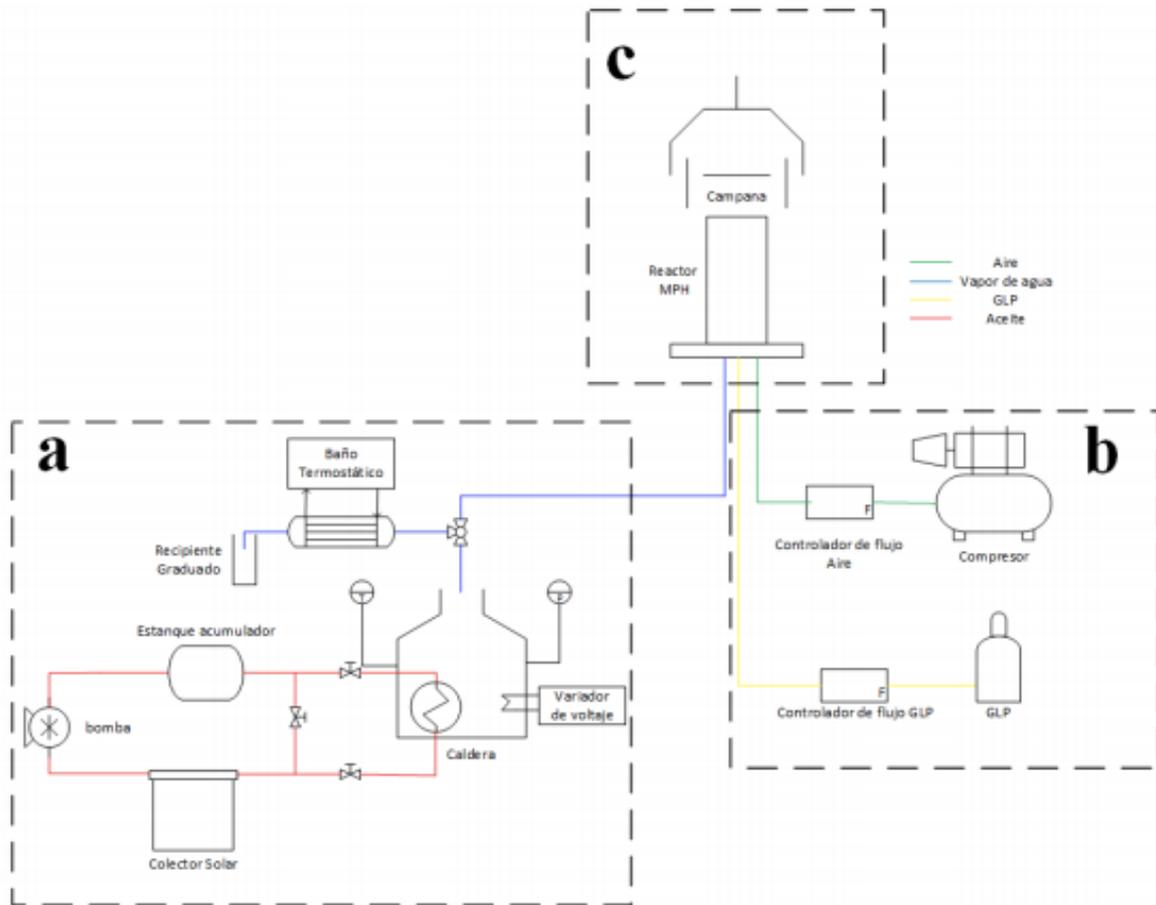


Figura 1: Esquema de setup experimental. (A) Sistema de concentración solar. (B) Control y suministro de combustible y aire. (C) Reactor de medios porosos híbrido.

2.2 Simulación numérica

2.2.1 Método de elementos finitos (MEF)

COMSOL Multiphysics es un software comercial que resuelve sistemas de ecuaciones diferenciales parciales (EDP) por análisis de elementos finitos para simular un amplio rango de físicas y aplicaciones de problemas de ingeniería. Para modelar el sistema, se utilizarán los módulos de transferencia de calor en fluidos, transferencia de calor en sólidos, transporte de especies concentradas, ecuación de Brinkman en un modelo 2D-axisimétrico con configuración transiente.

La Figura 2 muestra un diagrama del reactor analizado en este estudio, el que tiene 50 mm de altura, y esferas de alúmina en su interior de 5 mm de diámetro.

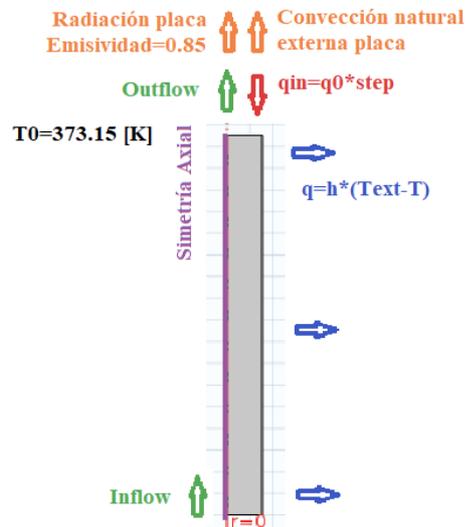


Figura 2: Diagrama de reactor utilizado en simulación numérica.

2.2.2 Conservación de masa y energía

La ecuación de conservación de masa es descrita por la ecuación (1) y modelada en la física de transporte concentrado de especies incluido en COMSOL Multiphysics.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega_i) + \nabla \cdot (\rho\omega_i \mathbf{u}) = -\nabla \cdot \mathbf{j}_i + R_i \quad (1)$$

Conservación de energía para el sólido:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u}_{trans} \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (\mathbf{q} + \mathbf{q}_r) = -\alpha T: \frac{\partial S}{\partial t} + \dot{Q} \quad (2)$$

Conservación de energía para el fluido:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (\mathbf{q} + \mathbf{q}_r) = -\alpha T \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho \right) + \tau: \nabla \mathbf{u} + \dot{Q} \quad (3)$$

Donde ρ es la densidad de mezcla, ω_i es la fracción másica de la especie i , \mathbf{u} es la velocidad media de la mezcla, \mathbf{j}_i es el flujo másico relativo de la especie i , R_i es la tasa de generación y consume de la especie i , C_p es el poder calorífico, T es la temperatura absoluta, \mathbf{u}_{trans} es la velocidad del vector de movimiento de traslación, \mathbf{q} es el flujo de calor por conducción, \mathbf{q}_r es el flujo de calor por radiación, α es el coeficiente de expansión térmica, S es el segundo tensor de Piola-Kirchoff, y \dot{Q} representa la interacción entre las fases sólida y fluido, y el calor producido por las reacciones químicas ocurridas dentro del reactor.

2.2.3 Mecanismos de transferencia de calor

La conducción de calor entre dos partículas en contacto se describe por:

$$q_i = -\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (4)$$

Donde λ_{eff} es la conductividad térmica efectiva del medio poroso, definida por Bubnovich y Toledo [38] según:

$$\lambda_{eff} = (1 - \varepsilon) \cdot \lambda_s + \frac{32 \cdot \sigma \cdot d_p \cdot \varepsilon \cdot T_s^3}{9 \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (5)$$

Donde ε es la porosidad, λ_s es la conductividad térmica de las esferas de alúmina, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, d_p el diámetro de partícula, y T_s la temperatura del sólido. También se incorpora el coeficiente de transferencia de calor entre las fases sólida y gaseosa definido por Mathis y Ellzey [39] según:

$$a = \frac{6 \cdot \lambda_s \cdot (1 - \varepsilon)}{d_p^2} \left[2.0 + 1.1 \cdot \text{Pr} \left(\frac{\varepsilon \cdot \rho_g \cdot u_g \cdot d_p}{\mu_g} \right)^{0.6} \right] \quad (6)$$

La transferencia de calor por convección dada entre las fases fluida y sólida se describe por:

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (7)$$

Donde h es el coeficiente de convección, A es la superficie en contacto entre las fases sólida y fluida, y T_∞ es la temperatura del fluido.

El flujo de calor interno de la superficie radiante hacia el ambiente se encuentra dado por:

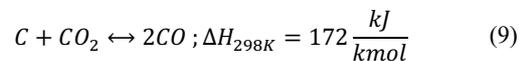
$$-n \cdot \mathbf{q} = d_s \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_0^4 - T^4) \quad (8)$$

Donde ε es la emisividad de la superficie, y T_0 la temperatura ambiente.

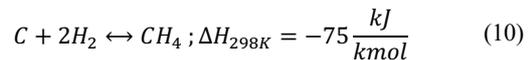
2.2.4 Gasificación solar de carbón sub-bituminoso

La gasificación solar de carbón sub-bituminoso utilizando vapor implica múltiples reacciones químicas ocurriendo dentro del reactor de medios porosos híbrido (HFC). Los parámetros cinéticos están descritos por la ley de Arrhenius. Como la gasificación del combustible sólido es un proceso endotérmico, es dependiente de la energía y suministrada y temperatura alcanzada. Las siguientes reacciones químicas son cruciales para comprender la gasificación solar de carbón sub-bituminoso:

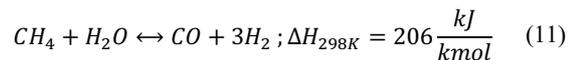
Reacción de Boudouard:



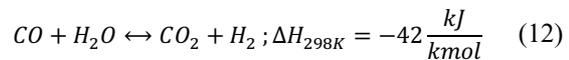
Hidrogasificación-Cracking de metano (CH₄):



Reformado de Metano:



Reacción Water Gas Shift (WGS):



El reformado de metano o SMR (Steam Methane Reforming) es un proceso que oxida el CH₄ elevándolo a altas temperaturas a partir de gas natural con vapor de agua como catalizador, para producir hidrógeno y gas de síntesis, siendo este proceso el responsable de aproximadamente un 70% de la producción de hidrógeno en la actualidad [40]. Las reacciones antes mencionadas son altamente dependientes de la temperatura y presión del sistema. Bajo 700K, las especies C, CH₄, CO₂, H₂O son termodinámicamente estables. Sin embargo, las reacciones ocurren a una temperatura entre 800 y 1,100K. Cuando se produce la gasificación a unos 1,200K el gas de síntesis tiene una calidad mayor respecto un caso donde el calor suministrado a la reacción es proveniente de una combustión de carbón, sumado a la ventaja de disminuir la emisión de contaminantes de especies no deseadas.

2.2.5 Ecuación de Brinkman

Se deben considerar las partículas inertes dentro del reactor para describir de mejor forma el fenómeno que ocurre dentro del equipo. La ecuación (13) describe la ecuación de continuidad, donde el aumento de masa dentro de una unidad de volumen del medio porosos equivale a la densidad del flujo másico en este volumen.

$$\frac{\partial \varphi \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{u}) = 0 \quad (13)$$

El balance de momentum representa la interacción del medio poroso dentro del reactor, donde el balance que gobierna el fenómeno es dado por la ecuación de Brinkman [41]:

$$\frac{\rho_f}{\varphi} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \nabla \cdot \left[-p \mathbf{I} + \frac{1}{\varphi} \left\{ \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right\} \right] - \frac{\mu}{K} \mathbf{u} \quad (14)$$

Donde φ es la porosidad del lecho, ρ_f es la densidad del fluido, \mathbf{u} es el vector superficial de velocidad, p es la presión, K la permeabilidad, μ es la viscosidad, e \mathbf{I} es el tensor unitario. El lado izquierdo de la ecuación (14) representa el momento inercial por unidad de volumen, y el lado derecho de la ecuación denota el momentum actuando sobre el fluido por unidad de volumen. El primer término a la derecha corresponde al momentum causado por el gradiente de presión, el segundo es el término de fuerzas viscosas y el tercero la resistencia de bulbo de Darcy [42].

2.2.6 Casos de estudio

Como se ha indicado anteriormente, las simulaciones serán realizadas en el software COMSOL Multiphysics, donde se considerará que no existe gradiente de temperatura al interior de las esferas de alumina, es decir, presentan una distribución uniforme de temperatura. Por otra parte, existen pérdidas de calor

por convección en las paredes del reactor, lo que afecta al fluido en su interior. La presión inicial será de 2 at, y los gases ingresarán a 373K, con un flujo de 0.3 L/min, una velocidad de filtración de 0.138 m/s, y una fracción másica de 0.5 en el caso de vapor de agua, y 0.5 para metano en la premezcla. Se trabajará con un mallado con 28,156 elementos de dominio y 796 elementos de contorno. Respecto a las pérdidas de calor de la placa emisora, se considerará convección de tipo natural hacia el ambiente, y radiación de superficie hacia el ambiente, con una emisividad de 0.85. Se evaluará el perfil de temperatura a lo largo del reactor y la influencia de las reacciones químicas predominantes en la fracción másica de especies para diferentes potencias.

3. Resultados y discusión

3.1 Perfiles de temperatura

Al incluir el transporte concentrado de especies se incorporan al cálculo del modelo los resultados de las reacciones que ocurren al interior del reactor, incluyendo la convección y difusión de las especies químicas, además de las pérdidas de calor por convección y radiación. La temperatura del gas y sólido, calor de reacción y velocidad para la reacción de reformado de metano y WGS están dados por la Figura 3:

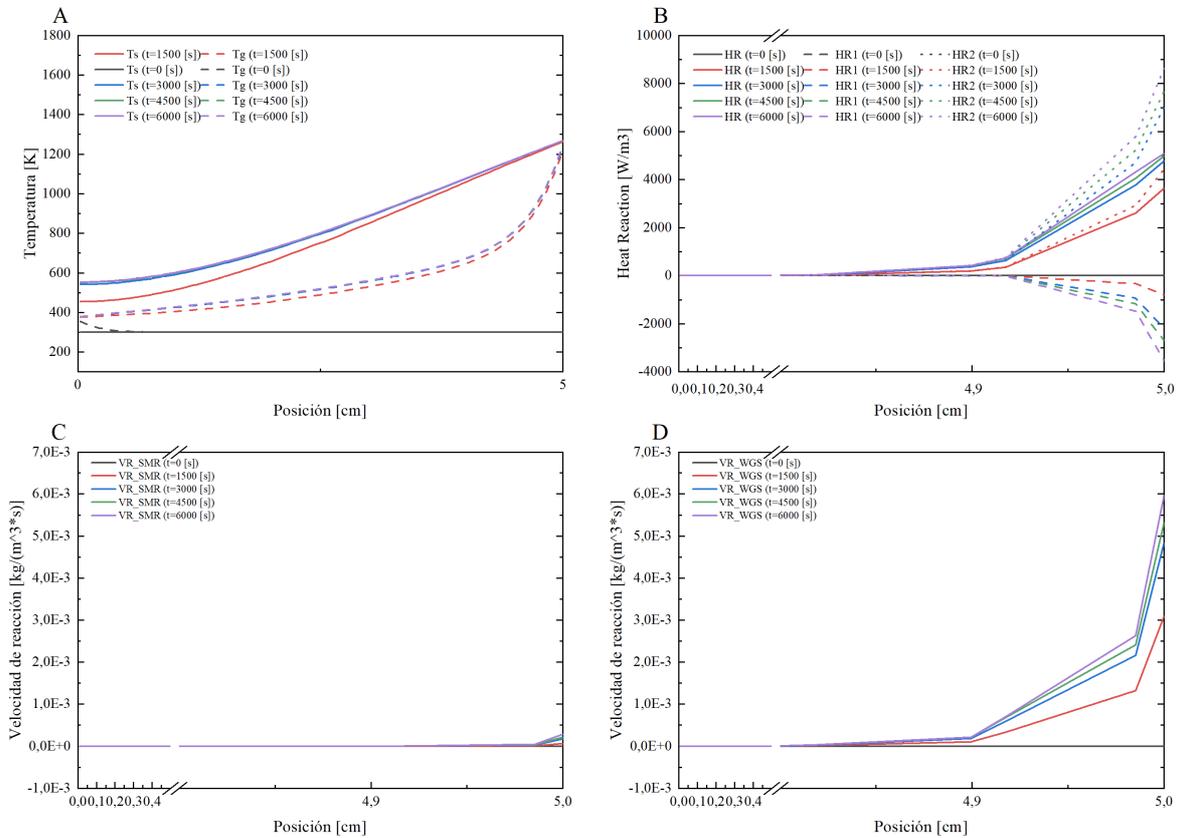


Figura 3: (A) Temperatura del gas y el sólido para un ingreso de 190 kW/m². (B) Calor de reacción para un ingreso de 190 kW/m². (C) Velocidad de reacción para reformado de metano. (D) Velocidad de reacción para WGS.

Se puede observar en el reformado de metano, que la reacción se activa a una temperatura entre los 1,100 y 1,200 K, lo que es acorde con lo reportado en la literatura por Dobrego et al. [43]. En el caso de la reacción WGS, se describe algo similar a lo informado por Graven y Long [44], entre los 1,073 y 1,373 K. Los resultados son coherentes con respecto a lo presentado por Ruiz et al. [17]. El calor de reacción es positivo, lo que plantea una predominancia de una reacción exotérmica por sobre el proceso endotérmico, lo que puede ser atribuido al reformado de metano y WGS dadas sus velocidades de reacción. Realizando una comparación de los órdenes de magnitud entre una

reacción y otra, se observa una predominancia de la reacción WGS por sobre el reformado de metano, en cuanto SMR se lleva a cabo principalmente de forma directa, mientras que WGS se desarrolla cuantitativamente de forma muy similar en ambas direcciones, indicando que se está trabajando cerca del punto de equilibrio para las respectivas condiciones de presión y temperatura, cuestiones que se aprecian claramente en la Figura 4. La Figura 5 muestra una vista ampliada de la constante cinética inversa de la reacción SMR.

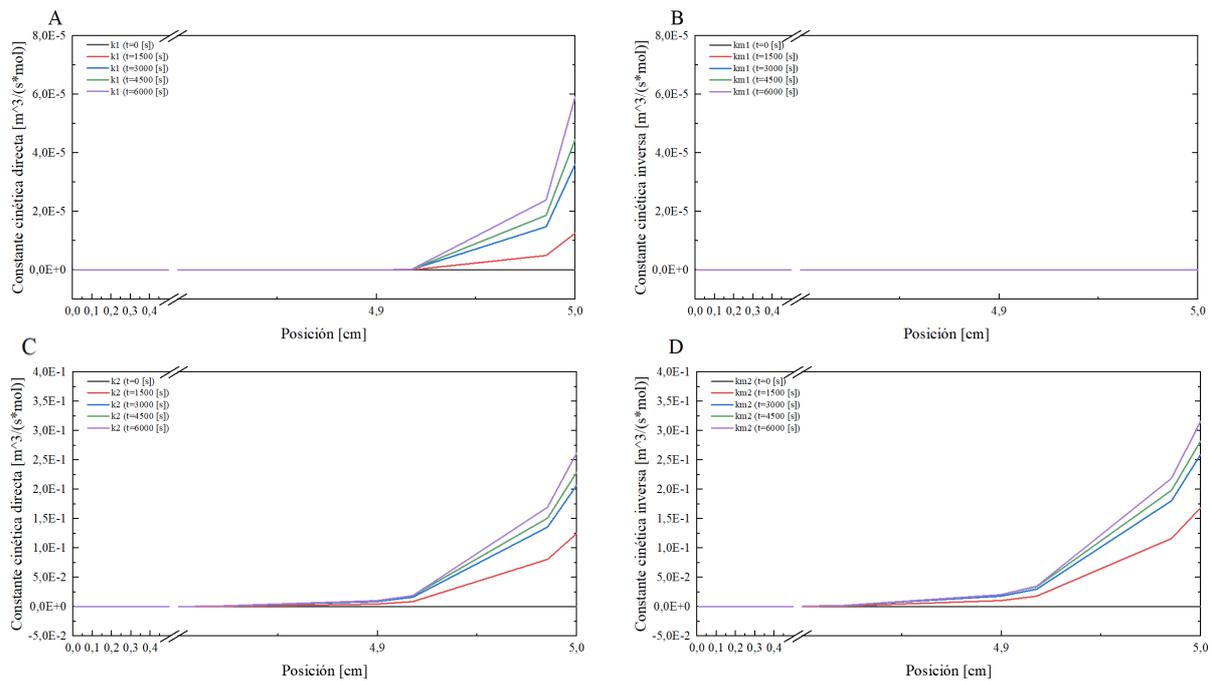


Figura 4: (A) Constante cinética directa de reacción SMR. (B) Constante cinética inversa de reacción SMR. (C) Constante cinética directa de reacción WGS. (D) Constante cinética inversa de reacción WGS.

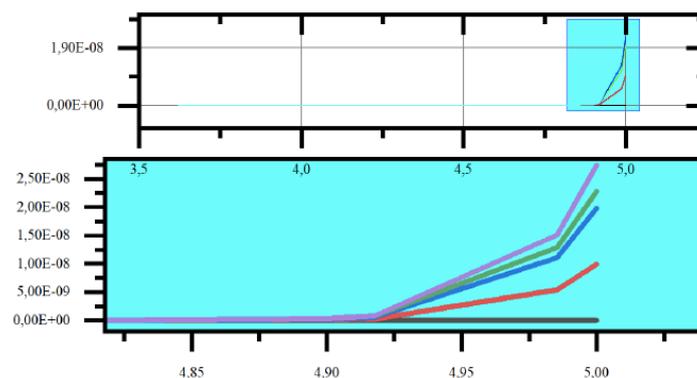


Figura 5: Vista ampliada de constante cinética inversa de reacción SMR.

3.2 Fracción másica de especies

Las fracciones másicas a lo largo del reactor (Ver Figura 6), muestran el consumo de CO y la producción de H₂ y CO₂, reafirmando la predominancia

de la reacción WGS. El perfil plano observado para CH₄, podría responder al orden de magnitud de la velocidad de reacción entre los mecanismos predominantes, considerando un consumo despreciable de metano.

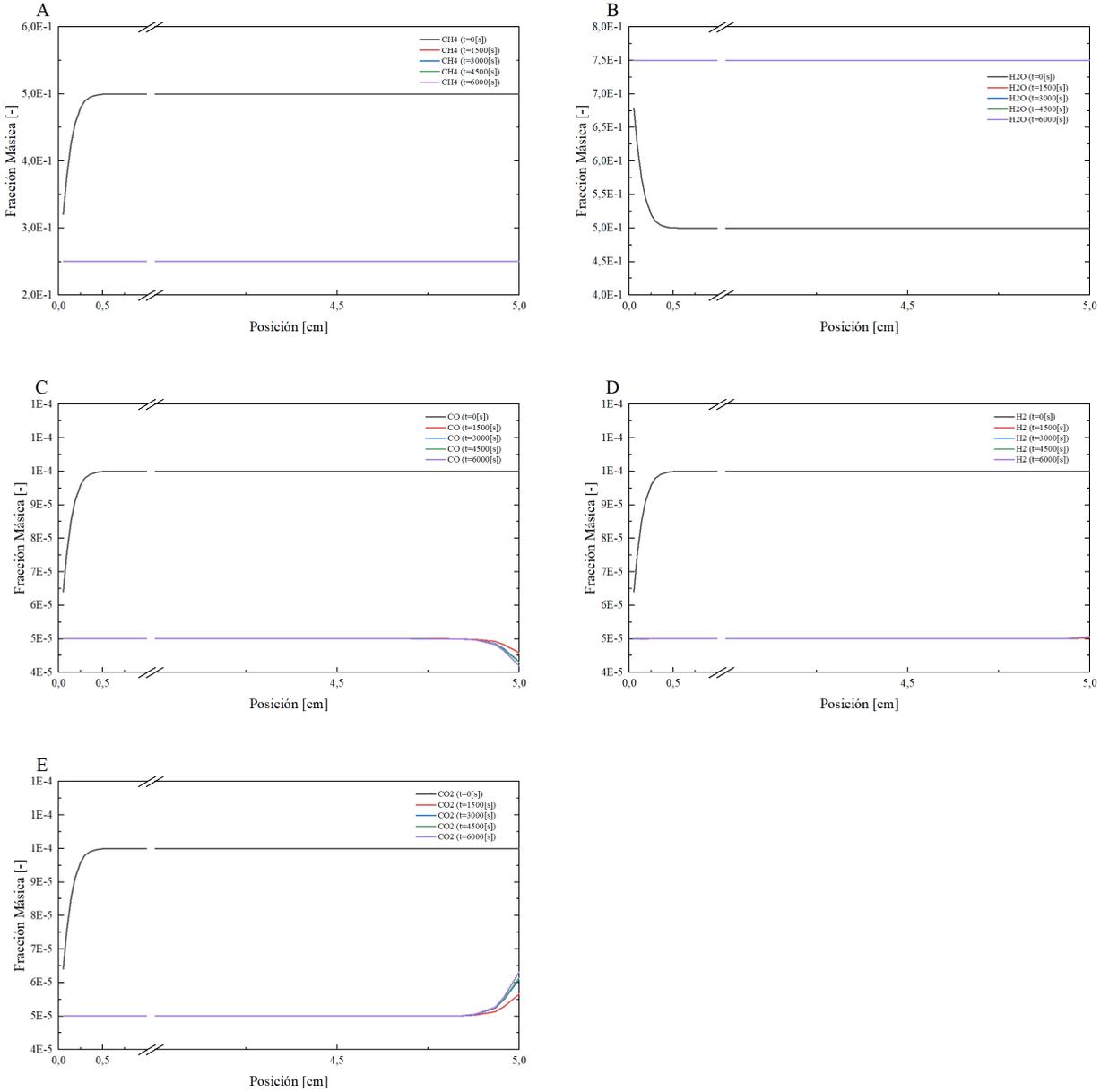


Figura 6: Fracción másica de (A) Metano; (B) Vapor de agua; (C) Monóxido de carbono; (D) Hidrógeno; (E) Dióxido de carbono.

3.3 Eficiencia del proceso

El aporte solar se expresa según:

$$\dot{Q}_{solar} = q_0 \cdot A \cdot t \quad (15)$$

Donde q_0 es el ingreso de potencia en kW/m², A el área transversal del reactor en m², t el tiempo de operación, para este caso de 6000 s. La Tabla 1 muestra el rendimiento de H₂, la eficiencia solar-combustible, y la eficiencia energética para distintas potencias empleadas en la simulación, los que se calculan dadas las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$\eta_{H_2} = \frac{2 \cdot \dot{n}_{H_2}}{4 \cdot \dot{n}_{CH_4}} \quad (16)$$

Donde \dot{n}_i es el flujo molar en mol/s de la especie i .

$$\eta_{solar-fuel} = \frac{(x_{H_2} \cdot LHV_{H_2} + x_{CO} \cdot LHV_{CO}) \cdot t}{\dot{Q}_{solar,j} + x_{CH_4} \cdot LHV_{CH_4} \cdot t} \quad (17)$$

Donde \dot{x}_i es el flujo másico de cada especie i en kg/s, LHV_i el poder calorífico inferior de la especie i , t el tiempo de ejecución de la simulación (6000 s), y $\dot{Q}_{solar,j}$ el flujo de calor (KWh) para el respectivo ingreso de potencia.

$$\eta_{energy} = \frac{x_{H_2} \cdot LHV_{H_2} + x_{CO} \cdot LHV_{CO}}{x_{CH_4} \cdot LHV_{CH_4}} \quad (18)$$

La ecuación (18) representa una simplificación de la eficiencia solar-combustible, al no considerar el aporte

solar y solo el intercambio energético entre las diferentes especies.

Tabla 1: Rendimiento de hidrógeno, eficiencia solar-combustible y eficiencia energética para diferentes potencias.

Potencia kW/m ²	300	400	500	600
η_{H_2}	13.5%	37.8%	62.6%	86.5%
$\eta_{solar-fuel}$	9.2%	24.2%	37.8%	49.5%
η_{energy}	11.3%	31.6%	52.3%	72.3%

Los valores asociados al rendimiento de hidrógeno y eficiencia energética resultan interesante notar que aumentan al incrementar la potencia de entrada al equipo, observándose una relación directamente proporcional. Es interesante notar, que al duplicar la potencia entre 300 y 600 kW/m², el rendimiento de H₂ y eficiencia energética aumentan seis veces en magnitud, y cinco veces en el caso de la eficiencia solar-combustible. Los valores obtenidos deben ser contrastados con el desarrollo experimental de laboratorio, pudiendo existir diferencias entendiéndose las limitaciones del modelo, donde las constantes cinéticas utilizadas para lechos compactos con esferas de alúmina no pueden ser consideradas universales y aplicables a cualquier tipo de medio poroso.

4. Conclusiones

En el presente trabajo, se desarrolló un modelo de simulación computacional para generar hidrógeno en un reactor de medios porosos híbrido, donde la gasificación por oxidación parcial ocurrió con el aporte solar obtenido desde una placa emisora, siendo este contracorriente al suministro de premezcla metano-vapor. Fue posible obtener resultados favorables para condiciones de operación específicas, en el desarrollo de un nuevo modelo configurado en el software COMSOL Multiphysics, generando una herramienta de representación cuantitativa y cualitativa del experimento. El modelo permitió visualizar los resultados esperados de manera experimental, donde la radiación destaca como el mecanismo de transferencia de calor predominante dentro del equipo. A pesar de las restricciones computacionales propias de la modelación de fenómenos de conversión termoquímica, el método de elementos finitos (MEF) presentó una aproximación interesante a los resultados experimentales desde una perspectiva térmica. Esto ratifica la importancia de la combustión híbrida filtrada como una tecnología promisoría en la producción de H₂ y gas de síntesis, dadas sus características térmicas, desde la intensificación de mecanismos de transferencia de calor, y las múltiples reacciones químicas que ocurren dentro del reactor. En trabajos futuros, se espera avanzar hacia la migración renovable en este tipo de equipos, empleando biomasa como sólido combustible, y también considerar una unidad

de captura y almacenamiento de dióxido de carbono para producir hidrógeno verde. Finalmente, se necesitan diversos estudios para determinar los beneficios económicos de la tecnología en un mercado global que se mueve hacia recursos renovables y reducir el uso de combustibles fósiles para mitigar el fenómeno de cambio climático.

Agradecimientos

Los autores quisieran agradecer el apoyo de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) a través del programa de becas / DOCTORADO BECAS CHILE/2021 – 21211230 y a la Dirección de Postgrado y Programas de la Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.

Referencias

- [1] M. Höök, X. Tang, Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change-A review, *Energy Policy*. 52 (2013) 797–809. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.046>.
- [2] M. Younas, M. Rezakazemi, M. Daud, M.B. Wazir, S. Ahmad, N. Ullah, Inamuddin, S. Ramakrishna, Recent progress and remaining challenges in post-combustion CO₂ capture using metal-organic frameworks (MOFs), *Prog. Energy Combust. Sci.* 80 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2020.100849>.
- [3] M. Jakob, J. Hilaire, Unburnable fossil-fuel reserves, *Nature*. 517 (2015) 150–152. <https://doi.org/10.1038/517150a>.
- [4] K.L.C.S.V. Subramani, *Hydrogen and Syngas Production and Purification Technologies*, John Wiley and Sons, 2010. [https://doi.org/10.1016/s1351-4180\(10\)70287-7](https://doi.org/10.1016/s1351-4180(10)70287-7).
- [5] J. Andrews, B. Shabani, The role of hydrogen in a global sustainable energy strategy, *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.* 3 (2014) 474–489. <https://doi.org/10.1002/wene.103>.
- [6] K. Espegren, S. Damman, P. Piscicella, I. Graabak, A. Tomasgard, The role of hydrogen in the transition from a petroleum economy to a low-carbon society, *Int. J. Hydrogen Energy*. 46 (2021) 23125–23138. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.143>.
- [7] V.S. Babkin, Filtrational combustion of gases. Present state of affairs and prospects, *Pure Appl. Chem.* 65 (1993) 335–344. <https://doi.org/10.1351/pac199365020335>.
- [8] M.A. Mujeebu, M.Z. Abdullah, M.Z.A. Bakar, A.A. Mohamad, M.K. Abdullah, A review of investigations on liquid fuel combustion in porous inert media, *Prog. Energy Combust. Sci.* 35 (2009) 216–230. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2008.11.001>.

- [9] M.A. Mujeebu, M.Z. Abdullah, A.A. Mohamad, M.Z.A. Bakar, Trends in modeling of porous media combustion., *Prog. Energy Combust. Sci.* 36(6) (2010) 627–650.
- [10] G.B. Manelis, S. V Glazov, E.A. Salgansky, D.B. Lempert, Autowave processes in the filtration combustion in counterflow systems, *Russ. Chem. Rev.* 81 (2012) 855–873. <https://doi.org/10.1070/rc2012v081n09abeh004279>.
- [11] M. Toledo, E. Vergara, A. V. Saveliev, Syngas production in hybrid filtration combustion, *Int. J. Hydrogen Energy.* 36 (2011) 3907–3912. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.11.060>.
- [12] M. Toledo, C. Rosales, Hybrid Filtration Combustion, *Hydrog. Energy - Challenges Perspect.* (2012). <https://doi.org/10.5772/50353>.
- [13] M. Toledo, C. Rosales, C. Silvestre, S. Caro, Numerical simulation of the hybrid filtration combustion of biomass, *Int. J. Hydrogen Energy.* 41 (2016) 21131–21139. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.120>.
- [14] J.L. Ellzey, E.L. Belmont, C.H. Smith, Heat recirculating reactors: Fundamental research and applications, *Prog. Energy Combust. Sci.* 72 (2019) 32–58. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2018.12.001>.
- [15] R.S. Volkov, P.A. Strizhak, Planar laser-induced fluorescence diagnostics of water droplets heating and evaporation at high-temperature, *Appl. Therm. Eng.* 127 (2017) 141–156. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.040>.
- [16] Z. Yang, Y. Wu, Z. Zhang, H. Li, X. Li, R.I. Egorov, P.A. Strizhak, X. Gao, Recent advances in co-thermochemical conversions of biomass with fossil fuels focusing on the synergistic effects, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 103 (2019) 384–398. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.047>.
- [17] G. Ruiz, N. Ripoll, N. Fedorova, A. Zbogar-Rasic, V. Jovicic, A. Delgado, M. Toledo, Experimental and numerical analysis of the heat transfer in a packed bed exposed to the high thermal radiation flux, *Int. J. Heat Mass Transf.* 136 (2019) 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.009>.
- [18] M. Romero, A. Steinfeld, Concentrating solar thermal power and thermochemical fuels, *Energy Environ. Sci.* 5 (2012) 9234–9245. <https://doi.org/10.1039/c2ee21275g>.
- [19] E.L. Miller, Solar Hydrogen Production by Photoelectrochemical Water Splitting: The Promise and Challenge, 2009.
- [20] G.J. Nathan, M. Jafarian, B.B. Dally, W.L. Saw, P.J. Ashman, E. Hu, A. Steinfeld, Solar thermal hybrids for combustion power plant: A growing opportunity, *Prog. Energy Combust. Sci.* 64 (2018) 4–28. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2017.08.002>.
- [21] P.R. Medwell, G.J. Nathan, Q.N. Chan, Z.T. Alwahabi, B.B. Dally, The influence on the soot distribution within a laminar flame of radiation at fluxes of relevance to concentrated solar radiation, *Combust. Flame.* 158 (2011) 1814–1821. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.01.006>.
- [22] S.E. Hosseini, H. Barzegaravval, B. Chehroudi, M.A. Wahid, Hybrid solar flameless combustion system: Modeling and thermodynamic analysis, *Energy Convers. Manag.* 166 (2018) 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.012>.
- [23] P.G. Loutzenhiser, A.P. Muroyama, A review of the state-of-the-art in solar-driven gasification processes with carbonaceous materials, *Sol. Energy.* 156 (2017) 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.008>.
- [24] H.I. Villafán-Vidales, C.A. Arancibia-Bulnes, D. Riveros-Rosas, H. Romero-Paredes, C.A. Estrada, An overview of the solar thermochemical processes for hydrogen and syngas production: Reactors, and facilities, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 75 (2017) 894–908. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.070>.
- [25] M. Puig-Arnavat, E.A. Tora, J.C. Bruno, A. Coronas, State of the art on reactor designs for solar gasification of carbonaceous feedstock, *Sol. Energy.* 97 (2013) 67–84. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.001>.
- [26] C. Wieckert, A. Obrist, P. Von Zedtwitz, G. Maag, A. Steinfeld, Syngas production by thermochemical gasification of carbonaceous waste materials in a 150 kWth Packed-Bed Solar Reactor, *Energy and Fuels.* 27 (2013) 4770–4776. <https://doi.org/10.1021/ef4008399>.
- [27] D. Trommer, A. Steinfeld, Kinetic modeling for the combined pyrolysis and steam gasification of petroleum coke and experimental determination of the rate constants by dynamic thermogravimetry in the 500–1520 K range, *Energy and Fuels.* 20 (2006) 1250–1258. <https://doi.org/10.1021/ef050290a>.
- [28] S.D. Kenarsari, Y. Zheng, CO₂ gasification of coal under concentrated thermal radiation: A numerical study, *Fuel Process. Technol.* 118

- (2014) 218–227. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.09.005>.
- [29] N. Piatkowski, A. Steinfeld, Solar-driven coal gasification in a thermally irradiated packed-bed reactor, *Energy and Fuels*. 22 (2008) 2043–2052. <https://doi.org/10.1021/ef800027c>.
- [30] S. Wood, A.T. Harris, Porous burners for lean-burn applications, *Prog. Energy Combust. Sci.* 34 (2008) 667–684. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.04.003>.
- [31] M.A. Mujeebu, M.Z. Abdullah, M.Z.A. Bakar, A.A. Mohamad, M.K. Abdullah, Applications of porous media combustion technology - A review, *Appl. Energy*. 86 (2009) 1365–1375. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.017>.
- [32] M.M. Kamal, A.A. Mohamad, Combustion in porous media, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy*. 220 (2006) 487–508. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE169>.
- [33] S. Yagi, D. Kunii, Studies on effective thermal conductivities in packed beds, *AIChE J.* 3 (1957) 373–381. <https://doi.org/10.1002/aic.690030317>.
- [34] A. Jagota, C.Y. Hui, E. Conductivity, *TIME (microsecond)* xio 1 50 100 150, 2 (2017) 1989–1991.
- [35] A.G. Dixon, Heat Transfer in Fixed Beds at Very Low (<4) Tube-to-Particle Diameter Ratio, *Ind. Eng. Chem. Res.* 36 (1997) 3053–3064. <https://doi.org/10.1021/ie9605950>.
- [36] S. Becker, E. Laurien, Three-dimensional numerical simulation of flow and heat transport in high-temperature nuclear reactors, *Nucl. Eng. Des.* 222 (2003) 189–201. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(03\)00011-6](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(03)00011-6).
- [37] G.J. Cheng, A.B. Yu, P. Zulli, Evaluation of effective thermal conductivity from the structure of a packed bed, *Chem. Eng. Sci.* 54 (1999) 4199–4209. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00125-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00125-6).
- [38] V. Bubnovich, M. Toledo, Analytical modelling of filtration combustion in inert porous media, *Appl. Therm. Eng.* 27 (2007) 1144–1149. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.037>.
- [39] W.M. Mathis, J.L. Ellzey, Flame stabilization, operating range, and emissions for a methane/air porous burner, *Combust. Sci. Technol.* 175 (2003) 825–839. <https://doi.org/10.1080/00102200302411>.
- [40] International Energy Agency, *The Future of Hydrogen*, 2019.
- [41] N. Jodeiri, J.P. Mmbaga, L. Wu, S.E. Wanke, R.E. Hayes, Modelling a counter-diffusive reactor for methane combustion, *Comput. Chem. Eng.* 39 (2012) 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.12.009>.
- [42] M. Kaviany, *Principles of heat transfer in porous media*, Springer-Verlag New York Inc, New York, USA, 1991.
- [43] K. V. Dobrego, N.N. Gnezdilov, S.H. Lee, H.K. Choi, Methane partial oxidation reverse flow reactor scale up and optimization, *Int. J. Hydrogen Energy*. 33 (2008) 5501–5509. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.06.071>.
- [44] W.M. Graven, F.J. Long, Kinetics and Mechanisms of the two Opposing Reactions of the Equilibrium $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$, *J. Am. Chem. Soc.* 76 (1954) 2602–2607. <https://doi.org/10.1021/ja01639a002>.