

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

Revisión del Estado Tecnológico de Electrolizadores para la Producción de Hidrógeno.

Carlos Andrés Gómez Sepúlveda

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director Darío Yesid Peña B.

Profesor titular

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenieras Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica

Bucaramanga

2024

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a todos mis maestros de la universidad por el apoyo y ánimo que me dieron para la realización de este trabajo. También dedico este trabajo a mis padres por el apoyo incondicional que me brindaron, al ángel Samael y al dios Anubis, a quienes siempre oro para pedir guía y protección en todo lo que deseo hacer y alcanzar. Finalmente, lo dedico a mis abuelos, ya fallecidos, quienes me apoyaron desde que ingresé a la universidad.

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, por el apoyo incondicional durante la pandemia y desde que ingresé a la universidad, con los diferentes programas de apoyo a estudiantes.

A los profesores, por el apoyo que me brindaron y por siempre estar atentos a explicarme

. A mis padres, por el apoyo incondicional que me prestaron.

A mis amigos, especialmente a Jorge, por siempre darme ánimo para estudiar.

Al profesor Darío, por brindarme el apoyo y facilitar la creación de este documento.

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

Contenido

1. Introducción	9-10
1.1 Objetivos	11
1.2 Objetivo general.....	11
2. Objetivo específico	11
3. Historia de la reforma.....	12-13
4. Tipos de reformado.....	13-15
4.1 Reformado Autotérmico.....	15-17
4.1.1 <i>Reformado de metano con vapor</i>	17-18
4.1.1.1 Reformado con vapor mejorado por adsorción	18-20
4.1.1.2 Reformador autotérmico calentado por gas... ..	20-21
5. Nuevas tecnologías de reformado	21
5.1 Producción de hidrogeno fotocatalítico	21-22
5.1.1 <i>Principios termoquímicos de la producción de hidrógeno atreves reformado fotocatalítico de biomasa</i>	22-28
5.1.1.1 Reformado catalítico de polipropileno para producir hidrógeno: influencia de las características del soporte y el tipo de metal activo en el catalizador.....	28-33

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

5.1.1.1.1 Producción de hidrógeno en tierra a partir de gas de ebullición (bog) mediante un proceso de reformado con vapor de gas natural simulación de procesos y análisis técnico económico	33-36
5.1.1.1.2 Reformado de metano con vapor... ..	36
5.1.1.1.3 Reformado autotérmico de metano	36-37
5.1.1.1.4 Descomposición del gas natural	37-38
6. Conclusiones.....	39
7. Referencias bibliográficas.....	40-41

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

Lista de Figuras

Figura 1 Reformado Autotérmico	16
Figura 2 Reformado de Metano con Vapor.....	18
Figura 3 Reformado con Vapor Mejorado por Adsorción	19
Figura 4 Reformador Autotérmico Calentado por Gas	21

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

Resumen

Título: Estado del arte de reformadores de hidrógeno utilizando biomasa y combustibles fósiles.

Autor: Carlos Andrés Gómez Sepúlveda

Palabras Clave: Reformadores, hidrogeno, materia.

Descripción:

El estado del arte de la producción de hidrógeno a través de reformadores es una recopilación bibliográfica sobre la producción de hidrógeno a partir de diferentes materias primas. En este caso, se tendrá en cuenta la biomasa y otras materias primas que, al ser convertidas mediante métodos térmicos u otros tipos de métodos, producirán hidrógeno. En algunos casos, se utilizarán combustibles fósiles para convertirlos en energía limpia, como lo es el hidrógeno. En otros casos, se emplearán diversos residuos para convertirlos en hidrógeno.

Los métodos de conversión están relacionados con la cantidad de energía que se debe utilizar para obtener el hidrógeno de estas materias primas

También se tendrá en cuenta la volatilidad y otras características para elegir el proceso adecuado para la producción de hidrógeno.

Estos procesos de conversión se denominarán reformado, ya que la producción de hidrógeno resultará de la descomposición de otro gas o materia prima.

Proyecto de Grado

Facultad de Ingeniería Físico-Química. Director de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica: Darío Yesid Peña Ballesteros.

Doctorado en Corrosión por el Instituto de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Manchester - UMIST, 1998.

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

Summary

Title: State of the art of hydrogen reformers using biomass and fossil fuels

Author: Carlos Andrés Gómez Sepulveda

Keywords: Reformers, hydrogen, matter

Description:

The state of the art of hydrogen production through reformers is a bibliographic compilation of hydrogen production using different raw materials. In this case, biomass or other raw materials will be considered, which, when converted by various methods—whether thermal or other types—will produce hydrogen. In some cases, fossil fuels will be used to convert these fuels into clean energy, such as hydrogen. In other cases, different types of waste will be utilized to convert into hydrogen. The conversion methods are related to the amount of energy required to extract hydrogen from these raw materials. Volatility and other characteristics will also be considered to choose the appropriate process for hydrogen production. These processes are called reforming processes because the production of hydrogen will result from the decomposition of another gas or raw material.

Degree Project

Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering Director: Dario Yesid Peña Ballesteros.

PhD in Corrosion University of Manchester Institute Science and Technology - UMIST, 1998.

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

1.

Introducción

En la investigación sobre la producción de hidrógeno mediante reformadores, se encontró que a partir de materias como la biomasa, que está constituida por residuos del medio ambiente tales como basura, aguas residuales, y residuos fósiles tales como metano o gasolina, se puede hacer una conversión mediante reformadores o mediante otros métodos, como la pirólisis, para extraer el hidrógeno de estas materias primas (Rodríguez Guerra & Baca-Cajas, 2022). La meta es que hacia el año 2050 se logre cero emisiones de carbono a la atmósfera. En la investigación se identifican dos tipos de hidrógeno (Transforma, 2050): uno es el hidrógeno verde, obtenido del agua o de materias primas no contaminantes, y otro es el hidrógeno azul, que se obtiene de materias primas contaminantes como el metano y la gasolina. Se encontraron métodos para la conversión a hidrógeno azul con el fin de hacer una transición energética de energías contaminantes, como el petróleo y el carbón, a energías más limpias utilizando biomasa a partir del trigo, hongos (Florente, 2024), etc. Esta clase de biomasa podría disminuir las emisiones de carbono, lo que incidirá en el cambio climático y en diferentes fenómenos que se están presentando en el planeta Tierra, como el calentamiento global (Díaz , 2012). Uno de los países que más contamina en el planeta es Estados Unidos, con un cuarto del consumo de energía en el mundo. La regla general dice que, a mayor consumo de energía no renovable, como el gas y el petróleo, más contaminación habrá en el planeta debido a los procesos de combustión.

Ahora, profundizando más sobre la biomasa, se hablará de dos tipos de residuos municipales que se pueden utilizar en la generación de hidrógeno, ya que de estos residuos se puede extraer el metano y, como combustible no renovable, se puede convertir en hidrógeno azul (Sifontes ,2019.). Estos dos residuos son las aguas residuales y la basura sólida que desechamos, ya sea de las

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

fábricas o del hogar, y fósiles mediante la extracción del hidrógeno de sus cadenas moleculares.

Cabe destacar que los residuos sólidos han ido aumentando en las últimas décadas a gran escala, por lo que se debe aprovechar este aumento como materia prima para producir una energía más limpia para el medio ambiente y para nuestra salud. Otra fuente de biomasa es la agricultura. El lector podría preguntarse: ¿cómo es posible que la agricultura produzca biomasa para la producción de hidrógeno? La respuesta está en el estiércol de ganado y de corrales de animales, que cada vez aumenta su producción debido al crecimiento demográfico de la población humana. El estiércol produce gases de los que se puede extraer hidrógeno mediante el reformado de este combustible. La gasificación es uno de los métodos más utilizados en la producción de hidrógeno a través de compuestos sólidos como el carbón, que se transforma en gases y luego, por reformado, se extrae ese hidrógeno (Duttle,1990).

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

2. **Objetivos**

2.1 **Objetivo General**

Analizar los diferentes estados tecnológicos sobre los procesos de reformado usados para la producción de hidrógeno limpio.

2.1.1 *Objetivos Específicos*

Realizar una revisión bibliográfica sobre los diferentes tipos de procesos de reformado haciendo énfasis en gas natural y biomasa en términos de conversión de energía eléctrica en hidrógeno.

Identificar las tendencias y desafíos en el desarrollo de los reformadores como alternativa de energía limpia.

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

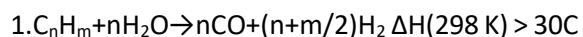
3. Historia de la reformado

Es tan antigua como la llama misma; el combustible líquido o sólido se quema solo en fase gaseosa. La reforma es entonces un cortocircuito de la combustión y se clasifica en algunos campos como gasificación, aunque la reforma siempre se da en la combustión.

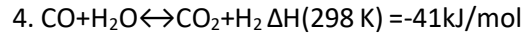
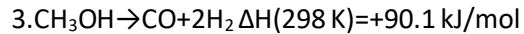
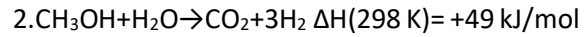
La reforma conocida en la literatura surge a finales del siglo XVIII como una solución a un problema que tenía Inglaterra. Hacia este siglo, los combustibles de carbón y biomasa no eran fácilmente aplicables a los sistemas de iluminación distribuida debido a su transportabilidad sólida. Con el precio del aceite de ballena por las nubes y el agotamiento de recursos, se estaba desarrollando una crisis en el sistema de iluminación en Londres. A William Murdoch se le conoce por haber cambiado de combustibles sólidos a gaseosos mediante POX o gasificación de un combustible sólido. El primer uso comercial de la reforma deriva del gas ciudad o gas síntesis del carbón a principios de 1800. Se utilizaba para iluminar y cocinar antes de que el gas natural y la electricidad fueran más accesibles en el siglo XX.

La reforma es un método por el cual se extrae hidrógeno de los combustibles y biomasa por medio de vapor, reformado con oxígeno, reformado autotérmico, entre otros.

El proceso tiene como finalidad, como ya mencioné, extraer hidrógeno, ya sea verde o azul. La siguiente ecuación es una forma de extraer hidrógeno de un combustible mediante calor y reformado de vapor.



ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO



La relación de hidrógeno y productos se da por medio de la siguiente ecuación

$$5. \% \text{H}_2 \text{ selectivity} = \text{mole H}_2 / \text{mole of H}_2 + \text{mole of CO}_2 = 3 \text{ mol} / 3 \text{ mol} + 1 \text{ mol} = 75\%$$

Luego se observa que el etanol a esa temperatura produce el 75% de hidrogeno con respecto a los productos producidos.

4. Tipos de Reformado

La oxidación parcial (POX), también conocida como gasificación, es el proceso en el que el combustible de alimentación—metano, aceite residual u otro combustible—reacciona exotérmicamente con una pequeña cantidad de oxígeno. Como la reacción es incompleta, se producen dos productos: hidrógeno y monóxido de carbono.

Hay dos tipos de oxidación parcial: 1. Oxidación parcial térmica (TPOX): requiere al menos 1200°C (2192°F) para una reacción.

2. Oxidación parcial catalítica (CPOX): solo necesita 800-900°C (1472-1652°F) porque un catalizador potencia la reacción química.

El tipo de POX utilizado depende en gran medida del contenido de azufre en el combustible. Si su contenido es superior a 50 ppm (0.005%), dañaría el catalizador del CPOX; por lo tanto, el CPOX no se recomienda para materias primas con alto contenido de azufre. Por otra parte, las altas temperaturas necesarias para el tipo TPOX hacen que los instrumentos tengan una vida útil más corta.

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

Reacción de Cambio de gas a agua Una parte del gas sintetizado se desvía para la reacción de cambio. El monóxido de carbono del gas de síntesis enfriado se combina con el agua en presencia de un catalizador a base de cobre para producir dióxido de carbono y más hidrógeno.

Purificación y Separación del Gas Síntesis Antes de ser productivos, el hidrógeno y el dióxido de carbono necesitan una purificación y una separación adicionales. Esto se realiza mediante membranas y tamices moleculares.

Reformado a vapor el reformado con vapor de agua es un proceso aplicable a hidrocarburos gaseosos y líquidos. Consiste en poner en contacto el combustible con vapor de agua a altas temperaturas en presencia de un catalizador. Las temperaturas oscilan entre 840-950°C y presiones moderadas.

La composición del producto depende del combustible que reaccione. La siguiente ecuación expresa la reacción endotérmica:



El rendimiento del proceso se calcula como la relación entre la energía contenida en el hidrógeno resultante de los productos de la reacción y la energía que ha entrado con el combustible.

La eficiencia de la conversión del hidrocarburo aumenta con la cantidad de vapor, aunque esto supone un incremento en el coste del proceso. La proporción del combustible respecto al agua desempeña un papel importante en la formación del hidrógeno.

El agua debe proceder de una fuente externa si el reformador está próximo al combustible. El hidrocarburo y el vapor de agua se ponen en contacto en el interior de unos tubos de catalizador a base de níquel y alúmina. El calor se produce quemando parte del combustible o también se

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

puede utilizar como combustible el producto que sale de la unidad de purificación de hidrógeno.

Los gases de salida del reformador se enfrían en la zona de convección de una caldera de vapor con el fin de recuperar parte del calor y aumentar el rendimiento del sistema. Luego, entran en un proceso de purificación para extraer el hidrógeno con la máxima pureza posible (Doria, 2024).

4.1 Reformado Autotérmico

El reformado autotérmico se da cuando se introducen los reactivos (oxígeno, combustible y agua) en un lecho mixto de catalizador.

Gracias al calor liberado por la reacción del oxígeno, se elimina la necesidad de una fuente externa de calor y se aprovecha el reformado de vapor, dando lugar a un balance de energía nulo.

De ahí que lleve el nombre de autotérmico. La siguiente es una ecuación general del reformado autotérmico:

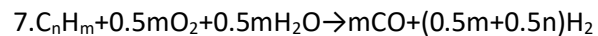
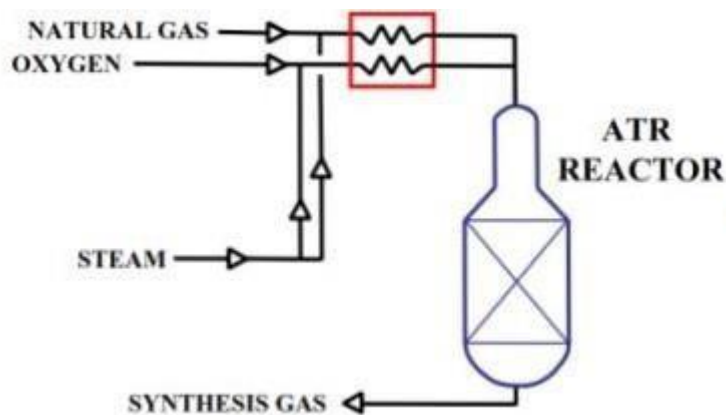


Figura 1:

Reactor de reformado auto-térmico

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO



Nota: Esta figura representa un reactor autotérmico. Tomado de Espinosa Martínez J. (2017), Una Mirada Crítica del Estado del Conocimiento del Proceso de Producción de Hidrógeno en un Horno Reformador a Partir de Gas Natural y Vapor (p.22) .

3. Nuevas Tecnologías de Reformado El Nuevo Reactor Auto-térmico (KBR) cuenta con una zona de combustión en la parte superior y un lecho lleno de catalizador en el fondo. La alimentación se mezcla con una cantidad sub-estequiométrica de oxígeno y se quema en la sección de combustión. Luego, hay una zona cónica de recirculación intermedia, donde los gases calientes continúan reaccionando, aunque están alejados del equilibrio. Los gases resultantes se hacen pasar sobre el catalizador en la sección inferior para alcanzar el máximo.

acercamiento posible al equilibrio de la mezcla. Estos reactores también son adecuados para generar grandes volúmenes de gas de síntesis, especialmente con relaciones de H_2/CO en el rango de 1.5/1 a 3/1. Estas relaciones son deseables para la síntesis de hidrocarburos de alto peso

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

molecular. Sin embargo, los reformadores auto-térmicos cuentan con experiencias comerciales limitadas.

4.1.1 Reformado de metano con vapor

El combustible se reforma previamente a 450 °C con un catalizador base de níquel. La unidad de pre-reformado ayuda a descomponer los hidrocarburos C2-C4 presentes en el gas natural y aporta al mejoramiento del rendimiento de hidrógeno. El flujo de producto del prereformador se envía al reformador primario para producir gas de síntesis. Debido a la reacción endotérmica del reformado con vapor, el reformador primario funciona a 870 °C y una relación vapor-carbono de 3, en presencia de un catalizador a base de níquel. El gas de síntesis generado por el reformador se desplaza a temperatura media para producir más hidrógeno, que luego se envía a la sección de purificación. El uso de un convertidor de temperatura media elimina la necesidad de dos convertidores de cambio separados y funciona a una temperatura baja de 314 °C, en presencia de catalizador CuO/ZnO/Al₂O₃. Luego, el gas de proceso del convertidor de cambio se dirige hacia una unidad de adsorción por oscilación de presión (PSA) de cuatro lechos, donde se recupera el 90 % de hidrógeno con una pureza del 99,99 % y el gas residual del PSA se dirige al horno (con gas natural de reposición) para producir calor para la planta. Mientras el calor generado del horno se suministra al reformador, el hidrógeno producido se comprime a una presión media de 200 bar para permitir el transporte a través de tuberías o remolques tubulares. Este proceso SMR se utiliza como caso base y no tiene una unidad de captura de CO₂ integrada, mientras que los casos SMR-CCS tienen una unidad CCS integrada a la salida del horno reformador. La unidad CCS se describe más adelante en la sección.

Figura 2:

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

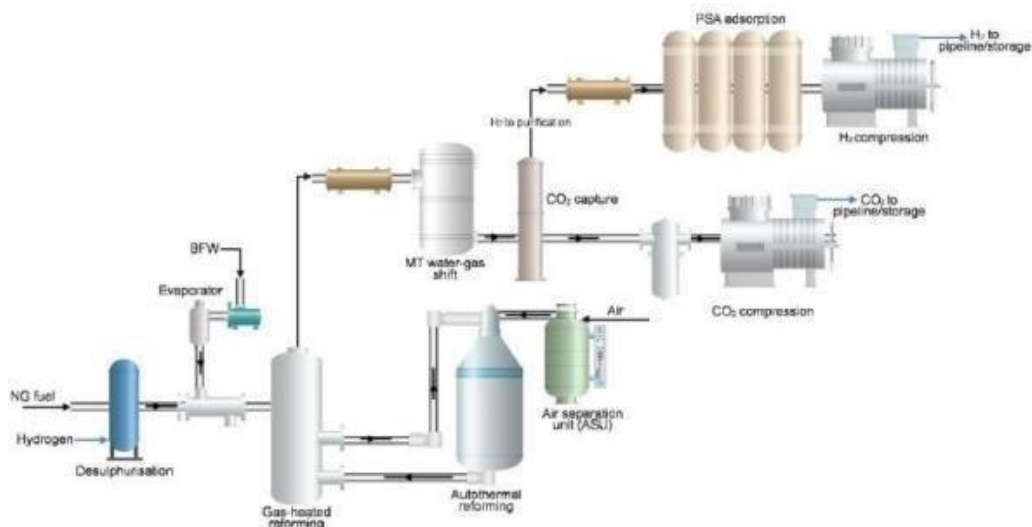
4.1.1.2 Reformador autotérmico calentado por gas. Es parecido a reformador para la producción de hidrogeno con menos presencia de carbono de Johnson Matthey comprende un reformador autotérmico y calentado por gas, unidad de purificación, compresión captura de carbono aislado y una unidad de compresiones CO₂. El gas natural primero entra al reformador calentado por gas arbitrariamente (GHR) con una relación S/C de 1.5 y sobre catalizadores base níquel, el uso de este primer reformador elimina la fuente extra de calor. La corriente de salida del primer reformador se dirige a la unidad ATR en esta unidad la corriente se oxida con oxígeno puro. El gas de síntesis del reformador se enfría y se envía aun convertidor de cambio de temperatura media donde se produce la reacción gas -agua en presencia de una catalizador de cobre para producir un gas reformador que contiene principalmente CO₂ y H₂. El CO₂ del gas del reformador se elimina en la unidad de captura de carbono, mientras que la corriente rica en H₂ del absorbente se envía al PSA, donde se recupera el 90 % de hidrógeno con una pureza del 99 %. (Udemu & Font-Palma, 2024).

En la siguiente figura se puede observar la forma como es este reformador:

Figura 4:

Reformador autotérmico calentado por gas

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO



Nota. Esta figura representa reformador autotérmico calentado por gas Tomado de Ahorro potencial de costes de la producción de hidrógeno azul a gran escala mediante un proceso de reformado con vapor mejorado por adsorción(2024). Potenciales ahorros de costos de la producción de hidrógeno azul a gran escala mediante el proceso de reformado con vapor mejorado por sorción (p.4)

5. Nuevas tecnologías

5.1 Producción de hidrogeno fotocatalítico

La ruptura fotocatalítica del agua para la producción de hidrógeno es un método eficaz para obtener gas hidrógeno, desde una perspectiva cinética, la ruptura del enlace HOH en las moléculas de agua es relativamente estable y requiere una energía de activación de 500 kJ/mol. Esto es una longitud de onda de activación máxima de 250 nm, ubicada en la región ultravioleta (UV). Sin embargo, la radiación ultravioleta representa sólo el 6% de la radiación solar lo que limita la aplicación de la división del agua bajo la iluminación solar.

Además, la producción de oxígeno (O₂) reduce significativamente la eficiencia foto catalítica. El oxígeno gaseoso en los productos del reformador foto catalítico provoca la oxidación del fotocatalizador, lo que dificulta el proceso de producción de hidrógeno foto catalítico. La reformada foto catalítico de biomasa es un método más favorable para la producción de

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

hidrógeno foto catalítico. La biomasa no solo puede servir como donante de electrones (e^-) o eliminador de huecos (h^+) para facilitar la separación y el consumo de fotoportadores, sino que también puede generar simultáneamente más sustancias químicas de valor agregado.

5.1.1 Principios termoquímicos de la producción de hidrógeno a través de reformado fotocatalítico de biomasa

Las reacciones fotocatalíticas se pueden dividir en procesos homogéneos y heterogéneos. En la fotocatalisis homogénea, los catalizadores y los reactivos se dividen uniformemente en la misma fase. Los catalizadores típicos incluyen complejos metálicos, hierro, cobre y complejos de metales de transición. Bajo iluminación, los compuestos orgánicos se foto reducen a un estado de oxidación más bajo y se reoxidan con oxígeno molecular. Además, la creación de materias reactivas de oxígeno y radicales libres afecta el envejecimiento de compuestos orgánicos. Sin embargo, es difícil separar los catalizadores después de reacciones fotocatalíticas homogéneas y también están restringidas por la temperatura. En la catálisis heterogénea, los catalizadores y reactivos existen en diferentes fases. Los fotocatalizadores heterogéneos más comunes son los óxidos de metales de transición y los semiconductores. La fotocatalisis heterogénea implica tres pasos principales: (1) absorción de luz, (2) separación y migración de electrones y huecos fotogenerados y (3) reacciones redox superficiales del fotocatalizador. Los fotocatalizadores heterogéneos suelen emplear materiales con características semiconductoras. La estructura electrónica incluye una banda de valencia ocupada (VB) y una banda de conducción desocupada (CB). Estos materiales pueden actuar como sensibilizadores para absorber la luz y el cuanto óptico se convertirá en electrones y huecos excitados. Para generar electrones y huecos inducidos por la luz, la energía de la luz incidente ($h\nu$) debe ser mayor que la banda prohibida del semiconductor (E_{bg}). Por lo tanto, la longitud de onda de la luz incidente (λ) Los electrones y huecos generados por la luz pueden activar el oxígeno molecular y los grupos hidroxilo, creando especies reactivas de

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

oxígeno (ROS), envolviendo los radicales superóxido (O_2^-), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), radicales hidroxilo (OH), radicales metoxi, y oxígeno singlete (O_2^1). Dos científicos importantes analizaron los métodos de detección y los mecanismos de generación de ROS en fotocatalisis. Proponen que la absorción de OH se toma en cuenta la captura de agujeros, que es la principal especie oxidante responsable de degradar los compuestos orgánicos. Es importante destacar que se requiere oxígeno para la reacción electrónica que da como resultado radicales superóxido, lo que indica que las condiciones para la producción de radicales superóxidos son una atmósfera de oxígeno. Debido a sus electrones desapareados altamente reactivos y de corta vida útil, estos ROS atacan átomos específicos en biomoléculas, generando intermediarios radicales correspondientes, como radicales alcoxilo (RO), radicales peróxido (RO_2H) y radicales peroxi (RO_2). Además, los radicales intermedios consiguen reaccionar más con moléculas reactivas de oxígeno para producir los productos deseados. Aunque los radicales superóxidos consiguen desarrollar la selectividad química, también pueden tener algunos efectos negativos, incluida la generación de productos no deseados. Aunque los radicales superóxidos consiguen desarrollar la selectividad química, también pueden tener varios efectos negativos, incluida la generación de productos no deseados, por lo tanto, centrándose en las características de los sustratos de biomasa y los productos objetivo, es necesario controlar la producción de radicales superóxidos de acuerdo con las propiedades de las ROS foto inducidas para producir selectivamente el H_2 deseado y reducir la probabilidad de productos de peróxido. Al diseñar reacciones de oxidación radical de varios pasos, se puede lograr el propósito de foto reformar la biomasa. Por consiguiente, el control de la creación de hidrógeno y sustancias químicas valiosas es muy importante en el reformado fotocatalítico.

Modelo de control predictivo de un reformador de metano con vapor calentado eléctricamente

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

El objetivo general del proceso de reformado de metano con vapor por calentamiento eléctricamente es convertir el metano para producir gas hidrógeno libre de emisiones en un reformador de metano con vapor calentado eléctricamente. En lugar de utilizar una fuente de energía convencional basada en combustibles fósiles, se utiliza energía eléctrica para calentar el reactor aplicando una corriente eléctrica directamente a través del tubo del reactor. En la configuración experimental, los gases metano, vapor y argón van hacia el tubo del reactor bajo cierta temperatura y presión para reaccionar y producir gas hidrógeno. La reacción se puede demostrar mediante las dos reacciones independientes, La primera reacción es la reacción de reformado que transforma metano y agua en monóxido de carbono e hidrógeno. La segunda reacción es la reacción de cambio de agua-gas, que transforma el monóxido de carbono y el agua en dióxido de carbono y gas hidrógeno. La reacción es endotérmica debido a la combinación de una reacción de reformado extremadamente endotérmica y una reacción de desplazamiento de agua-gas ligeramente exotérmica. Al determinar la dinámica del reactor es necesario tener en cuenta la cinética de reacción intrínseca y los fenómenos de transporte de masa que ocurren en el reactor.

Teniendo en cuenta la cinética de la reacción, el paso determinante de la velocidad es la activación del metano, ya que tiene una estructura estable que demanda mayor energía para fracturar el enlace CH. Para catalizar la activación del metano o, se utiliza un catalizador a base de Ni sumamente activo. Además, el experimento también se realiza a alta temperatura para superar la barrera energética incrementar las velocidades de reacción.

El calentamiento eléctrico proporciona calor radialmente casi uniforme con un gradiente de temperatura muy pequeño que a prevenir la formación de carbono al mantener la temperatura del gas cerca de la temperatura de equilibrio.

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

Por otra parte, la diferencia de temperatura entre las paredes interior y exterior del reactor es muy pequeño en contraste con los reactores calentados por quemadores, lo que colabora a reducir el estrés térmico y prolonga la vida del reactor. Esto también significa que el gradiente térmico a través del catalizador recubierto de lavado es muy pequeño, lo que aumenta la utilización del catalizador. también sugiere que los reactores SMR calentados eléctricamente pueden alcanzar la misma conversión que los reformadores tubulares calentados por quemadores industriales, pero con un volumen de reactor hasta 100 veces menor. Las reacciones son reacciones complejas, ya que son paralelas en H_2O y en serie en CO . Además, todos los reactivos y productos están en fase gaseosa. Como resultado, modelar la cinética de reacción para este sistema es inherentemente desafiante ya que, debido a la presencia de reacciones complejas, la conversión no se puede utilizar para modelar.

En simulaciones, las concentraciones de hidrógeno, metano, vapor de agua, dióxido de carbono, monóxido de carbono y argón son las salidas que dependen de la corriente que fluye a través del reactor, y la corriente se manipula para calibrar la temperatura del reactor. Antes del experimento, se hace correr H_2 puro a elevada temperatura a través del reactor tubular para activar el catalizador de níquel. Después del flujo de H_2 , se hace Ar para eliminar el exceso de hidrógeno que queda en el sistema antes de que se hagan fluir CH_4 y vapor. El diagrama de flujo del proceso experimental se muestra en la figura 2.

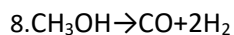
Una instalación experimental de reformado de metano con vapor fue construida en UCLA cuyos detalles se presentan construyeron una configuración similar y se realizaron una serie de experimentos para comprender mejor la concentración y distribución de temperatura dentro del reactor.

Reformado químico con vapor oxidativo de metanol: una nueva vía para la conversión autotérmico

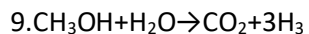
ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

El almacenamiento de hidrógeno es un problema la viabilidad la producción de este la utilización de metanol como portador de hidrógeno líquido sería una vía viable para la generación de hidrogeno. El metanol muestra muchas ventajas como lo son su fácil almacenamiento su alto volumen de densidad energética y una baja temperatura de reformado. La conversión de metanol a hidrógeno se puede clasificar en descomposición de metanol, reformado con vapor de metanol, oxidación parcial de metanol, electro-reformado de metanol, reformado oxidativo con vapor de metanol y también se conoce como auto- reformado térmico de metanol. Las principales reacciones bajo cada método de conversión de metanol se muestran a continuación:

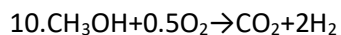
Descomposición del metanol:



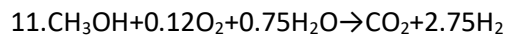
Reformado del metanol con vapor:



Oxidación parcial del metanol:



El proceso OSRM es la combinación de reacciones SRM Y POM:



Al combinar una proporción adecuada de reacción endotérmica y reacción exotérmica, no se requiere calor externo. Los catalizadores adoptados para la conversión de metanol se pueden dividir principalmente en catalizadores a base de cobre y catalizadores a base de paladio/platino. En general, los catalizadores debían mostrar una alta actividad catalítica y resistencia a la

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

sinterización junto con rendimientos deseables de H_2 . Los catalizadores a base de cobre son los más utilizados para la reacción exotérmica y endotérmica; sin embargo, también se ha informado que se desactivan fácilmente. Se propone un nuevo enfoque para la utilización y la intensificación de bucles químicos para hacer el reformado en que se oxida con vapor de metanol, en el que el oxígeno molecular se cambia por oxígeno reticular, logrando el reformado autotérmico del metanol. El proceso de bucle químico da más vías versátiles para convertir combustibles de manera limpia y de calidad a través de la circulación redox de un portador de oxígeno. En este estudio, se utiliza material $Cu_2O/Ca_2Fe_2O_5$ como catalizador bifuncional. Por un lado, $Cu_2O/Ca_2Fe_2O_5$ da oxígeno a la red, participando en la reacción; Por otro lado, el $Cu_2O/Ca_2Fe_2O_5$ (CuO) reducido gradualmente desempeña el papel de catalizar la reacción SRM. El $Cu_2O/Ca_2Fe_2O_5$ actúa como proveedor de oxígeno reticular para reacción exotérmica y como catalizador para la reacción endotérmica, por lo que lo señalamos portador catalítico de oxígeno (COC). Al regular la temperatura de reacción y la velocidad del flujo de aire, el COC se puede oxidar a un estado aproximado de $Cu^+ + O^{2-} + Cu^+$, logrando el bucle $Cu_2O \leftrightarrow Cu$. Es de destacar que la razón por la que se propone el bucle $Cu_2O \leftrightarrow Cu$, en lugar del bucle $CuO \leftrightarrow Cu$, es no oxidar excesivamente el metanol. La reducción de CuO da más calor, lo que daría lugar a puntos calientes, sinterización y aglomeración del catalizador, así como a una alta selectividad al CO. Además, el propósito de utilizar $Ca_2Fe_2O_5$ es balancear la actividad redox y la movilidad del oxígeno de la red, logrando la liberación homogénea del oxígeno de la red.

Reformado seco mejorado de CO_2 y CH_4 en catalizador fototérmico $Ru/SrTiO_3$. El reformado en seco de metano (reacción química: $CH_4 + CO_2 = 2CO + 2H_2$) es un proceso de interés en la investigación, ya que puede colaborar en mitigar los efectos adversos del calentamiento global y transformar fuentes de carbono baratas en combustibles fósiles. En singular, la GRD, que puede abordar tanto el CH_4 como el CO_2 , da un camino prometedor para alcanzar los objetivos de

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

neutralidad de carbono y pico de carbono. Además, DRM puede generar una cantidad adecuada de gas de síntesis y transformarlo en hidrocarburos de elevado valor mediante el proceso de Fischer-Tropsch. Por lo tanto, la invención de esta tecnología DRM es de gran importancia en términos de reciclaje de carbono. El CH_4 y el CO_2 son químicamente estables, e incluso con catalizadores adecuados, generalmente se requieren altas temperaturas de reacción. para obtener rendimientos excelentes. Sin embargo, las temperaturas de reacción en el rango de 500 a 700 °C pueden dar una rápida desactivación del catalizador pues la deposición de carbono en la superficie del catalizador debido a reacciones secundarias, como el craqueo de metano ; Cuando la temperatura de reacción es mayor a 700°C, las elevadas temperaturas pueden incentivar la sinterización de los componentes activos en el catalizador, mientras que puede producirse fragilización por hidrógeno en el reactor. Recientemente, la catálisis fototérmica, que da técnicas fotocatalíticas y termo catalíticas, ha dado una atención cada vez mayor porque permite reacciones DRM a bajas temperaturas y al mismo tiempo da a conocer algunas propiedades singulares y muy buenas. Li y col. informaron sobre un catalizador de Pt/CeO₂ para la reacción fototérmica de reformado seco de metano, que utilizó dopaje con Zn y superposición de MgO para lograr rendimientos de H₂ y CO de más de nueve y tres veces aumentados que los obtenidos mediante DRM propulsado térmicamente, respectivamente. Y prepararon catalizadores térmicos ligeros de Ni/Ga₂O₃ utilizando luz para calibrar la relación entre las dos reacciones competitivas centrales en la reorganización del tallo del metano y aumentaron la relación H₂/CO de 0,55 a 0,94. Xu et al. informaron sobre un catalizador Rh/Ce x WO₃ para DRM fototérmico que puede invocar simultáneamente procesos fototérmicos y fotovoltaicos, superando las limitaciones termodinámicas de DRM en condiciones convencionales y produciendo una excelente eficiencia energética fotoquímica (LTCEE) del 4,65% a intensidades de luz moderadas. A pesar de los avances

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

en la investigación en el reformado seco de metano fototérmico, se necesita con urgencia desarrollar catalizadores fototérmicamente activos de alto rendimiento (Sun et al., 2020).

5.1.1.1 Reformado catalítico de polipropileno para producir hidrógeno: influencia de las características del soporte y el tipo de metal activo en el catalizador. La energía del hidrógeno es una energía libre de contaminación. En la actualidad, su medio de modo de producción es a partir de combustibles fósiles, que es un recurso no renovable, por lo que el hidrógeno producido a partir de él se denomina hidrógeno gris. Con el constante cambio mundial hacia las nuevas energías, se han planteado nuevos requisitos para la producción de hidrógeno azul e hidrógeno verde. El hidrógeno azul se da a partir de gas natural mediante reformado de metano con vapor o reformado con vapor de autocalentamiento.

Aunque la producción de hidrógeno a partir de gas natural también produce gases contaminantes para la atmósfera, se implementan tecnologías avanzadas como la captura, utilización y almacenamiento de carbono para capturar gases de efecto invernadero en el proceso de producción de hidrógeno, logrando así una producción de hidrógeno con bajas emisiones de carbono. El hidrógeno verde es hidrógeno elaborado a partir de fuentes de energía renovables, como la solar, la eólica y la nuclear. Con la profunda investigación del concepto de desarrollo sostenible, el cambio del hidrógeno gris al hidrógeno azul y luego al hidrógeno verde es una forma importante de lograr una energía de hidrógeno con bajas o ninguna emisiones de carbono.

Los plásticos de desecho son desechos sólidos orgánicos ricos en elementos de carbono e hidrógeno. El plástico se puede transformar en fuentes de energía como el hidrógeno mediante implementación de tecnología de conversión térmica; la tecnología que siempre se utiliza es la tecnología de pirólisis catalítica. Para esta tecnología, muchos investigadores han llevado a cabo

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

investigaciones en el reactor y las materias primas, pero más investigaciones se centran en mejorar la eficiencia de la producción de hidrógeno mediante la modificación del catalizador, la innovación de la estructura del catalizador y la optimización de los parámetros de reacción. La selección de catalizadores es diversa, los catalizadores más estudiados con excelente rendimiento catalítico son los catalizadores soportados heterogéneos.

Para catalizadores soportados heterogéneos, la característica de soporte del catalizador es el factor principal que afecta el rendimiento del catalizador. En circunstancias normales, el soporte en sí no tiene capacidad catalítica y el soporte da principalmente el papel de soporte estructural, transportando la sustancia activa como soporte y también puede aumentar la resistencia mecánica y la resistencia al calor del catalizador. Los soportes comunes son óxido metálico, tamiz molecular, materiales de carbono y otros tipos de soporte de catalizador. ZSM-5 es una de las zeolitas conocidas con mayor estabilidad térmica. Hay anillos estables de cinco miembros en su esqueleto y la alta relación Si/Al hace que tenga buena estabilidad térmica, por lo que se usa ampliamente en reacciones a alta temperatura. El carbón activado es también uno de los catalizadores comunes.

El carbón activado tiene una estructura microcristalina colocada irregularmente, y hay microporos, mesoporos y microporos en el cristal, de modo que tiene una gran superficie interior, alta resistencia mecánica y buena resistencia al desgaste. La aplicación de tamiz molecular ZSM-5 y carbón activado como soporte de catalizador en una reacción de craqueo catalítico es muy común. Karnjanakom et al. estudiaron el papel del catalizador de tamiz molecular en el reformado catalítico de alquitrán y escogieron un tamiz molecular con estructura de poros hexagonales.

Descubrieron que un buen soporte mesoporos promovía la dispersión de las partículas de Ni, especialmente en el caso de una carga elevada, el catalizador aún podía mantener una buena

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

actividad y estabilidad. Desarrollaron un catalizador jerárquico ZSM-5 soportado en níquel para la preparación de nanotubos de carbono e hidrógeno a partir del craqueo de polietileno. Los resultados mostraron que, en condiciones optimizadas, el mayor rendimiento de material de carbono del catalizador fue del 43,8 % en peso y el rendimiento máximo de hidrógeno fue del 5,2 % en peso. La investigación muestra que el catalizador de tamiz molecular modificado con álcalis alcanzaría a mejorar el rendimiento catalítico y promover la generación de nanotubos de carbono e hidrógeno. Se observó que el tamiz molecular se usa ampliamente en el soporte de catalizadores debido a su composición de poros regular y su alta superficie específica. Dicho en otras palabras, el tamiz molecular también enfrenta problemas de alto costo y mala estabilidad hidrotérmica. La mayoría de las reacciones de craqueo catalítico de plásticos se llevan a cabo en medio acuoso, por lo tanto, una buena estabilidad hidrotérmica es la calidad del soporte del catalizador. El soporte de carbón activado barato tiene suficiente estabilidad química e hidrotérmica, y también tiene otras características de soporte, como una buena superficie específica y estructura de poros.

El carbón activado se ha utilizado en el reformado catalítico de metano para producir hidrógeno. Se investigó el efecto del catalizador de hierro soportado con carbón activado en el reformado del alquitrán de biomasa. Su análisis demostró que el catalizador con carbón activado como soporte puede promover eficazmente la producción de hidrógeno en el producto desarrollaron carbón activado a través de otros procesos de preparación y lo promovieron al estudio de la producción de hidrógeno a partir de la descomposición del metano. Los autores señalaron que el carbón activado mostró una alta actividad inicial en la reacción de producción de hidrógeno y metano, y luego se descompuso rápidamente.

Los autores concluyeron que la descomposición del metano se producía principalmente en microporos. El tamiz molecular ZSM-5 y el carbón activado se utilizan ampliamente como soportes

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

de catalizadores en reacciones de craqueo catalítico; también se han informado sus aplicaciones en la pirólisis catalítica de plásticos para la producción de hidrógeno. Sin embargo, rara vez se informan estudios comparativos sobre el rendimiento catalítico de los dos soportes. El mecanismo catalítico del tamiz molecular ZSM-5 y el carbón activado para la producción de hidrógeno mediante el reformado de plásticos con vapor de agua y su selectividad y la implementación a la producción de hidrógeno aún no están claros. También hay diferencias en el mecanismo de acción entre los dos soportes y el metal. El carbón activado tiene una estructura desordenada y el tamiz molecular tiene una estructura ordenada. Es importante explorar las diferencias en el efecto de acoplamiento entre ellos y los metales y las diferencias en el mecanismo de pasivación durante el uso a largo plazo. El carbón activado y el tamiz molecular tienen diferentes ventajas como soportes catalíticos, y un análisis comparativo del rendimiento catalítico y las ventajas de los dos soportes en la pirólisis catalítica de plásticos para producir hidrógeno debería proporcionar un soporte teórico de alta calidad para el desarrollo de esta tecnología. Este estudio realizó los primeros experimentos comparativos con el tamiz molecular ZSM-5 y los soportes de carbón activado para explorar su rendimiento catalítico en el craqueo catalítico de plásticos utilizando un reactor de lecho fijo de dos etapas para producir hidrógeno. Se prepararon cinco tipos de catalizadores de níquel utilizando tres zeolitas ZSM-5 con diferentes proporciones Si/Al (las proporciones Si/Al fueron 20, 50, 80) y carbón activado en polvo y granular como soportes del catalizador, y se estudió la pirólisis catalítica del polipropileno.

Además, en base a la resistencia al carbono de los metales alcalinos, en este estudio también se discutieron los efectos de varios metales alcalinos sobre la producción catalítica. Con el objetivo de obtener el catalizador de níquel preferido, se preparó el catalizador bimetalico añadiendo metales alcalinos (calcio, hierro y magnesio), centrándose en explorar la capacidad de producción de gas e hidrógeno del catalizador. Se probaron la micro morfología y la composición estructural

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

del catalizador y se analizó la influencia de las características del catalizador en el rendimiento catalítico (Wang et al., 2024).

5.1.1.1.1 Producción de hidrógeno en tierra a partir de gas de ebullición (bog) mediante un proceso de reformado con vapor de gas natural simulación de procesos y análisis tecno económico. Aunque se espera que los recursos de energía renovable crezcan en las próximas tres décadas, los recursos energéticos basados en combustibles fósiles dominarán los mercados energéticos. El gas natural ha obtenido una ventaja competitiva entre las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles debido a su reputación como combustible respetuoso con el medio ambiente. Los estudios indican que la quema de gas natural para generar energía emite entre un 50% y un 60% menor de dióxido de carbono que las plantas de carbón. La quema de gas natural emite entre un 15% y un 20% menor de gases que atrapan el calor durante el transporte que la gasolina.

Además, la expansión del comercio de gas natural licuado está en continuo crecimiento porque proporciona medios económicos para llevar gas natural a los mercados mundiales. Los desafíos con el gas natural licuado surgen durante el proceso de su cadena de suministro con la formación de gas de ebullición durante la carga, descarga, envío y almacenamiento. BOG es la evaporación de cantidades no despreciables de gas natural licuado dentro de los tanques de almacenamiento y la carga. Los principales contribuyentes a la generación de BOG son la despresurización y la fuga de calor. En las terminales exportadoras, el BOG generado puede representar hasta entre el 2% y el 6% del gas natural licuado total elaborado. La formación de BOG crea barreras económicas dentro de la cadena de suministro de gas natural licuado y tiene un impacto negativo en el medio ambiente. Desde una perspectiva económica, la formación de BOG controla la composición y el volumen de envío del gas natural licuado.

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

Además, el efecto de los gases de efecto invernadero asociado con las fugas de BOG contribuye al calentamiento global y a la formación de ozono a nivel del suelo, un tipo fatal de contaminación del aire que puede causar problemas respiratorios y cardiovasculares. Principalmente, la investigación se ha centrado en la recuperación de BOG mediante licuefacción en las terminales receptoras y durante la moda de gas natural licuado. Sin embargo, los sistemas de re licuefacción de BOG requieren una inversión de capital adicional, requisitos de energía y espacio adicional para la instalación de equipos. Estudios más recientes se han centrado en innovaciones para el control y minimización. Se probaron soluciones BOG como re licuefacción, subenfriamiento y reciclaje como gas combustible . Según los resultados, estas elecciones pueden generar muchos millones de dólares cada año, respectivamente. Por otra parte, los gastos fijos y operativos del proceso independiente deben examinarse cuidadosamente.

Ventajas

El BOG se utiliza para compensar la escasez de gas combustible y el excedente se quema en antorchas. La quema de BOG se considera un desperdicio de recursos en consecuencia al alto costo energético que implica la licuefacción del gas natural y su contribución al aumento de las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero. Los gobiernos y las industrias han utilizado o adoptado varias estrategias de descarbonización para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, y se estima que las emisiones de CO₂ del sector energético totalizarán alrededor de 43 mil millones de toneladas métricas para 2050. Entre las contribuciones de descarbonización, el hidrógeno es un combustible, portador de energía y materia prima más limpios en procesos de la industria . La introducción de unidades de procesamiento y utilización de hidrogeno en las cadenas de suministro de energía existentes se han elevado. Diez países han propuesto estrategias de H₂ para apoyar el cero neto en el 2050.

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

La Agencia Internacional de Energía estima que se necesitan 530 millones de toneladas de H₂ para alcanzar el objetivo de emisiones netas cero. Esta cantidad es seis veces mayor que la producción en la actualidad de hidrógeno. Se han utilizado muchas tecnologías para la producción de H₂ a partir de combustibles fósiles y fuentes renovables, y los investigadores investigan su viabilidad técnica y económica para la comercialización industrial. Por otro lado, otros estudios recientes evaluaron la competitividad de costos y las barreras sociotécnicas para la integración del hidrógeno verde en los sistemas energéticos nacionales . En comparación con la producción de H₂ de origen fósil, las evaluaciones revelaron que los factores económicos mitigan la producción de H₂ con bajas emisiones de carbón (Yusuf et al., 2024).

Evaluación comparativa del hidrógeno azul a partir de tecnologías de reformado de metano con vapor, reformado autotérmico y descomposición de gas natural para regiones productoras de Gas natural.

En esta sección, describimos el funcionamiento de SMR, ATR y NGD. La figura 1 muestra una descripción general de los procesos de producción de hidrógeno. Cada proceso incluye unidades de producción de hidrógeno, captura de carbono, transporte de CO₂, atrapamiento y almacenamiento de hidrógeno. También se incluyen el material y la energía aguas arriba para indicar las fuentes de materia prima, combustible y electricidad. La capacidad de producción de cada tecnología es de 607 toneladas de hidrógeno al día. En cada tecnología, la CAC está unida a puntos donde se escapan de CO₂ al medio ambiente. Para las configuraciones ATR y NGD se considera un punto de secuestro de dióxido de carbono. En SMR, se capturan las emisiones de gases de efecto invernadero del horno del reformador y las emisiones de CO₂.

5.1.1.1.2 Reformado de metano con vapor. El figura del proceso muestra un reactor de reformado, reactores de cambio de agua elevada temperatura y menor temperatura, purificación

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

de gas de síntesis, compresión de CO_2 , transporte, captura y almacenamiento de hidrógeno. Primero, discutimos el caso de la secuestro y almacenamiento de carbono. En el reactor reformado, el gas natural reacciona con vapor a alta presión para producir gas de síntesis. La reacción tiene lugar en presencia de catalizadores a base de níquel, lo que produce monóxido de carbono y gas de síntesis rico en hidrógeno. La mezcla CO_2 y H_2 se enfría y se alimenta a los reactores de transferencia de agua, donde el monóxido de carbono se convierte en dióxido de carbono e hidrógeno mediante la adición de vapor. Los reactores HT y LT WGS están dispuestos en serie con catalizadores $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ y $\text{CuO/ZnO/Al}_2\text{O}_3$, respectivamente. El hidrógeno se purifica en la unidad de purificación de gas de síntesis. Luego se comprime y se almacena en los tanques de almacenamiento. Las emisiones de CO_2 de la unidad de purificación de gas de síntesis se comprimen y se transportan a través de una tubería hasta una caverna subterránea. Para el caso sin CCS, el gas de síntesis de los reactores agua-gas se envía directamente a la unidad de purificación de gas de síntesis/adsorción por cambio de presión después del enfriamiento. El CO_2 producido se escapa directamente a la atmósfera.

5.1.1.1.3 Reformado autotérmico de metano. La figura del proceso muestra un reactor autotérmico, reactores temperatura alta y temperatura baja agua-gas, purificación de gas de síntesis, compresión de dióxido de carbono, transporte, captura, almacenamiento de hidrógeno y una unidad de separación de aire. En primer lugar, discutimos el caso de la secuestro y retención de carbono.

El oxígeno, el vapor y el metano reaccionan sobre un catalizador de níquel en un reactor ATR para producir la mezcla de gas. Las reacciones de estas corrientes de alimentación provocan que se produzcan reformado y oxidación simultáneamente. La reacción de oxidación parcial da el calor necesario para la reacción de reformado consume calor. El vapor y el metano se precalientan y luego se calientan nuevamente en un horno al ingresar al reactor ATR.

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

El gas de síntesis producido contiene hidrógeno, dióxido de carbono, vapor y algunos gases traza. Se enfría a la temperatura requerida para que se produzcan reacciones de cambio de agua-gas. En los reactores de cambio de agua y gas, el óxido de carbono reacciona con vapor sobre un catalizador de hierro y cromo para producir H_2 y CO_2 . El gas desplazado se envía a la purificación de la mezcla de gases, donde el óxido de carbono se extrae del gas rico en hidrógeno. El óxido de carbono separado se comprime y almacena mientras que el gas enriquecido en hidrógeno, que contiene óxido de carbono no transformado, argón y algunos gases traza, se envía a la unidad de adsorción por cambio de presión. En la unidad de adsorción por cambio de presión, se supone que el 90% del hidrógeno se recupera con una pureza del 99,9%, mientras que los gases restantes se aprovechan como combustible en la caldera/horno. Para el caso sin CCS, los efluentes de los reactores agua-gas se envían directamente a la unidad PSA después del enfriamiento y la separación del agua. El CO_2 producido se libera directamente a la atmósfera.

5.1.1.1.4 Descomposición del gas natural. La figura 4 de proceso que define el alcance y los límites de nuestro modelado para la vía. Como se muestra, el gas natural se introduce en la unidad de descomposición térmica, donde se separa en hidrógeno y carbono. La reacción de separación térmica consume energía y, sin catálisis, la reacción requiere una temperatura elevada para alcanzar velocidades de reacción razonables. A esa temperatura, es probable que las limitaciones metalúrgicas eleven los costos. El uso de catalizadores permite que el proceso funcione a temperaturas de alrededor de $800\text{ }^\circ\text{C}$. Se pueden manipular diversos catalizadores en formas metálicas o carbonosas. En nuestro modelo de procesos se asumió un catalizador de mineral de hierro. Se ha informado que el mineral de hierro puede catalizar el proceso y crear carbono gráfico como subproducto de carbono. Se utiliza un reactor de lecho fluidizado con un ciclón interno; ayuda a dividir el carbono sólido del hidrógeno producido y del gas natural no convertido. Cuando se extrae el carbón, el hidrógeno y el gas natural que salen de los ciclones y filtros se

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

comprime y se enfrían a temperatura ambiente antes de ingresar a una unidad PSA, donde el gas natural no convertido queda capturado y se produce hidrógeno puro. En el PSA, se supone que se recupera el 90% del hidrógeno con una pureza del 99,9%, mientras que los gases restantes se reciclan al reactor de lecho fluidizado. El calor necesario para el proceso de descomposición térmica se obtiene quemando gas natural. Las emisiones de CO₂ procedentes de la quema de gas natural se atrapan a través de la unidad de captura de carbono. El CO₂ atrapado se transporta y almacena posteriormente bajo tierra

(Oni et al., 2022).

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

6.

Conclusiones

- Se observó que las nuevas tecnologías para la producción de hidrógeno son muy útiles y creativas pues requieren en muchas ocasiones un bajo costo de materias primas como lo son biomasa.
- La producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles una viabilidad para frenar el cambio climático y una opción para seguir utilizando las reservas de petróleo.
- La utilización de energía solar y eléctrica para la producción de hidrógeno es una manera más útil para elaborar el mismo.
- Las nuevas tecnologías son más eficientes en cuanto se refiere a la captura de hidrógeno.
- Las nuevas tecnologías incorporan captura de CO₂ para evitar que salga a la atmósfera y utilizarlo en otros muchos casos para procesos industriales.

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

7.

Bibliografía

- Sifontes (2019). La biomasa – fuente alternativa de combustibles y compuestos químicos
<https://analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/view/1171>
- Duttle, Marsha (enero de 1990). [«NM State greywater advice»](#)
- felipe benjumea florente. (2024). La producción de hidrógeno renovable: biomasa.
<https://Felipebenjumeallorente.Com/La-Produccion-de-Hidrogeno-RenovableBiomasa/#:~:Text=La%20biomasa%20puede%20convertirse%20en,Descomposici%C3%B3n%20qu%C3%ADmica%20de%20materia%20org%C3%A1nica>.
- Oni, A. O., Anaya, K., Giwa, T., Di Lullo, G., & Kumar, A. (2022). Comparative assessment of blue hydrogen from steam methane reforming, autothermal reforming, and natural gas decomposition technologies for natural gas-producing regions. *Energy Conversion and Management*, 254.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115245>
- para la Diversificación Ahorro de la Energía, I. (n.d.). **E N E R G Í A S R E N O V A B L E S Biomasa Gasificación Biomasa Gasificación Energía de la Biomasa GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO.**
- Rodriguez Guerra, A., & Baca-Cajas, K. A. (2022). Generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU): análisis de una década de gestión en países de Europa y América. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas*, 43(1). <https://doi.org/10.26807/remcb.v43i1.919>
- Second Edition. (n.d.)

ESTADO DEL ARTE DE REFORMADORES DE HIDRÓGENO

sera doria. (2024). • https://www.bloginstrumentacion.com/aplicaciones/las-reaccionesde-oxidacin-parcial-pox-representan-un-reto-para-el-termopar-y-otros-instrumentos-demedicin/?doing_wp_cron=1710377081.0695040225982666015625.

• Sun, Z., Zhang, X., Li, H., Liu, T., Sang, S., Chen, S., Duan, L., Zeng, L., Xiang, W., & Gong, J. (2020). Chemical looping oxidative steam reforming of methanol: A new pathway for auto-thermal conversion. *Applied Catalysis B: Environmental*, 269.

<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.118758>

• Transforma. (2050). Escenario Ruta a Cero Neto 2050.

• Udemu, C., & Font-Palma, C. (2024). Potential cost savings of large-scale blue hydrogen production via sorption-enhanced steam reforming process. *Energy Conversion and Management*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118132>

• Wang, S., Sun, Y., Shan, R., Gu, J., Yuan, H., & Chen, Y. (2024). Catalytic reforming of polypropylene to produce hydrogen: Influence of support characteristics and active metal type in catalyst. *Fuel*, 360. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130510>

• Yusuf, N., Almomani, F., & Ali S Al-Sobhi, S. (2024). Onshore hydrogen production from boil-off gas (BOG) via natural gas steam reforming process: Process simulation and technoeconomic analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 1046–1057.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.1>