



- (12) BẢN MÔ TẢ SÁNG CHẾ THUỘC BẰNG ĐỘC QUYỀN SÁNG CHẾ
(19) Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam (VN) (11) CỤC SỞ HỮU TRÍ TUỆ
(51)^{2022.01} C10G 2/00; C25B 1/04; C01B 3/34; (13) B
C01B 3/48



1-0053501

-
- (21) 1-2022-07448 (22) 03/05/2021
(86) PCT/US2021/010019 03/05/2021 (87) WO 2021/225641 11/11/2021
(30) 63/101,556 04/05/2020 US
(45) 25/11/2025 452 (43) 25/05/2023 422A
(73) INFINIUM TECHNOLOGY, LLC (US)
2020 L Street, Suite 120, Sacramento, CA 95811-4260, United States of America
(72) SCHUETZLE, Robert (US); SCHUETZLE, Dennis (US); WRIGHT, Harold (US);
HANBURY, Orion (US); CALDWELL, Matthew (US); RODRIGUEZ, Ramer (US).
(74) Công ty TNHH dịch vụ sở hữu trí tuệ DREWMARKS (DREWMARKS CO.,LTD.)
-

- (54) QUY TRÌNH TÍCH HỢP ĐỂ CHUYỂN HÓA DÒNG CẤP CHỨA CACBON
DIOXIT THÀNH DÒNG SẢN PHẨM CHỨA CÁC HYDROCACBON

(21) 1-2022-07448

(57) Sáng chế đề cập đến quy trình tích hợp để chuyển hóa dòng cấp chứa cacbon dioxit thành dòng sản phẩm chứa các hydrocacbon có chiều dài từ 5 đến 24 nguyên tử cacbon. Quy trình này bao gồm bước điện phân, bước chuyển hóa nước-khí nghịch, bước tổng hợp hydrocacbon, và bước reforming tự nhiệt.

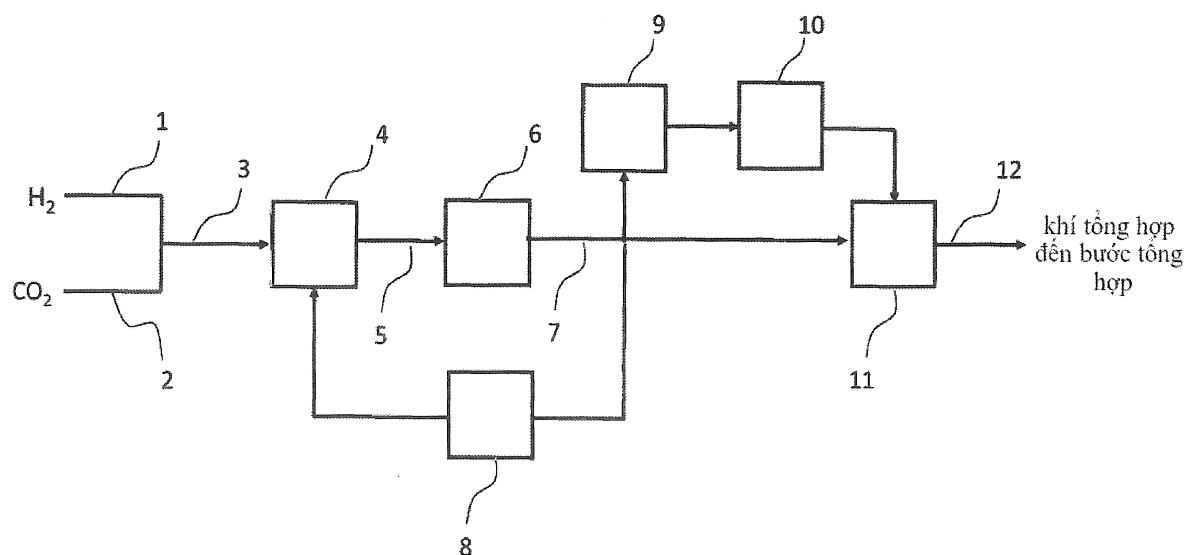


FIG 1

Lĩnh vực kỹ thuật được đề cập

Sáng chế đề cập đến quy trình xúc tác để chuyển hóa cacbon dioxit và nước và điện, lý tưởng là điện tái tạo hoặc cacbon thấp, thành nhiên liệu và hóa chất chất lượng cao cacbon thấp hoặc không cacbon. Hiệu quả của quy trình chuyển hóa được nâng cao bằng cách kết hợp một số quy trình đổi mới chưa được mô tả trong lĩnh vực hiện hành. Cải tiến thứ nhất là quá trình reforming tự nhiệt (autothermal reforming - ATR) giúp chuyển hóa khí thải (và các nguyên liệu hydrocacbon tiềm năng khác) từ giai đoạn sản xuất nhiên liệu/hóa chất và oxy từ quá trình điện phân thành khí tổng hợp bổ sung. Cải tiến thứ hai là việc sử dụng năng lượng nhiệt từ quá trình ATR để kích hoạt chất xúc tác chuyển hóa nước-khí nghịch (Reverse Water Gas Shift - RWGS) (hydro hóa) (CO_2). Cải tiến thứ ba là tách và chuyển hóa CO_2 từ quá trình ATR thành khí tổng hợp bổ sung bằng cách sử dụng chất xúc tác hydro hóa CO_2 . Thứ tư là chỉ sử dụng duy nhất chất xúc tác chuyển hóa nước-khí nghịch (RWGS), lò phản ứng, và quy trình chuyển hóa CO_2 và hydro thành khí tổng hợp và tốt hơn là vận hành hoạt động RWGS này ở áp suất gần với áp suất của quá trình sản xuất nhiên liệu/hóa chất, mà chuyển hóa khí tổng hợp thành nhiên liệu hoặc hóa chất. Tốt nhất là các nhiên liệu hoặc hóa chất này là chất lỏng hydrocacbon parafinic hoặc olefinic với phần lớn nằm trong khoảng $\text{C}_5\text{-C}_{24}$.

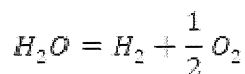
Tình trạng kỹ thuật của sáng chế

Cacbon dioxit được tạo ra bởi nhiều quá trình công nghiệp và sinh học. Cacbon dioxit thường được thải vào khí quyển. Tuy nhiên, vì cacbon dioxit đã được xác định là một khí nhà kính đáng kể, nên cần giảm lượng khí thải cacbon dioxit từ các quá trình này. Mặc dù cacbon dioxit này có thể được sử dụng để làm giàu dầu và khí đốt khai thác từ các giếng trong một số trường hợp hạn chế, phần lớn cacbon dioxit thu được này sẽ được thải vào khí quyển. Phương pháp được ưu tiên để xử lý cacbon dioxit là thu và sử dụng cacbon dioxit một cách hiệu quả và chuyển hóa nó thành các sản phẩm hữu ích như nhiên liệu (ví dụ nhiên liệu diesel, xăng, hỗn hợp xăng, nhiên liệu máy bay phản lực, dầu hỏa, v.v.) và hóa chất (ví dụ dung môi, olefin, ancol, chất thơm, chất bôi trơn, sáp, amoniac, metanol, v.v.) có thể thay thế nhiên liệu và hóa chất

được sản xuất từ các nguồn hóa thạch như dầu mỏ và khí tự nhiên, do đó làm giảm tổng lượng khí thải cacbon dioxit thực vào khí quyển. Đây là ý nghĩa của nhiên liệu và hóa chất cacbon thấp, cacbon rất thấp, hoặc không cacbon.

Cacbon dioxit có thể được thu từ một số nguồn. Các nhà máy sản xuất công nghiệp sản xuất amoniac để làm phân bón tạo ra một lượng lớn khí cacbon dioxit. Các nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô hoặc lúa mì thành etanol tạo ra một lượng lớn cacbon dioxit. Các nhà máy điện tạo ra điện từ các nguồn tài nguyên khác nhau (ví dụ như khí tự nhiên, than đá, các nguồn tài nguyên khác) tạo ra một lượng lớn khí cacbon dioxit. Các nhà máy hóa chất như nhà máy sản xuất nylon, nhà máy sản xuất etylen, các nhà máy hóa chất khác tạo ra một lượng lớn cacbon dioxit. Một số nhà máy xử lý khí tự nhiên tạo ra CO₂ như một phần của quá trình làm sạch khí tự nhiên để đáp ứng các thông số kỹ thuật của đường ống. Việc thu CO₂ để sử dụng như được mô tả ở đây thường liên quan đến việc tách cacbon dioxit ra khỏi dòng khí thải hoặc một dòng khác mà cacbon dioxit không phải là thành phần chính. Một số nguồn CO₂ đã tương đối tinh khiết và có thể được sử dụng chỉ với quá trình xử lý nhỏ (có thể bao gồm nén khí) trong các quy trình được mô tả ở đây. Một số quy trình có thể cần alkylamin hoặc phương pháp khác được sử dụng để loại bỏ cacbon dioxit khỏi dòng khí thải. Các alkylamin được sử dụng trong quy trình này bao gồm monoetanolamin, dietanolamin, metyldietanolamin, diisopropylamin, aminoetoxyetanol, hoặc sự kết hợp của chúng. Các vật liệu khung cơ kim (Metal Organic Framework - MOF) cũng đã được sử dụng như một phương tiện để tách cacbon dioxit ra khỏi dòng loãng bằng cách sử dụng sự hấp thụ hóa học hoặc vật lý để thu cacbon dioxit từ dòng này. Các phương pháp khác để thu được cacbon dioxit đậm đặc bao gồm đốt cháy vòng lặp hóa học trong đó vật liệu oxit kim loại tuần hoàn thu cacbon dioxit được tạo ra trong quá trình đốt cháy. Cacbon dioxit cũng có thể được thu từ khí quyển trong cái gọi là thu khí trực tiếp (direct air capture - DAC) cacbon dioxit.

Các nguồn hydro (H₂) tái tạo có thể được sản xuất từ nước thông qua quá trình điện phân.

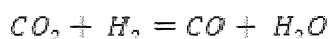


Phản ứng này sử dụng điện để tách nước thành hydro và oxy. Bình điện phân gồm có cực dương và cực âm được ngăn cách bởi chất điện phân. Các bình điện phân khác

nhau hoạt động theo những cách hơi khác nhau, chủ yếu là do loại vật liệu điện phân khác nhau có liên quan.

Tuy nhiên, mỗi công nghệ điện phân có năng lượng điện đầu vào tối thiểu theo lý thuyết là 39,4 kWh/kgH₂ (nhiệt trị cao (high heating value - HHV) của hydro) nếu nước được cấp ở áp suất và nhiệt độ môi trường xung quanh vào hệ thống và tất cả năng lượng đầu vào được cung cấp dưới dạng điện năng. Năng lượng điện đầu vào cần thiết có thể giảm xuống dưới 39,4 kWh/kgH₂ nếu nhiệt lượng phù hợp được cung cấp cho hệ thống. Bên cạnh điện phân, nghiên cứu quan trọng hiện nay đang xem xét các cách tách nước thành hydro và oxy bằng cách sử dụng năng lượng ánh sáng và chất xúc tác quang. (Acar và cộng sự, *Int. J. Energy Res.* 2016; 40:1449–1473).

Một phản ứng đã được xem xét để sử dụng cacbon dioxit là phản ứng chuyển hóa nước-khí nghịch (RWGS).



Phản ứng này chuyển hóa cacbon dioxit và hydro thành cacbon monoxit và nước. Phản ứng này thu nhiệt ở nhiệt độ phòng và cần nhiệt để tiến hành và nhiệt độ tăng cao và cần có chất xúc tác tốt để chuyển hóa đáng kể cacbon dioxit. Một số chất xúc tác đã được bộc lộ cho phản ứng RWGS. Chất xúc tác chính đã được nghiên cứu trước đây là Cu hoặc Pt hoặc Rh được phân tán trên các nền oxit kim loại. (Daza & Kuhn, *RSC Adv.* 2016, 6, 49675-49691).

Với CO (Cacbon Monoxit) từ phản ứng chuyển hóa nước-khí nghịch và hydro từ quá trình điện phân nước, tiềm năng tồn tại đối với các sản phẩm hữu ích thông qua xúc tác hydro hóa cacbon monoxit thành hydrocacbon. Hỗn hợp của H₂ và CO được gọi là khí tổng hợp. Khí tổng hợp có thể được sử dụng làm nguyên liệu để sản xuất nhiều loại sản phẩm hóa học, bao gồm nhiên liệu lỏng, ancol, axit axetic, dimetyl ete, metanol, amoniac, và nhiều sản phẩm hóa học khác.

Quá trình hydro hóa với xúc tác của cacbon monoxit để tạo ra các khí nhẹ, chất lỏng và sáp, nằm trong phạm vi từ metan đến các hydrocacbon nặng (lớn hơn hoặc bằng C₁₀₀) ngoài các hydrocacbon được oxy hóa, thường được gọi là quá trình tổng hợp Fischer-Tropsch (hoặc F-T). Các quá trình F-T ở nhiệt độ thấp (< 250°C) truyền thống chủ yếu tạo ra sáp F-T khối lượng (hoặc % khối lượng) cao (lớn hơn hoặc bằng C₂₅) từ quá trình chuyển hóa có xúc tác. Sau đó, các sáp F-T này được hydrocracking

(bẻ gãy nguyên tử bằng hydro) và/hoặc xử lý thêm để sản xuất dầu diesel, naphtha, và các phân đoạn khác. Trong quá trình hydrocracking này, các hydrocacbon nhẹ cũng được tạo ra, có thể cần nâng cấp thêm để tạo ra các sản phẩm khả thi. Các chất xúc tác thường được sử dụng cho F-T là các chất xúc tác gốc Coban (Co) hoặc gốc Sắt (Fe) cũng hoạt động cho phản ứng chuyển hóa nước-khí nghịch (WGS) dẫn đến chuyển hóa cacbon monoxit thành cacbon dioxit. Xem thêm chi tiết về tình trạng kỹ thuật trong tài liệu Fischer-Tropsch (S.S. Ail, S. Dasappa / Renewable and Sustainable Energy Reviews 58 (2016) 267–286).

Cho đến nay, các quy trình, hệ thống, và chất xúc tác hiệu quả và tiết kiệm để chuyển hóa cacbon dioxit thành nhiên liệu và hóa chất hữu ích vẫn chưa được phát triển. Cần có các quy trình, hệ thống, và chất xúc tác tốt hơn.

Bản chất kỹ thuật của sáng chế

Sáng chế đề cập đến quy trình chuyển hóa cacbon dioxit, nước, và điện thành các hóa chất và nhiên liệu hữu ích. Quy trình này liên quan đến việc chuyển hóa nước thành hydro trong bộ điện phân hiệu quả sử dụng điện, lý tưởng là điện tái tạo, làm nguồn năng lượng. Cacbon dioxit và hydro được phản ứng với cacbon monoxit và nước trong lò phản ứng chuyển hóa nước-khí nghịch (RWGS), nơi nhiệt của phản ứng được cung cấp bởi điện tái tạo. Chất xúc tác được sử dụng trong lò phản ứng là chất xúc tác dung dịch rắn mới. Sản phẩm cacbon monoxit và hydro bổ sung được phản ứng với nhiên liệu và hóa chất trong lò phản ứng sản xuất nhiên liệu lỏng sử dụng chất xúc tác mới để sản xuất trực tiếp nhiên liệu và hóa chất. Nhiều loại nhiên liệu hoặc hóa chất khác nhau có thể được sản xuất từ khí tổng hợp như được mô tả ở đây. Tốt hơn là, sản phẩm được tạo ra là hydrocacbon có độ dài từ 4 đến 24 nguyên tử cacbon. Hiệu quả chuyển hóa của quy trình được nâng cao, và giảm chi phí vốn bằng cách kết hợp một số hoạt động sáng tạo vào quy trình. Cải tiến đầu tiên là quá trình reforming tự nhiệt (ATR) giúp chuyển hóa khí thải (và các nguyên liệu hydrocacbon tiềm năng khác) từ giai đoạn sản xuất nhiên liệu/hóa chất và oxy từ quá trình điện phân thành khí tổng hợp bổ sung. Cải tiến thứ hai là việc sử dụng năng lượng nhiệt từ quá trình ATR để kích hoạt chất xúc tác hydro hóa CO₂. Cải tiến thứ ba là chuyển hóa CO₂ từ quá trình ATR thành khí tổng hợp bổ sung bằng cách sử dụng chất xúc tác hydro hóa CO₂. Thứ tư là chỉ sử dụng duy nhất chất xúc tác chuyển hóa nước-khí nghịch (RWGS) và

quy trình chuyển hóa CO₂ và hydro thành khí tổng hợp và tốt hơn là vận hành hoạt động RWGS này ở áp suất gần với áp suất của quá trình sản xuất nhiên liệu/hóa chất, mà ưu tiên chuyển hóa khí tổng hợp thành nhiên liệu hoặc hóa chất.

Mô tả vắn tắt các hình vẽ

Các hình vẽ từ Fig.1 đến Fig.3 thể hiện quy trình hiệu quả cao tích hợp để chuyển hóa cacbon dioxit, nước, và điện tái tạo thành nhiên liệu và hóa chất tái tạo.

Fig.1 thể hiện một phần của lưu đồ quy trình tổng thể để chuyển hóa H₂ và CO₂ thành nhiên liệu và hóa chất. Cụ thể, Fig.1 là hệ thống lò phản ứng chuyển hóa nước-khí nghịch để tạo ra CO từ CO₂.

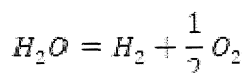
Fig.2 thể hiện một phần của lưu đồ quy trình tổng thể để chuyển hóa H₂ và CO₂ thành nhiên liệu và hóa chất. Cụ thể, Fig.2 thể hiện hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng trong đó CO và H₂ phản ứng để tạo ra các hydrocacbon chuỗi dài hơn mà có thể được sử dụng làm nhiên liệu hoặc hóa chất cũng như ATR để chuyển hóa khí thải.

Fig.3 thể hiện một phần của lưu đồ quy trình tổng thể để chuyển hóa H₂ và CO₂ thành nhiên liệu và hóa chất. Cụ thể, Fig.3 thể hiện bộ điện phân để sản xuất hydro và oxy từ nước và năng lượng cacbon thấp.

Mô tả chi tiết sáng chế

Fig.1 thể hiện một số hệ thống con 1) hệ thống điện phân để sản xuất hydro từ nước, 2) hệ thống lò phản ứng chuyển hóa nước-khí nghịch (RWGS) để tạo ra CO từ CO₂, 3) phản biến đổi tự nhiệt (ATR), 4) hệ thống nén khí tổng hợp.

Nước được đưa vào hệ thống điện phân. Điện tái tạo được sử dụng để cung cấp năng lượng cho hệ thống điện phân. Hydro có thể được sản xuất bằng cách điện phân nước.



Bình điện phân gồm có cực dương và cực âm được ngăn cách bởi chất điện phân. Các bình điện phân khác nhau hoạt động theo những cách hơi khác nhau. Các thiết kế bình điện phân khác nhau sử dụng công nghệ điện phân khác nhau có thể được sử dụng bao gồm điện phân kiềm, điện phân màng, và điện phân nhiệt độ cao. Điện phân kiềm được ưu tiên hơn vì nó có khả năng thương mại với quy mô hoạt động lớn hơn >1 MW. Có thể sử dụng các chất điện phân khác nhau bao gồm chất lỏng KOH và NaOH có hoặc không có các hợp chất hoạt hóa. Các hợp chất hoạt hóa có thể được

thêm vào chất điện phân để cải thiện độ ổn định của chất điện phân. Hầu hết các chất hoạt hóa ion cho phản ứng biến hóa hydro đều bao gồm phức clorua kim loại gốc etylendiamin(en) ($[M(en)_3]Cl_x, M = \frac{1}{4}Co, Ni, v.v.)$ và Na_2MoO_4 hoặc Na_2WO_4 . Các chất xúc tác điện khác nhau có thể được sử dụng trên các điện cực chứa nhiều hợp chất khác nhau của kim loại và oxit như Raney-niken-nhôm mà có thể được tăng cường bằng cách thêm coban hoặc molybden vào hợp kim.

Một số hợp chất của các kim loại chuyển tiếp, chẳng hạn như Pt_2Mo , Hf_2Fe , và $TiPt$, đã được sử dụng làm vật liệu catot và cho thấy hoạt tính điện cực cao hơn đáng kể so với các điện cực trong tình trạng kỹ thuật.

Nước ở catot kết hợp với các electron từ mạch ngoài để tạo thành khí hydro và các ion oxy mang điện tích âm. Các ion oxy đi qua màng gốm rắn và phản ứng ở anot để tạo thành khí oxy và tạo ra các electron cho mạch ngoài. Bằng cách này, cả khí hydro và khí oxy đều được tạo ra trong bình điện phân. Theo một phương án, nhiều bình điện phân hoạt động song song. Không có bình điện phân nào hoạt động với hiệu suất năng lượng 100% và việc sử dụng năng lượng là rất quan trọng đối với hoạt động kinh tế của nhà máy. Việc sử dụng năng lượng trong bình điện phân nên ít hơn 200 mega-watt giờ (MWh) / tấn H_2 được sản xuất, và tốt hơn là ít hơn 120 MWh/tấn H_2 được sản xuất và tốt hơn nữa là ít hơn 60 MWh/tấn H_2 được sản xuất. Đối với phương án bình điện phân kiềm, mức sử dụng điện sẽ lớn hơn 39,4 MWh/tấn H_2 được sản xuất. Tuy nhiên, đối với phương án bình điện phân nhiệt độ cao, mức sử dụng điện có thể ít hơn 39,4 MWh/tấn H_2 được sản xuất nếu nhiệt thải được sử dụng để làm nóng bình điện phân cao hơn nhiệt độ môi trường.

Cacbon dioxid có thể đến từ nhiều nguồn công nghiệp và tự nhiên. Cacbon dioxid thường được tìm thấy trong các mỏ khí tự nhiên. Cacbon dioxid được thải ra từ nhiều quá trình sinh học như phân hủy kỵ khí. Nhiều quy trình khác (ví dụ, nhà máy điện, nhà máy xi măng, sản xuất etanol, lọc dầu, nhà máy hóa chất, v.v.) tạo ra cacbon dioxid thường được thải vào khí quyển. Cacbon dioxid cũng có thể được tìm thấy trong khí quyển. Cacbon dioxid có thể được thu từ các quá trình sinh học, công nghiệp, và khí quyển này thông qua nhiều công nghệ đã biết và có thể được sử dụng làm nguyên liệu cho sáng chế.

Nhiên liệu và hóa chất không cacbon, cacbon thấp hoặc cacbon cực thấp yêu cầu nhiên liệu hóa thạch không được đốt cháy trong quá trình sản xuất nhiên liệu và hóa chất. Điều này có nghĩa là bất kỳ sự gia nhiệt nào của các nguồn cấp cho quá trình tích hợp cần phải được thực hiện bằng các phương tiện gián tiếp (các bộ trao đổi chéo) hoặc thông qua hệ thống ga nhiệt điện trong đó điện đến từ nguồn không cacbon hoặc nguồn tái tạo như gió, năng lượng mặt trời, địa nhiệt, hoặc hạt nhân.

Dòng hydro 1 và dòng cacbon dioxid 2 được trộn lẫn để tạo thành dòng 3 trên Fig.1. Tỷ lệ H_2/CO_2 nằm trong khoảng từ 2,0 mol/mol đến 4,0 mol/mol, tốt hơn nữa là từ 3,0 đến 4,0 mol/mol. Nguyên liệu cho chuyển hóa nước-khí nghịch (RWGS) hỗn hợp có thể được gia nhiệt bằng cách trao đổi nhiệt gián tiếp đến nhiệt độ lớn hơn 900°F (xấp xỉ 482.2°C). Điều quan trọng là sự tăng nhiệt độ ban đầu này được thực hiện mà không sử dụng quá trình đốt cháy trực tiếp khí chứa cacbon để cung cấp nhiệt vì điều đó có nghĩa là cacbon dioxid đã được tạo ra và có thể phủ nhận tác động của việc chuyển hóa cacbon dioxid thành nhiên liệu và hóa chất hữu ích.

Khí cấp cho RWGS bao gồm hỗn hợp hydro và cacbon dioxid được làm nóng đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1500°F (xấp xỉ 815.6°C), hoặc tốt hơn là lớn hơn 1600°F (xấp xỉ 871.1°C), ít nhất một phần trong bộ gia nhiệt sơ bộ bên ngoài bình phản ứng chính để sản xuất khí cấp nóng. Fig.1 thể hiện bộ gia nhiệt sơ bộ được chú thích là bước 4. Bộ gia nhiệt sơ bộ bước 4 được làm nóng bằng điện và tăng nhiệt độ của khí cấp thông qua trao đổi nhiệt gián tiếp lên lớn hơn 1500°F, và tốt hơn là lớn hơn 1600°F. Có nhiều cách để gia nhiệt khí cấp bằng điện. Một cách là thông qua gia nhiệt bằng điện trong lò bức xạ được đốt nóng bằng điện. Theo phương án này, ít nhất một phần khí cấp đi qua cuộn dây gia nhiệt trong lò. Trong lò, cuộn dây gia nhiệt được bao quanh bởi các bộ phận gia nhiệt bức xạ điện hoặc khí được thổi trực tiếp qua các bộ phận gia nhiệt, nhờ đó khí được gia nhiệt bằng một số quá trình truyền nhiệt đối lưu. Các bộ phận gia nhiệt bằng điện có thể được làm từ nhiều vật liệu. Các bộ phận gia nhiệt có thể là hợp kim niken crom. Các bộ phận này có thể ở dạng dải hoặc dây cuộn hoặc được đúc thành các kiểu zic-zắc. Các bộ phận thường được đỡ bởi lớp vỏ thép cách nhiệt, và sợi gốm thường được sử dụng để cách nhiệt. Các bộ phận bức xạ có thể được chia thành các vùng để tạo ra kiểu gia nhiệt có kiểm soát. Có thể cần nhiều cuộn dây và nhiều vùng để cung cấp nhiệt cho khí cấp và tạo ra khí cấp nóng. Lò bức xạ cần

có thiết kế thích hợp cho các bộ phận gia nhiệt và các cuộn chất lưu để đảm bảo tính thẩm mỹ và truyền nhiệt tốt. Việc sử dụng điện của lò bức xạ phải càng thấp càng tốt. Mức sử dụng điện của lò bức xạ nhỏ hơn 0,5 MWh (megawatt-giờ) điện/tấn CO₂ trong khí cấp; tốt hơn là ít hơn 0,40 MWh/tấn CO₂; và tốt hơn nữa là ít hơn 0,20 MWh/tấn CO₂.

Dòng khí cấp RWGS 5 được làm nóng sau đó được đưa vào bình phản ứng RWGS chính bước 6. Có hai phương án có thể có của bình phản ứng RWGS chính. Trong phương án thứ nhất, bình phản ứng RWGS chính là đoạn nhiệt hoặc gần đoạn nhiệt và được thiết kế để giảm thiểu tổn thất nhiệt, nhưng không có nhiệt bổ sung nào được thêm vào bình phản ứng chính và nhiệt độ trong bình phản ứng chính sẽ giảm từ đầu vào đến đầu ra của bình phản ứng. Trong phương án thứ hai, bình phản ứng RWGS chính được thiết kế tương tự nhưng nhiệt bổ sung được thêm vào bình để duy trì biên dạng nhiệt độ đẳng nhiệt hoặc gần đẳng nhiệt trong bình. Bình phản ứng RWGS chính là lò phản ứng có chiều dài hơn đường kính. Đầu vào của bình phản ứng chính nhỏ hơn đường kính tổng thể của bình. Bình phản ứng chính là bình thép. Bên trong bình thép được cách nhiệt để hạn chế thất thoát nhiệt. Có thể sử dụng các vật liệu cách nhiệt khác nhau bao gồm lớp lót chịu nhiệt được đổ hoặc đúc hoặc gạch cách nhiệt để hạn chế thất thoát nhiệt ra môi trường.

Một lớp chất xúc tác nằm bên trong bình phản ứng RWGS chính. Chất xúc tác có thể ở dạng hạt, viên, hình cầu, hình tam giác, hình tứ giác, phiến, hoặc bất kỳ hình dạng thiết kế nào khác để giảm thiểu sự sụt giảm áp suất trong lò phản ứng. Lý tưởng nhất là hình dạng và kích thước hạt của các hạt chất xúc tác được kiểm soát sao cho sự sụt giảm áp suất trong lò phản ứng nhỏ hơn 100 pound trên inch vuông (psi) [345 kPa] và tốt hơn là nhỏ hơn 20 psi (139 kPa). Kích thước của dạng chất xúc tác có thể có kích thước đặc trưng từ 1mm đến 10mm. Hạt xúc tác là vật liệu có cấu trúc là vật liệu xốp có diện tích bề mặt bên trong lớn hơn 40 m²/g, tốt hơn nữa là lớn hơn 80 m²/g với diện tích bề mặt ưu tiên là 100 m²/g. Có thể có một số vật liệu xúc tác có thể xúc tác phản ứng RWGS. Chất xúc tác sơ cấp đã được nghiên cứu trước đây là Cu hoặc Pt hoặc Rh được phân tán trên các nền oxit kim loại. (Daza & Kuhn, *RSC Adv.* 2016, 6, 49675-49691). Người ta nhận thấy rằng chất xúc tác được ưu tiên là chất xúc tác dung dịch rắn với kim loại chuyển tiếp trên spinen kim loại-alumin.

Chất xúc tác RWGS được sử dụng trong quá trình này là chất xúc tác dung dịch rắn hiệu suất cao có tính linh hoạt cao, và thực hiện phản ứng RWGS một cách hiệu quả. Chất xúc tác kim loại chuyển tiếp dung dịch rắn, mạnh có độ bền nhiệt cao lên đến 1.100°C , không tạo thành cacbon (cốc hóa), và có khả năng chống lại tốt các tạp chất có thể có trong dòng CO_2 thu được. Chất xúc tác này thể hiện hoạt tính cao ở các nồng độ kim loại chuyển tiếp thấp (5-20% khối lượng), so với các chất xúc tác khác cần ít nhất 30% khối lượng kim loại chuyển tiếp. Hơn nữa, việc sử dụng các kim loại quý đắt tiền để nâng cao hiệu suất của chất xúc tác là không cần thiết. Quá trình sản xuất chất xúc tác RWGS cũng quan trọng ở chỗ nó tạo ra chất xúc tác mà tạo thành pha dung dịch rắn đồng nhất, pha tinh thể hai kim loại dẫn đến không có sự phân tách của các pha kim loại. Cấu trúc hóa học độc đáo này giúp tăng cường khả năng chống cốc hóa, khi so sánh với các chất xúc tác được hỗ trợ bằng kim loại thông thường. Điều này cũng dẫn đến việc tăng cường khả năng chống lại các chất độc như lưu huỳnh và amoniac. Ngoài ra, chất xúc tác này đã tăng cường hoạt tính xúc tác ở diện tích bề mặt thấp hơn so với pha xúc tác phân ly đơn kim, ví dụ Ni trên alumin. Chất xúc tác này không cần xúc tiến kiểm để hạn chế sự lắng đọng cacbon.

Trong đó áp suất của bước RWGS và áp suất của bước tổng hợp hydrocacbon hoặc sản xuất nhiên liệu lỏng (Liquid Fuel Production - LFP) nằm trong khoảng 200 psi (~ 1379 kPa), tốt hơn là trong khoảng 100 psi (~ 689.5 kPa), hoặc thậm chí tốt hơn là 50 psi (~ 344.75 kPa). Việc vận hành hai quá trình ở áp suất gần nhau sẽ hạn chế độ nén cần thiết của dòng khí tổng hợp.

Tỷ lệ chuyển hóa cacbon dioxit thành cacbon monoxit trong bình phản ứng RWGS chính nói chung là nằm trong khoảng giữa 60 và 90% mol và tốt hơn là giữa 70 và 85% mol. Nếu phương án lò phản ứng đoạn nhiệt được sử dụng, nhiệt độ trong bình phản ứng RWGS chính sẽ giảm từ đầu vào đến đầu ra. Nhiệt độ đầu ra của lò phản ứng RWGS chính thấp hơn nhiệt độ đầu vào của lò phản ứng chính từ 100°F đến 200°F (từ 37.8°C đến 84°C) và tốt hơn là thấp hơn nhiệt độ đầu vào của lò phản ứng chính từ 105 đến 160°F (từ 40.6°C đến 71.1°C). Tốc độ không gian khối lượng RWGS (Weight Hourly Space Velocity - WHSV) là tốc độ dòng khối lượng của các chất phản ứng RWGS ($\text{H}_2 + \text{CO}_2$) mỗi giờ chia cho khối lượng của chất xúc tác trong lớp lò phản

ứng RWGS chính nằm trong khoảng giữa 1.000 và 50.000 trên giờ và tốt hơn là nằm trong khoảng giữa 5.000 và 30.000 trên giờ.

Khí ra khỏi bình phản ứng RWGS chính là dòng khí sản phẩm RWGS 7. Khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit (CO), hydro (H_2), cacbon dioxit chưa phản ứng (CO_2), và nước (H_2O). Ngoài ra, khí sản phẩm RWGS cũng có thể bao gồm một lượng nhỏ metan (CH_4) được tạo ra trong bình phản ứng chính bằng phản ứng phụ.

Khí sản phẩm RWGS có thể được sử dụng theo nhiều cách khác nhau tại thời điểm này trong quy trình. Khí sản phẩm có thể được làm lạnh và nén và được sử dụng trong quy trình thuận để sản xuất nhiên liệu và hóa chất như thể hiện trên Fig.2. Khí sản phẩm RWGS cũng có thể được làm lạnh, nén ở bước 8, và được đưa trở lại bộ gia nhiệt sơ bộ bước 4 và được đưa trở lại bình phản ứng chính bước 5. Khí sản phẩm RWGS cũng có thể được gia nhiệt lại trong bộ gia nhiệt sơ bộ bằng điện thứ hai bước 9 và được đưa đến bình phản ứng thứ hai ở bước 10, nơi có thể xảy ra quá trình chuyển hóa bổ sung CO_2 thành CO.

Fig.2 thể hiện bước tổng hợp hydrocacbon. Đây còn được gọi là bước sản xuất nhiên liệu lỏng (LFP). Lò phản ứng LFP chuyển hóa CO và H_2 thành các hydrocacbon chuỗi dài có thể được sử dụng làm nhiên liệu lỏng và hóa chất. Lò phản ứng này sử dụng một chất xúc tác duy nhất để sản xuất các hydrocacbon của nhiên liệu lỏng từ khí tổng hợp. Dòng khí tổng hợp 12 từ bước làm mát và cô đặc khí tổng hợp 22 trên Fig.2 (và bước nén tùy chọn 11 trên Fig.1) được trộn với dòng khí thải 13 để tạo ra dòng cấp liệu lò phản ứng LFP 14. Nguồn cấp liệu cho lò phản ứng LFP bao gồm hydro và cacbon monoxit. Lý tưởng nhất là tỷ lệ hydro trên cacbon monoxit trong dòng nằm trong khoảng giữa 1,9 và 2,2 mol/mol. Lò phản ứng LFP bước 15 là hệ thống lò phản ứng lớp cố định nhiều ống. Mỗi ống lò phản ứng LFP có thể có đường kính từ 13mm đến 26mm. Chiều dài của ống lò phản ứng thường lớn hơn 6 mét và tốt hơn là lớn hơn 10 mét. Các lò phản ứng LFP thường được định hướng thẳng đứng với nguồn cấp của lò phản ứng LFP đi vào ở trên cùng của lò phản ứng LFP. Tuy nhiên, có thể định hướng lò phản ứng nằm ngang trong một số trường hợp và việc đặt lò phản ứng ở góc cũng có thể có lợi trong một số trường hợp có giới hạn về chiều cao. Phần lớn chiều dài của ống lò phản ứng LFP được đổ đầy chất xúc tác LFP. Chất xúc tác LFP cũng có thể được pha trộn với chất pha loãng như silica hoặc alumin để hỗ trợ việc phân phối

nguồn cấp vào lò phản ứng LFP vào và đi qua ống lò phản ứng LFP. Phản ứng hóa học xảy ra trong lò phản ứng LFP tạo ra khí sản phẩm LFP bao gồm hầu hết các sản phẩm hydrocacbon có chiều dài từ năm đến hai mươi bốn cacbon (các hydrocacbon C_5 - C_{24}) cũng như nước, mặc dù một số hydrocacbon nằm ngoài phạm vi này. Điều quan trọng là lò phản ứng LFP không tạo ra bất kỳ lượng cacbon dioxit đáng kể nào. Ít hơn 2% cacbon monoxit trong nguồn cấp của lò phản ứng LFP phải được chuyển hóa thành cacbon dioxit trong lò phản ứng LFP. Điều quan trọng nữa là chỉ một lượng hạn chế cacbon monoxit trong nguồn cấp của lò phản ứng LFP được chuyển hóa thành hydrocacbon có số cacbon lớn hơn 24. Dưới 25% phần hydrocacbon của sản phẩm LFP nên có số cacbon lớn hơn 24. Tốt hơn là ít hơn 10% khối lượng của phần hydrocacbon của sản phẩm LFP nên có số cacbon lớn hơn 24. Tốt hơn nữa là, dưới 4% khối lượng phần hydrocacbon của sản phẩm LFP phải có số cacbon lớn hơn 24. Tốt hơn nữa là, ít hơn 1% khối lượng phần hydrocacbon của sản phẩm LFP phải có số cacbon lớn hơn 24. Như đã thảo luận ở trên, quá trình Fischer-Tropsch (F-T) thường tạo ra các sản phẩm hydrocacbon có chiều dài từ 1 đến 125 nguyên tử cacbon. Chất xúc tác LFP được sử dụng không tạo ra các hydrocacbon nặng với hiệu suất tương tự như các chất xúc tác khác được sử dụng trong quá trình F-T. Theo một số phương án của sáng chế, chất xúc tác LFP có hoạt tính không đáng kể đối với sự chuyển hóa của quá trình chuyển hóa cacbon monoxit thành cacbon dioxit thông qua phản ứng chuyển hóa nước-khí nghịch. Theo một số phương án của sáng chế, quá trình chuyển hóa chuyển dịch nước-khí của cacbon monoxit thành cacbon dioxit nhỏ hơn 5% so với cacbon monoxit trong thức ăn. Theo một số phương án, chất xúc tác LFP bao gồm coban là kim loại hoạt động. Theo một số phương án, chất xúc tác LFP bao gồm sắt là kim loại hoạt động. Theo một số phương án, chất xúc tác LFP bao gồm các hợp chất của sắt và coban làm kim loại hoạt động. Chất xúc tác LFP được chứa trên chất mang oxit kim loại được chọn từ một nhóm bao gồm nhôm, silic, titan, than hoạt tính, ống nano cacbon, zeolit hoặc các vật liệu mang khác với đủ kích thước, hình dạng, đường kính lỗ, diện tích bề mặt, cường độ nghiền, bán kính hạt hiệu dụng, hoặc hỗn hợp của chúng. Chất xúc tác có thể có nhiều hình dạng khác nhau của các chất mang có dạng thùy khác nhau với ba, bốn, hoặc năm thùy với hai hoặc nhiều hơn hai thùy dài hơn so với hai thùy ngắn hơn khác, với cả hai thùy dài hơn là đối xứng. Khoảng cách từ điểm

giữa của chất mang hoặc điểm giữa của mỗi thùy được gọi là bán kính hạt hiệu dụng, là một thông số quan trọng để đạt được độ chọn lọc mong muốn đối với các hydrocacbon C₅ đến C₂₄. Các chất trợ xúc tác LFP có thể bao gồm một trong những chất sau: niken, xeri, lantan, bạch kim, ruteni, reni, vàng, hoặc rodi. Các chất trợ xúc tác LFP nhỏ hơn 1% khối lượng trên tổng lượng chất xúc tác và tốt hơn là nhỏ hơn 0,5% khối lượng và thậm chí tốt hơn nữa là nhỏ hơn 0,1% khối lượng.

Chất mang xúc tác LFP có đường kính lỗ lớn hơn 8 nanomet (nm), bán kính hạt hiệu dụng trung bình nhỏ hơn 600 micron, cường độ nghiền lớn hơn 3 lbs/mm (xấp xỉ 1,36 kg/mm) và diện tích bề mặt BET lớn hơn 100 m²/g. Xúc tác sau khi tẩm kim loại có độ phân tán kim loại khoảng 4%. Một số loại chất mang đã được tìm thấy để tối đa hóa sản lượng hydrocacbon C₅-C₂₄. Chúng chứa các hợp chất alumin/silic, than hoạt tính, alumin, ống nano cacbon, và/hoặc chất mang gốc zeolit.

Lò phản ứng tầng cố định LFP được vận hành theo cách để tối đa hóa sản lượng hydrocacbon C₅-C₂₄. Lò phản ứng LFP theo một phương án được vận hành ở áp suất từ 150 đến 450 psi (xấp xỉ từ 21,8 đến 65,3 kPa). Lò phản ứng được vận hành trong phạm vi nhiệt độ từ 350 đến 460°F (xấp xỉ từ 176,7 đến 237,8°C) và thông thường hơn ở quanh mức 410°F (210°C). Phản ứng là phản ứng tỏa nhiệt. Nhiệt độ của lò phản ứng được duy trì bên trong các ống lò phản ứng LFP bằng cách đặt bó ống lò phản ứng vào bộ trao đổi nhiệt, nơi có hơi nước sôi ở bên ngoài các ống lò phản ứng LFP. Nhiệt độ hơi ở nhiệt độ thấp hơn nhiệt độ phản ứng LFP để nhiệt truyền từ ống lò phản ứng LFP sang hơi có nhiệt độ thấp hơn. Nhiệt độ hơi nước được duy trì bằng cách duy trì áp suất của hơi nước. Hơi nước nói chung là hơi bão hòa. Theo phương án khác, lò phản ứng xúc tác có thể là lò phản ứng hồ xi măng, lò phản ứng vi kênh, lò phản ứng tầng sôi, hoặc các loại lò phản ứng khác được biết đến trong lĩnh vực này.

Sự chuyển hóa CO trong lò phản ứng LFP được duy trì ở mức chuyển hóa CO từ 30 đến 80 %mol cho mỗi lần đi qua. CO có thể được tái chế để chuyển hóa thêm hoặc được đưa đến lò phản ứng LFP bổ sung ở phía sản phẩm ra. Độ chọn lọc cacbon đối với CO₂ được giảm thiểu xuống dưới 4% lượng CO được chuyển hóa và tốt hơn là dưới 1%. Độ chọn lọc cacbon đối với các hydrocacbon C₅-C₂₄ là từ 60 đến 90%. Dòng khí sản phẩm lò phản ứng LFP 16 chứa các hydrocacbon C₅-C₂₄ mong muốn, được ngưng tụ dưới dạng nhiên liệu lỏng và nước, cũng như cacbon monoxit chưa phản ứng,

hydro, một lượng nhỏ các hydrocacbon C_1 - C_4 , và một lượng nhỏ dòng hydrocacbon C_{24+} 24. Sản phẩm mong muốn được tách ra khỏi dòng bằng cách làm mát, làm ngưng tụ sản phẩm và/hoặc chưng cất hoặc bất kỳ phương tiện nào khác chấp nhận được ở bước 17. Dòng cacbon monoxit chưa phản ứng, hydro, và dòng các hydrocacbon C_1 - C_4 18 là một phần của nguồn cấp cho quá trình reforming tự nhiệt bước 19.

Fig.2 cũng thể hiện phân đoạn reforming tự nhiệt (ATR) bước 20 của quy trình. Trong quá trình reforming tự nhiệt (ATR), nguồn cấp hydrocacbon ATR bao gồm cacbon monoxit, hydro, và các hydrocacbon C_1 - C_4 . Quá trình reforming tự nhiệt của khí tự nhiên chủ yếu là metan (C_1) thành cacbon monoxit và hydro đã được thực hiện thương mại trong nhiều năm. Xem tài liệu của K. Aasberg-Petersen và cộng sự, *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 3 (2011) 423-459.

Theo một phương án của sáng chế, nguồn cấp hydrocacbon ATR bao gồm hơi khí tự nhiên 20 và dòng cacbon monoxit chưa phản ứng, hydro, và dòng các hydrocacbon C_1 - C_4 18. Khí tự nhiên bao gồm metan và có thể chứa các hydrocacbon nhẹ cũng như cacbon dioxit. Theo phương án này, nhiên liệu và các hóa chất được sản xuất có thể không phải là các nhiên liệu không cacbon nhưng vẫn sẽ có độ cacbon được cải thiện hơn so với các nhiên liệu và hóa chất truyền thống. Khí tự nhiên trong nguồn cấp ATR được chuyển hóa thành khí tổng hợp (chứa một tỷ lệ lớn hydro). Điều này làm giảm lượng nước cần được điện phân để tạo ra hydro và giảm kích thước của bình điện phân. Phương án này có thể khả thi hơn về mặt kinh tế để sản xuất nhiên liệu và hóa chất cacbon thấp. Trong nguồn cấp hydrocacbon ATR, tỷ lệ khí tự nhiên trên cacbon monoxit chưa phản ứng LFP, hydro, và các hydrocacbon C_1 - C_4 phải nhỏ hơn 2,0 kg/kg. Tốt hơn nữa là tỷ lệ phải nhỏ hơn 1,25 kg/kg.

ATR được sử dụng trong sáng chế là để tạo ra sản phẩm có nhiều cacbon monoxit và cacbon dioxit trong khí sản phẩm nhỏ hơn 10 %mol. Nguồn cấp oxy hóa ATR bao gồm hơi nước và oxy, nơi oxy được tạo ra bằng quá trình điện phân nước. Nguồn cấp oxy hóa ATR và nguồn cấp hydrocacbon ATR được gia nhiệt trước và sau đó phản ứng trong lò đốt ATR nơi chất oxy hóa và hydrocacbon bị oxy hóa một phần ở nhiệt độ trong lò đốt lớn hơn 2000°C. Lò phản ứng ATR có thể được chia thành ba vùng; Vùng đốt (hoặc lò đốt) nơi ít nhất một phần nguyên liệu cấp hydrocacbon ATR được đốt cháy hoàn toàn thành nước và cacbon dioxit; vùng nhiệt nơi xảy ra các phản

ứng nhiệt. Trong vùng nhiệt sự chuyển hóa tiếp tục xảy ra bởi các phản ứng pha khí đồng nhất. Các phản ứng này là các phản ứng chậm hơn so với các phản ứng đốt cháy như phản ứng oxy hóa CO và phản ứng nhiệt phân liên quan đến các hydrocacbon cao hơn. Các phản ứng tổng thể chính trong vùng nhiệt là quá trình reforming hơi hydrocacbon pha khí đồng nhất và phản ứng chuyển dịch. Trong vùng xúc tác, quá trình chuyển hóa cuối cùng của các hydrocacbon diễn ra thông qua các phản ứng xúc tác dị thể bao gồm quá trình reforming hơi metan và phản ứng chuyển dịch nước-khí. Khí sản phẩm ATR thu được có thành phần gần với thành phần cân bằng nhiệt động lực học đã dự đoán. Thành phần khí sản phẩm ATR thực tế giống như thành phần cân bằng nhiệt động lực học trong khoảng chênh lệch nhỏ hơn 70°C. Đây gọi là nhiệt độ tiếp cận cân bằng. Để giữ cho lượng CO₂ được tạo ra trong ATR ở mức tối thiểu, lượng hơi trong nguồn cấp oxy hóa ATR cần được giữ ở mức thấp nhất có thể mà vẫn tạo ra khí sản phẩm ATR có nhiều muội than gần với thành phần dự đoán cân bằng. Thông thường, tổng tỷ lệ hơi trên cacbon (mol/mol) trong nguồn cấp ATR hỗn hợp (chất oxy hóa + hydrocacbon) phải nằm trong khoảng từ 0,4 đến 1,0, với mức tối ưu là khoảng 0,6.

Sản phẩm ATR rời khỏi vùng xúc tác ATR ở nhiệt độ hơn 800°C. Sản phẩm ATR bước 21 được làm mát đến nhiệt độ thấp hơn thông qua lò hơi nhiệt thải bước 22, nơi nhiệt được truyền để tạo ra hơi. Hơi này, cũng như hơi áp suất thấp hơn được tạo ra bởi lò phản ứng LFP, có thể được sử dụng để tạo ra điện.

Các chất xúc tác ATR thích hợp cho các phản ứng vùng xúc tác thường là gốc niken. Chất xúc tác dung dịch rắn mới được mô tả ở trên có thể được sử dụng làm chất xúc tác ATR. Các chất xúc tác ATR thích hợp khác là niken trên alumin pha alpha hoặc spinel magie alumin (MgAl₂O₄) được sử dụng có hoặc không có các chất hoạt hoá kim loại quý trong đó chất hoạt hoá kim loại quý bao gồm vàng, bạch kim, reni, hoặc ruteni. Các spinel có nhiệt độ nóng chảy cao hơn và độ bền nhiệt cao hơn và ổn định hơn so với các chất xúc tác gốc alumin.

Dòng sản phẩm ATR 23 có thể được trộn với sản phẩm RWGS và được sử dụng làm nguồn cấp cho lò phản ứng LFP. Điều này dẫn đến việc sử dụng nhiều cacbon dioxid ban đầu thành các sản phẩm hydrocacbon từ C₅ đến C₂₄.

Theo một số phương án, khí sản phẩm LFP không thích hợp làm nguồn cấp trực tiếp cho ATR và phải được reforming trước. Trong những trường hợp đó, khí sản phẩm LFP bao gồm cacbon monoxit chưa phản ứng, hydro, các hydrocacbon C_1-C_4 và CO_2 bao gồm khí cấp hydrocacbon cho lò reforming trước. Các hydrocacbon cao hơn và các oxit cacbon trong dòng có thể cần sử dụng lò reforming trước thay vì trực tiếp được sử dụng làm nguồn cấp hydrocacbon ATR. Lò reforming trước thường là lò phản ứng đoạn nhiệt. Lò reforming trước đoạn nhiệt chuyển hóa các hydrocacbon cao hơn trong nguồn cấp cho lò reforming trước thành hỗn hợp metan, hơi nước, oxit cacbon và hydro mà sau đó thích hợp làm nguồn cấp hydrocacbon ATR. Một lợi ích của việc sử dụng lò reforming trước là nó cho phép gia nhiệt sơ bộ nguồn cấp hydrocacbon ATR cao hơn mà có thể làm giảm lượng oxy được sử dụng trong ATR. Quá trình tích hợp kết quả như được mô tả ở trên dẫn đến sự chuyển hóa cao của cacbon dioxit thành các sản phẩm hydrocacbon C_5-C_{24} mà thích hợp làm nhiên liệu hoặc hóa chất.

Các phương án nhất định của phương pháp

Sau đây là một số phương án nhất định của các quy trình chuyển hóa cacbon dioxit, nước, và điện thành nhiên liệu và hóa chất chất lượng cao cacbon thấp hoặc không cacbon:

1. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn. Hydro và cacbon dioxit được trộn lẫn để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) thường được gia nhiệt và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS bao gồm chất xúc tác dung dịch rắn. Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Khí sản phẩm RWGS được làm mát, nén, và đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng (“LFP”) hay còn gọi là bước tổng hợp hydrocacbon. Hệ thống LFP chuyển hóa khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) thành các sản phẩm hydrocacbon, trong đó hơn 50% sản phẩm là hydrocacbon từ C_5 đến C_{24} . Trong đó áp suất của bước RWGS và áp suất của bước tổng hợp hydrocacbon nằm trong khoảng 200 psi (~1379 kPa), tốt hơn là trong khoảng 100 psi (~689.5 kPa), hoặc thậm chí tốt hơn là 50 psi (~344,75 kPa).

2. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn. Hydro và cacbon dioxit được trộn lẫn để tạo thành dòng (nguyên

liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) thường được gia nhiệt và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS bao gồm chất xúc tác dung dịch rắn gốc niken. Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Một hoặc nhiều hydrocacbon C_1 - C_4 , cacbon monoxit và hydro được đưa vào lò reforming tự nhiệt (“ATR”) để cung cấp dòng sản phẩm ATR. Khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) được pha trộn với dòng sản phẩm ATR (tinh khiết hoặc không tinh khiết) và được đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng (“LFP”). Hệ thống LFP chuyển hóa các sản phẩm hỗn hợp RWGS và ATR thành các sản phẩm hydrocacbon, trong đó hơn 50% sản phẩm là các hydrocacbon từ C_4 đến C^{24} .

3. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn. Hydro và cacbon dioxit được trộn lẫn để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) thường được gia nhiệt và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS bao gồm chất xúc tác dung dịch rắn niken. Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Một hoặc nhiều hydrocacbon C_1 - C_4 , cacbon monoxit và hydro được đưa vào lò reforming tự nhiệt (“ATR”) chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken để cung cấp dòng sản phẩm ATR. Khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) được pha trộn với dòng sản phẩm ATR (tinh khiết hoặc không tinh khiết) và được đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng (“LFP”) chứa chất xúc tác Fischer-Tropsch hoặc chất xúc tác khác hoặc chất xúc tác mà tạo ra các hydrocacbon từ khí tổng hợp. Hệ thống LFP chuyển hóa các sản phẩm hỗn hợp RWGS và ATR thành các sản phẩm hydrocacbon, trong đó hơn 50% sản phẩm là các hydrocacbon từ C_5 đến C_{24} .

4. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) thường được gia nhiệt và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS chứa chất xúc tác

dung dịch rắn niken. Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Khí sản phẩm RWGS được làm mát, nén, và đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng (“LFP”) mà chứa chất xúc tác hoặc chất xúc tác khác tạo ra các hydrocacbon từ khí tổng hợp. Hệ thống LFP chuyển hóa khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) thành các sản phẩm hydrocacbon, trong đó hơn 50% sản phẩm là hydrocacbon từ C₅ đến C²⁴.

5. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn lẫn để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) thường được gia nhiệt và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS bao gồm chất xúc tác dung dịch rắn niken. Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Một hoặc nhiều hydrocacbon C₁-C₄₊, cacbon monoxit và hydro được đưa vào lò reforming tự nhiệt (“ATR”) để cung cấp dòng sản phẩm ATR. Khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) được pha trộn với dòng sản phẩm ATR (tinh khiết hoặc không tinh khiết) và được đưa vào hệ thống xúc tác sản xuất metanol.

6. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) thường được gia nhiệt và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken. Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Một hoặc nhiều hydrocacbon C₁-C₄₊ (ví dụ metan), cacbon monoxit và hydro được đưa vào lò reforming tự nhiệt (“ATR”) chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken để cung cấp dòng

sản phẩm ATR. Khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) được pha trộn với dòng sản phẩm ATR (tinh khiết hoặc không tinh khiết) và được đưa vào quy trình sản xuất amoniac từ khí tổng hợp.

7. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) thường được gia nhiệt và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken. Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Khí sản phẩm RWGS được làm mát, nén, và đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng (“LFP”) mà chứa chất xúc tác Fischer-Tropsch tạo ra chủ yếu là sáp với các hydrocacbon từ C₅-C₁₀₀₊.

8. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn lẫn để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) thường được gia nhiệt và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS bao gồm chất xúc tác dung dịch rắn niken. Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Một hoặc nhiều hydrocacbon C₁-C₄ (ví dụ metan), cacbon monoxit và hydro được đưa vào lò reforming tự nhiệt (“ATR”) để cung cấp dòng sản phẩm ATR. Khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc

không tinh khiết) được pha trộn với dòng sản phẩm ATR (tinh khiết hoặc không tinh khiết) và được đưa vào quy trình sản xuất amoniac.

9. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn lẫn để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) thường được gia nhiệt và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS chứa chất xúc tác dung dịch rắn chứa kim loại chuyển tiếp. Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Một hoặc nhiều hydrocacbon C₁-C₄ (ví dụ metan), cacbon monoxit và hydro được đưa vào lò reforming tự nhiệt (“ATR”) chứa chất xúc tác dung dịch rắn để cung cấp dòng sản phẩm ATR. Khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) được pha trộn với dòng sản phẩm ATR (tinh khiết hoặc không tinh khiết) và được đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng (“LFP”) chứa chất xúc tác tạo ra các hydrocacbon từ khí tổng hợp. Hệ thống LFP chuyển hóa các sản phẩm hỗn hợp RWGS và ATR thành các sản phẩm hydrocacbon, trong đó hơn 70% sản phẩm là các hydrocacbon từ C₅ đến C²⁴.

10. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo hoặc cacbon thấp. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy xử lý khí tự nhiên, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn lẫn để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1400°F (760°C), nơi nhiệt

lượng không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí có chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken. Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Khí sản phẩm RWGS được làm mát, nén và hệ thống tạo ra amoniac, metanol, hoặc các hydrocacbon lỏng.

11. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo hoặc cacbon thấp. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn lẫn để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1400°F (760°C), nơi nhiệt lượng không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí có chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken. Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Một hoặc nhiều hydrocacbon C₁-C₄ (ví dụ metan), cacbon monoxit và hydro được đưa vào lò reforming tự nhiệt (“ATR”) chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken để cung cấp dòng sản phẩm ATR. Khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) được pha trộn với dòng sản phẩm ATR (tinh khiết hoặc không tinh khiết) và được đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng (“LFP”) chứa chất xúc tác sản xuất nhiên liệu sử dụng kết hợp niken và coban. Hệ thống LFP chuyển hóa các sản phẩm hỗn hợp RWGS và ATR thành các sản phẩm hydrocacbon, trong đó hơn 50% sản phẩm là các hydrocacbon từ C₅ đến C²⁴.

12. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo hoặc cacbon thấp. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac

để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1400°F (760°C) bằng cách sử dụng các bộ phận gia nhiệt điện bức xạ có mức sử dụng điện ít hơn 0,5 MWh điện/tấn, 0,40 MWh điện/tấn hoặc 0,20 MWh điện/tấn CO₂ trong khí cấp, trong đó nhiệt không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS chứa chất xúc tác dung dịch rắn gốc kim loại chuyển tiếp. Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Khí sản phẩm RWGS được làm mát, nén và đưa vào nhà máy sản xuất hóa chất.

13. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1400°F (760°C) bằng cách sử dụng các bộ phận gia nhiệt điện bức xạ có mức sử dụng điện ít hơn 0,5 MWh điện/tấn, 0,40 MWh điện/tấn hoặc 0,20 MWh điện/tấn CO₂ trong khí cấp, trong đó nhiệt không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken. Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Một hoặc nhiều hydrocacbon C₁-C₄ (ví dụ metan), cacbon monoxit và hydro được đưa vào lò reforming tự nhiệt (“ATR”) chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken để cung cấp dòng sản phẩm ATR. Khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) được pha trộn với dòng sản phẩm ATR (tinh khiết hoặc không tinh khiết) và được đưa vào hệ thống

sử dụng chất xúc tác Fischer-Tropsch tạo ra sản phẩm chủ yếu là các sáp hydrocacbon cao.

14. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1200°F (xấp xỉ 649°C) bằng cách sử dụng bất kỳ bộ phận gia nhiệt điện nào có mức sử dụng điện ít hơn 0,5 MWh điện/tấn, 0,40 MWh điện/tấn hoặc 0,20 MWh điện/tấn CO₂ trong khí cấp, trong đó nhiệt không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS đoạn nhiệt hoặc đẳng nhiệt chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken. Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Khí sản phẩm RWGS được làm mát, nén, và đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng (“LFP”) mà chứa chất xúc tác Fischer-Tropsch hoặc chất xúc tác khác tạo ra các hydrocacbon từ khí tổng hợp. Hệ thống LFP chuyển hóa khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) thành các sản phẩm hydrocacbon, trong đó hơn 50% sản phẩm là hydrocacbon từ C₄ đến C²⁴.

15. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo hoặc cacbon thấp. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy xử lý khí tự nhiên, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc

nguyên liệu “RWGS”) được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1400°F (760°C) bằng cách sử dụng bộ phận gia nhiệt điện bức xạ có mức sử dụng điện ít hơn 0,5 MWh điện/tấn, 0,40 MWh điện/tấn hoặc 0,20 MWh điện/tấn CO₂ trong khí cấp, trong đó nhiệt không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS đoạn nhiệt hoặc đẳng nhiệt chứa chất xúc tác dung dịch rắn. Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Một hoặc nhiều hydrocacbon C₁-C₃ (ví dụ metan), cacbon monoxit và hydro được đưa vào lò reforming tự nhiệt (“ATR”). Khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) được pha trộn với dòng sản phẩm ATR (tinh khiết hoặc không tinh khiết) và được đưa vào hệ thống sản xuất metanol.

16. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo hoặc cacbon thấp. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1400°F (760°C) bằng cách sử dụng bộ phận gia nhiệt điện bức xạ có mức sử dụng điện ít hơn 0,5 MWh điện/tấn, 0,40 MWh điện/tấn hoặc 0,20 MWh điện/tấn CO₂ trong khí cấp, trong đó nhiệt không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS đoạn nhiệt hoặc đẳng nhiệt chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken. Hình dạng và kích thước hạt của các hạt chất xúc tác được kiểm soát sao cho sự sụt giảm áp suất trong lò phản ứng nhỏ hơn 50 pound trên inch vuông (psi) (345 kPa) và tốt hơn là nhỏ hơn 20 psi (139 kPa). Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Khí sản phẩm RWGS được làm mát, nén, và đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng (“LFP”) mà chứa chất xúc tác tạo ra các hydrocacbon từ khí tổng hợp. Hệ thống LFP

chuyển hóa khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) thành các sản phẩm hydrocacbon, trong đó hơn 50% sản phẩm là hydrocacbon từ C_5 đến C^{24} .

17. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo hoặc cacbon thấp. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy xử lý khí tự nhiên, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyền. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1400°F (760°C) bằng cách sử dụng bộ phận gia nhiệt điện bức xạ có mức sử dụng điện ít hơn 0,5 MWh điện/tấn, 0,40 MWh điện/tấn hoặc 0,20 MWh điện/tấn CO_2 trong khí cấp, trong đó nhiệt không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS đoạn nhiệt hoặc đẳng nhiệt chứa chất xúc tác dung dịch rắn. Hình dạng và kích thước hạt của các hạt chất xúc tác được kiểm soát sao cho sự sụt giảm áp suất trong lò phản ứng nhỏ hơn 50 pound trên inch vuông (psi) (345 kPa) và tốt hơn là nhỏ hơn 20 psi (139 kPa). Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Một hoặc nhiều hydrocacbon C_1 - C_3 (ví dụ metan), cacbon monoxit và hydro được đưa vào lò reforming tự nhiệt (“ATR”) chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken để cung cấp dòng sản phẩm ATR. Khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) được pha trộn với dòng sản phẩm ATR (tinh khiết hoặc không tinh khiết) và được đưa vào hệ thống chuyển hóa khí tổng hợp bao gồm quy trình tổng hợp metanol, quy trình sản xuất amoniac, quy trình Fischer-Tropsch để sản xuất sáp và các hydrocacbon khác, hoặc sản xuất hóa chất hoặc nhiên liệu khác.

18. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo hoặc cacbon thấp. Cacbon dioxit

được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1400°F (760°C) bằng cách sử dụng bộ phận gia nhiệt điện bức xạ có mức sử dụng điện ít hơn 0,5 MWh điện/tấn, 0,40 MWh điện/tấn hoặc 0,20 MWh điện/tấn CO₂ trong khí cấp, trong đó nhiệt không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS đoạn nhiệt hoặc đẳng nhiệt chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken. Hình dạng và kích thước hạt của các hạt chất xúc tác được kiểm soát sao cho sự sụt giảm áp suất trong lò phản ứng nhỏ hơn 100 pound trên inch vuông (psi) (345 kPa) và tốt hơn là nhỏ hơn 50 psi (139 kPa). Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Mỗi lần chuyển hóa cacbon dioxit thành cacbon monoxit trong lò phản ứng RWGS là từ 30 đến 90% mol hoặc từ 50 đến 70% mol, và tốc độ không gian khối lượng RWGS là từ 1.000 đến 50.000 trên giờ hoặc từ 5.000 đến 30.000 trên giờ. Khí sản phẩm RWGS được làm mát, nén, và đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng (“LFP”) mà chứa chất xúc tác tạo ra các hydrocacbon từ khí tổng hợp. Hệ thống LFP chuyển hóa khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) thành các sản phẩm hydrocacbon, trong đó hơn 50% sản phẩm là hydrocacbon từ C₅ đến C²⁴.

19. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo hoặc cacbon thấp. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy xử lý khí tự nhiên, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1000°F (xấp xỉ

537,8°C) bằng cách sử dụng bộ phận gia nhiệt điện bức xạ có mức sử dụng điện ít hơn 0,5 MWh điện/tấn, 0,40 MWh điện/tấn hoặc 0,20 MWh điện/tấn CO₂ trong khí cấp, trong đó nhiệt không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS đoạn nhiệt hoặc đẳng nhiệt chứa chất xúc tác dung dịch rắn gốc kim loại chuyển tiếp. Hình dạng và kích thước hạt của các hạt chất xúc tác được kiểm soát sao cho sự sụt giảm áp suất trong lò phản ứng nhỏ hơn 50 pound trên inch vuông (psi) (345 kPa) và tốt hơn là nhỏ hơn 20 psi (139 kPa). Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Mỗi lần chuyển hóa cacbon dioxit thành cacbon monoxit trong lò phản ứng RWGS là từ 15 đến 75% mol hoặc từ 30 đến 70% mol, và tốc độ không gian khối lượng RWGS là từ 1.000 đến 50.000 trên giờ hoặc tốt hơn nữa là từ 5.000 đến 30.000 trên giờ. Một hoặc nhiều hydrocacbon C₁-C₄ (ví dụ metan), cacbon monoxit và hydro được đưa vào lò reforming tự nhiệt ("ATR") chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken để cung cấp dòng sản phẩm ATR. Khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) được pha trộn với dòng sản phẩm ATR (tinh khiết hoặc không tinh khiết) và được đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng ("LFP") chứa chất xúc tác Fischer-Tropsch hoặc chất xúc tác khác tạo ra các hydrocacbon từ khí tổng hợp. Hệ thống LFP chuyển hóa các sản phẩm hỗn hợp RWGS và ATR thành các sản phẩm hydrocacbon, trong đó hơn 50% sản phẩm là các hydrocacbon từ C₄ đến C²⁴.

20. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo hoặc cacbon thấp. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu "RWGS") được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1400°F (760°C) bằng cách sử dụng bộ phận gia nhiệt điện bức xạ có mức sử dụng điện ít hơn 0,5 MWh điện/tấn, 0,40 MWh

điện/tấn hoặc 0,20 MWh điện/tấn CO₂ trong khí cấp, trong đó nhiệt không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS đoạn nhiệt hoặc đẳng nhiệt chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken. Hình dạng và kích thước hạt của các hạt chất xúc tác được kiểm soát sao cho sự sụt giảm áp suất trong lò phản ứng nhỏ hơn 50 pound trên inch vuông (psi) (345 kPa) và tốt hơn là nhỏ hơn 20 psi (139 kPa). Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Mỗi lần chuyển hóa cacbon dioxit thành cacbon monoxit trong lò phản ứng RWGS là từ 15 đến 75% mol hoặc từ 30 đến 70% mol, và tốc độ không gian khối lượng RWGS là từ 1.000 đến 50.000 trên giờ và tốt hơn nữa là từ 5.000 đến 30.000 trên giờ. Khí sản phẩm RWGS được làm mát, nén, và đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng ("LFP"), cùng với khí tổng hợp tái chế, mà chứa chất xúc tác tạo ra các hydrocacbon từ khí tổng hợp. Lò phản ứng là hệ thống lò phản ứng cố định nhiều ống, trong đó mỗi ống phản ứng có đường kính từ 13mm đến 26mm và có chiều dài lớn hơn 6 mét hoặc lớn hơn 10 mét.

21. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu "RWGS") được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1400°F (760°C) bằng cách sử dụng bộ phận gia nhiệt điện bức xạ có mức sử dụng điện ít hơn 0,5 MWh điện/tấn, 0,40 MWh điện/tấn hoặc 0,20 MWh điện/tấn CO₂ trong khí cấp, trong đó nhiệt không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS đoạn nhiệt hoặc đẳng nhiệt chứa chất xúc tác dung dịch rắn gốc kim loại chuyển tiếp. Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Mỗi lần chuyển hóa cacbon dioxit thành

cacbon monoxit trong lò phản ứng RWGS là từ 15 đến 90% mol hoặc từ 30 đến 70% mol, và tốc độ không gian khối lượng RWGS là từ 1.000 đến 50,000 trên giờ và tốt hơn nữa là từ 5.000 đến 30.000 trên giờ. Một hoặc nhiều hydrocacbon C_1 - C_4 (ví dụ metan), cacbon monoxit và hydro được đưa vào lò reforming tự nhiệt (“ATR”) chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken để cung cấp dòng sản phẩm ATR. Khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) được pha trộn với dòng sản phẩm ATR (tinh khiết hoặc không tinh khiết) và được đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng (“LFP”), cùng với khí tổng hợp tái chế, mà chứa chất xúc tác Fischer-Tropsch hoặc chất xúc tác khác tạo ra các hydrocacbon từ khí tổng hợp. Lò phản ứng là hệ thống lò phản ứng cố định nhiều ống, trong đó mỗi ống phản ứng có đường kính từ 13mm đến 26mm và có chiều dài lớn hơn 6 mét hoặc lớn hơn 10 mét. Hệ thống LFP chuyển hóa các sản phẩm hỗn hợp RWGS và ATR thành các sản phẩm hydrocacbon, trong đó hơn 50% sản phẩm là các hydrocacbon từ C_5 đến C^{24} .

23. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1400°F (760°C) bằng cách sử dụng bộ phận gia nhiệt điện bức xạ có mức sử dụng điện ít hơn 0,5 MWh điện/tấn, 0,40 MWh điện/tấn hoặc 0,20 MWh điện/tấn CO_2 trong khí cấp, trong đó nhiệt không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS đoạn nhiệt hoặc đẳng nhiệt chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken. Hình dạng và kích thước hạt của các hạt chất xúc tác được kiểm soát sao cho sự sụt giảm áp suất trong lò phản ứng nhỏ hơn 50 pound trên inch vuông (psi) (345 kPa) và tốt hơn là nhỏ hơn 20 psi (139 kPa). Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Mỗi lần chuyển hóa cacbon

dioxit thành cacbon monoxit trong lò phản ứng RWGS là từ 15 đến 90% mol hoặc từ 40 đến 80% mol, và tốc độ không gian khối lượng RWGS là từ 1.000 đến 50.000 trên giờ và tốt hơn nữa là từ 5.000 đến 30.000 trên giờ. Khí sản phẩm RWGS được làm mát, nén, và đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng (“LFP”), cùng với khí tổng hợp tái chế, mà chứa chất xúc tác tạo ra các hydrocacbon từ khí tổng hợp. Lò phản ứng là hệ thống lò phản ứng cố định nhiều ống, trong đó mỗi ống phản ứng có đường kính từ 13mm đến 26mm và có chiều dài lớn hơn 6 mét hoặc lớn hơn 10 mét. Hệ thống LFP chuyển hóa khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) thành các sản phẩm hydrocacbon, trong đó hơn 50% sản phẩm là hydrocacbon từ C_4 đến C^{24} . Dưới 2% cacbon monoxit trong nguồn cấp của lò phản ứng LFP được chuyển hóa thành cacbon dioxit trong lò phản ứng LFP, và dưới 10% khối lượng hoặc dưới 4% khối lượng phần hydrocacbon của sản phẩm LFP có số cacbon lớn hơn 24.

24. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1400°F (760°C) bằng cách sử dụng bộ phận gia nhiệt điện bức xạ có mức sử dụng điện ít hơn 0,5 MWh điện/tấn, 0,40 MWh điện/tấn hoặc 0,20 MWh điện/tấn CO_2 trong khí cấp, trong đó nhiệt không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS đoạn nhiệt hoặc đẳng nhiệt chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken. Hình dạng và kích thước hạt của các hạt chất xúc tác được kiểm soát sao cho sự sụt giảm áp suất trong lò phản ứng nhỏ hơn 50 pound trên inch vuông (psi) (345 kPa) và tốt hơn là nhỏ hơn 20 psi (139 kPa). Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Mỗi lần chuyển hóa cacbon dioxit thành cacbon monoxit trong lò phản ứng RWGS là từ 15 đến 75% mol hoặc từ

30 đến 70% mol, và tốc độ không gian khối lượng RWGS là từ 1.000 đến 50.000 trên giờ và tốt hơn nữa là từ 5.000 đến 30.000 trên giờ. Một hoặc nhiều hydrocacbon C_1-C_4 (ví dụ metan), cacbon monoxit và hydro được đưa vào lò reforming tự nhiệt (“ATR”) chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken để cung cấp dòng sản phẩm ATR. Khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) được pha trộn với dòng sản phẩm ATR (tinh khiết hoặc không tinh khiết) và được đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng (“LFP”), cùng với khí tổng hợp tái chế, mà chứa chất xúc tác tạo ra các hydrocacbon từ khí tổng hợp. Lò phản ứng là hệ thống lò phản ứng cố định nhiều ống, trong đó mỗi ống phản ứng có đường kính từ 13mm đến 26mm và có chiều dài lớn hơn 6 mét hoặc lớn hơn 10 mét. Hệ thống LFP chuyển hóa các sản phẩm hỗn hợp RWGS và ATR thành các sản phẩm hydrocacbon, trong đó hơn 50% sản phẩm là các hydrocacbon từ C_4 đến C^{24} . Dưới 2% cacbon monoxit trong nguồn cấp của lò phản ứng LFP được chuyển hóa thành cacbon dioxit trong lò phản ứng LFP, và dưới 10% khối lượng hoặc dưới 4% khối lượng phân hydrocacbon của sản phẩm LFP có số cacbon lớn hơn 24.

25. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1400°F (760°C) bằng cách sử dụng bộ phận gia nhiệt điện bức xạ có mức sử dụng điện ít hơn 0,5 MWh điện/tấn, 0,40 MWh điện/tấn hoặc 0,20 MWh điện/tấn CO_2 trong khí cấp, trong đó nhiệt không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS đoạn nhiệt hoặc đẳng nhiệt chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken. Hình dạng và kích thước hạt của các hạt chất xúc tác được kiểm soát sao cho sự sụt giảm áp suất trong lò phản ứng nhỏ hơn 100 pound trên inch vuông (psi) (345 kPa) hoặc nhỏ hơn nữa. Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro,

cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Mỗi lần chuyển hóa cacbon dioxit thành cacbon monoxit trong lò phản ứng RWGS là từ 15 đến 75% mol hoặc từ 30 đến 70% mol, và tốc độ không gian khối lượng RWGS là từ 1.000 đến 50.000 trên giờ và tốt hơn nữa là từ 5.000 đến 30.000 trên giờ. Khí sản phẩm RWGS được làm mát, nén, và đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng ("LFP"), cùng với khí tổng hợp tái chế, mà chứa chất xúc tác tạo ra các hydrocacbon từ khí tổng hợp. Chất mang xúc tác LFP có đường kính lỗ lớn hơn 8 nanomet, bán kính hạt hiệu dụng trung bình nhỏ hơn 60 micromet, cường độ nghiền lớn hơn 3 lbs/mm (xấp xỉ 1,36 kg/mm) và diện tích bề mặt BET lớn hơn 80 m²/g, lớn hơn 90 m²/g, lớn hơn 100 m²/g, lớn hơn 125 m²/g hoặc lớn hơn 150 m²/g; và sự phân tán kim loại của chất xúc tác trên chất mang là từ 2% đến 4% hoặc khoảng 3%. Lò phản ứng là hệ thống lò phản ứng cố định nhiều ống, trong đó mỗi ống phản ứng có đường kính từ 13mm đến 26mm và có chiều dài lớn hơn 6 mét hoặc lớn hơn 10 mét. Hệ thống LFP chuyển hóa khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) thành các sản phẩm hydrocacbon, trong đó hơn 50% sản phẩm là hydrocacbon từ C₄ đến C₂₄. Dưới 2% cacbon monoxit trong nguồn cấp của lò phản ứng LFP được chuyển hóa thành cacbon dioxit trong lò phản ứng LFP, và dưới 10% khối lượng hoặc dưới 4% khối lượng phần hydrocacbon của sản phẩm LFP có số cacbon lớn hơn 24.

26. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy xử lý khí tự nhiên, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu "RWGS") được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1400°F (760°C) bằng cách sử dụng bộ phận gia nhiệt điện bức xạ có mức sử dụng điện ít hơn 0,5 MWh điện/tấn, 0,40 MWh điện/tấn hoặc 0,20 MWh điện/tấn CO₂ trong khí cấp, trong đó nhiệt không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS đoạn nhiệt hoặc đẳng nhiệt chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken. Hình dạng

và kích thước hạt của các hạt chất xúc tác được kiểm soát sao cho sự sụt giảm áp suất trong lò phản ứng nhỏ hơn 50 pound trên inch vuông (psi) (345 kPa) và tốt hơn là nhỏ hơn 20 psi (139 kPa). Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Mỗi lần chuyển hóa cacbon dioxit thành cacbon monoxit trong lò phản ứng RWGS là từ 15 đến 90% mol hoặc từ 50 đến 85% mol, và tốc độ không gian khối lượng RWGS là từ 1.000 đến 50.000 trên giờ và tốt hơn nữa là từ 5.000 đến 30.000 trên giờ. Một hoặc nhiều hydrocacbon C₁-C₄ (ví dụ metan), cacbon monoxit và hydro được đưa vào lò reforming tự nhiệt ("ATR") chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken để cung cấp dòng sản phẩm ATR. Khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) được pha trộn với dòng sản phẩm ATR (tinh khiết hoặc không tinh khiết) và được đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng ("LFP") cùng với chất xúc tác tạo ra các hydrocacbon từ khí tổng hợp. Chất mang xúc tác LFP có đường kính lỗ lớn hơn 8 nanomet, bán kính hạt hiệu dụng trung bình nhỏ hơn 60 micromet, cường độ nghiền lớn hơn 3 lbs/mm (xấp xỉ 1,36 kg/mm) và diện tích bề mặt BET lớn hơn 80 m²/g, lớn hơn 90 m²/g, lớn hơn 100 m²/g, lớn hơn 125 m²/g hoặc lớn hơn 150 m²/g; và sự phân tán kim loại của chất xúc tác trên chất mang là từ 2% đến 4% hoặc khoảng 3%. Lò phản ứng là hệ thống lò phản ứng cố định nhiều ống, trong đó mỗi ống phản ứng có đường kính từ 13mm đến 26mm và có chiều dài lớn hơn 6 mét hoặc lớn hơn 10 mét. Hệ thống LFP chuyển hóa các sản phẩm hỗn hợp RWGS và ATR thành các sản phẩm hydrocacbon, trong đó hơn 50% sản phẩm là các hydrocacbon từ C₄ đến C₂₄. Dưới 2% cacbon monoxit trong nguồn cấp của lò phản ứng LFP được chuyển hóa thành cacbon dioxit trong lò phản ứng LFP, và dưới 10% khối lượng hoặc dưới 4% khối lượng phần hydrocacbon của sản phẩm LFP có số cacbon lớn hơn 24.

27. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí,

hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1400°F (760°C) bằng cách sử dụng bộ phận gia nhiệt điện bức xạ có mức sử dụng điện ít hơn 0,5 MWh điện/tấn, 0,40 MWh điện/tấn hoặc 0,20 MWh điện/tấn CO₂ trong khí cấp, trong đó nhiệt không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS đoạn nhiệt hoặc đẳng nhiệt chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken. Hình dạng và kích thước hạt của các hạt chất xúc tác được kiểm soát sao cho sự sụt giảm áp suất trong lò phản ứng nhỏ hơn 50 pound trên inch vuông (psi) (345 kPa) và tốt hơn là nhỏ hơn 20 psi (139 kPa). Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Mỗi lần chuyển hóa cacbon dioxit thành cacbon monoxit trong lò phản ứng RWGS là từ 15 đến 75% mol hoặc từ 30 đến 70% mol, và tốc độ không gian khối lượng RWGS là từ 1.000 đến 50.000 trên giờ và tốt hơn nữa là từ 5.000 đến 30.000 trên giờ. Khí sản phẩm RWGS được làm mát, nén, và đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng (“LFP”), cùng với khí tổng hợp tái chế, mà chứa chất xúc tác tạo ra các hydrocacbon từ khí tổng hợp. Chất mang xúc tác LFP có đường kính lỗ lớn hơn 8 nanomet, bán kính hạt hiệu dụng trung bình nhỏ hơn 60 micromet, cường độ nghiền lớn hơn 3 lbs/mm (xấp xỉ 1,36 kg/mm) và diện tích bề mặt BET lớn hơn 80 m²/g, lớn hơn 90 m²/g, lớn hơn 100 m²/g, lớn hơn 125 m²/g hoặc lớn hơn 150 m²/g; và sự phân tán kim loại của chất xúc tác trên chất mang là từ 2% đến 4% hoặc khoảng 3%. Lò phản ứng là hệ thống lò phản ứng cố định nhiều ống, trong đó mỗi ống phản ứng có đường kính từ 13mm đến 26mm và có chiều dài lớn hơn 6 mét hoặc lớn hơn 10 mét. Hệ thống LFP chuyển hóa khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) thành các sản phẩm hydrocacbon, trong đó hơn 50% sản phẩm là hydrocacbon từ C₄ đến C₂₄. Dưới 2% cacbon monoxit trong nguồn cấp của lò phản ứng LFP được chuyển hóa thành cacbon dioxit trong lò phản ứng LFP, và dưới 10% khối lượng hoặc dưới 4% khối lượng phần hydrocacbon của sản phẩm LFP có số cacbon lớn hơn 24. Sự chuyển hóa CO trong lò phản ứng LFP được duy trì trong khoảng từ 30 đến 80% mol CO chuyển hóa cho mỗi lần đi qua, và độ chọn lọc cacbon thành CO₂ được giảm thiểu xuống dưới 4% hoặc dưới 1% lượng CO được chuyển hóa.

28. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1400°F (760°C) bằng cách sử dụng bộ phận gia nhiệt điện bức xạ có mức sử dụng điện ít hơn 0,5 MWh điện/tấn, 0,40 MWh điện/tấn hoặc 0,20 MWh điện/tấn CO₂ trong khí cấp, trong đó nhiệt không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS đoạn nhiệt hoặc đẳng nhiệt chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken. Hình dạng và kích thước hạt của các hạt chất xúc tác được kiểm soát sao cho sự sụt giảm áp suất trong lò phản ứng nhỏ hơn 50 pound trên inch vuông (psi) (345 kPa) và tốt hơn là nhỏ hơn 20 psi (139 kPa). Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Mỗi lần chuyển hóa cacbon dioxit thành cacbon monoxit trong lò phản ứng RWGS là từ 15 đến 90% mol hoặc từ 60 đến 90% mol, và tốc độ không gian khối lượng RWGS là từ 1.000 đến 50.000 trên giờ và tốt hơn nữa là từ 5.000 đến 30.000 trên giờ. Một hoặc nhiều hydrocacbon C₁-C₃ (ví dụ metan), cacbon monoxit và hydro được đưa vào lò reforming tự nhiệt (“ATR”) chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken để cung cấp dòng sản phẩm ATR. Khí sản phẩm RWGS (tinh khiết hoặc không tinh khiết) được pha trộn với dòng sản phẩm ATR (tinh khiết hoặc không tinh khiết) và được đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng (“LFP”), cùng với khí tổng hợp tái chế, mà chứa chất xúc tác tạo ra các hydrocacbon từ khí tổng hợp. Chất mang xúc tác LFP có đường kính lỗ lớn hơn 8 nanomet, bán kính hạt hiệu dụng trung bình nhỏ hơn 60 micromet, cường độ nghiền lớn hơn 3 lbs/mm (xấp xỉ 1,36 kg/mm) và diện tích bề mặt BET lớn hơn 80 m²/g, lớn hơn 90 m²/g, lớn hơn 100 m²/g, lớn hơn 125 m²/g hoặc lớn hơn 150 m²/g; và sự phân tán kim loại của chất xúc tác trên chất mang là từ 2% đến 4% hoặc khoảng 3%. Lò phản ứng là

hệ thống lò phản ứng cố định nhiều ống, trong đó mỗi ống phản ứng có đường kính từ 13mm đến 26mm và có chiều dài lớn hơn 6 mét hoặc lớn hơn 10 mét. Hệ thống LFP chuyển hóa các sản phẩm hỗn hợp RWGS và ATR thành các sản phẩm hydrocacbon, trong đó hơn 50% sản phẩm là các hydrocacbon từ C_4 đến C^{24} . Dưới 2% cacbon monoxit trong nguồn cấp của lò phản ứng LFP được chuyển hóa thành cacbon dioxit trong lò phản ứng LFP, và dưới 10% khối lượng hoặc dưới 4% khối lượng phần hydrocacbon của sản phẩm LFP có số cacbon lớn hơn 24. Sự chuyển hóa CO trong lò phản ứng LFP được duy trì trong khoảng từ 30 đến 80% mol CO chuyển hóa cho mỗi lần đi qua, và độ chọn lọc cacbon thành CO_2 được giảm thiểu xuống dưới 4% hoặc dưới 1% lượng CO được chuyển hóa.

29. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1400°F (760°C) bằng cách sử dụng bộ phận gia nhiệt điện bức xạ có mức sử dụng điện ít hơn 0,5 MWh điện/tấn, 0,40 MWh điện/tấn hoặc 0,20 MWh điện/tấn CO_2 trong khí cấp, trong đó nhiệt không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS đoạn nhiệt hoặc đẳng nhiệt chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken. Hình dạng và kích thước hạt của các hạt chất xúc tác được kiểm soát sao cho sự sụt giảm áp suất trong lò phản ứng nhỏ hơn 50 pound trên inch vuông (psi) (345 kPa) và tốt hơn là nhỏ hơn 20 psi (139 kPa). Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Mỗi lần chuyển hóa cacbon dioxit thành cacbon monoxit trong lò phản ứng RWGS là từ 15 đến 90% mol hoặc từ 30 đến 70% mol, và tốc độ không gian khối lượng RWGS là từ 1 đến -50.000 trên giờ và tốt hơn nữa là từ 5.000 đến 30.000 trên giờ. Khí sản phẩm RWGS được làm mát,

nén, và đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu lỏng (“LFP”), cùng với khí tổng hợp tái chế, mà chứa chất xúc tác tạo ra các hydrocacbon từ khí tổng hợp. Các hydrocacbon được tạo ra trong quy trình này, hoặc một phần của chúng, được sử dụng làm nhiên liệu; nhiên liệu có mức giảm phần trăm phát thải khí nhà kính theo vòng đời so với mức phát thải khí nhà kính theo vòng đời trung bình đối với petrodiesel (được tạo ra từ quá trình chưng cất phân đoạn dầu thô trong khoảng từ 200°C đến 350°C ở áp suất khí quyển, tạo ra hỗn hợp các chuỗi cacbon thường chứa từ 9 đến 25 nguyên tử cacbon trên mỗi phân tử) ít nhất 10 phần trăm, ít nhất 20 phần trăm, ít nhất 30 phần trăm, ít nhất 40 phần trăm, ít nhất 50 phần trăm, ít nhất 60 phần trăm, ít nhất 70 phần trăm, ít nhất 80 phần trăm hoặc ít nhất 90 phần trăm.

30. Nước được đưa vào hệ thống điện phân sử dụng điện tái tạo, nơi bình điện phân của hệ thống điện phân hoạt động bằng cách sử dụng điện phân kiềm, điện phân màng hoặc điện phân nhiệt độ cao và điện tái tạo được lấy từ gió, mặt trời, địa nhiệt hoặc hạt nhân như một nguồn năng lượng tái tạo. Cacbon dioxit được thu từ nguồn, nơi nguồn là nhà máy sản xuất công nghiệp mà sản xuất amoniac để làm phân bón, nhà máy xi măng, nhà máy sản xuất etanol chuyển hóa ngô, gạo hoặc lúa mì thành etanol, nhà máy lọc dầu, nhà máy hóa chất, nhà máy điện tạo ra điện, phân hủy kỵ khí, hoặc khí quyển. Hydro và cacbon dioxit được trộn với nhau để tạo thành dòng (nguyên liệu chuyển hóa nước-khí nghịch hoặc nguyên liệu “RWGS”) được gia nhiệt đến nhiệt độ đầu vào lớn hơn 1400°F (760°C) bằng cách sử dụng bộ phận gia nhiệt điện bức xạ có mức sử dụng điện ít hơn 0,5 MWh điện/tấn, 0,40 MWh điện/tấn hoặc 0,20 MWh điện/tấn CO₂ trong khí cấp, trong đó nhiệt không được cung cấp bằng cách đốt trực tiếp khí chứa cacbon, và sau đó được đưa vào lò phản ứng RWGS đoạn nhiệt hoặc đẳng nhiệt chứa chất xúc tác dung dịch rắn niken. Lò phản ứng RWGS chuyển hóa nguyên liệu thành khí sản phẩm RWGS bao gồm cacbon monoxit, hydro, cacbon dioxit chưa phản ứng và nước. Mỗi lần chuyển hóa cacbon dioxit thành cacbon monoxit trong lò phản ứng RWGS là từ 15 đến 75% mol hoặc từ 30 đến 70% mol, và tốc độ không gian khối lượng RWGS là từ 1.000 đến 50.000 trên giờ và tốt hơn nữa là từ 5.000 đến 30.000 trên giờ. Một hoặc nhiều hydrocacbon C₁-C₄ (ví dụ metan), cacbon monoxit và hydro được đưa vào lò reforming tự nhiệt (“ATR”) chứa chất xúc tác dung dịch rắn để cung cấp dòng sản phẩm ATR. Khí sản phẩm RWGS (tinh khiết

hoặc không tinh khiết) được pha trộn với dòng sản phẩm ATR (tinh khiết hoặc không tinh khiết) và được đưa vào hệ thống sản xuất nhiên liệu hoặc hóa chất. Nhiên liệu hoặc hóa chất được sản xuất trong quy trình này, hoặc một phần của chúng, có mức giảm phát thải khí nhà kính theo vòng đời so với mức phát thải khí nhà kính theo vòng đời trung bình đối với các sản phẩm được sản xuất từ dầu mỏ ít nhất 10 phần trăm, ít nhất 20 phần trăm, ít nhất 30 phần trăm, ít nhất 40 phần trăm, ít nhất 50 phần trăm, ít nhất 60 phần trăm, ít nhất 70 phần trăm, ít nhất 80 phần trăm hoặc ít nhất 90 phần trăm.

Ví dụ thực hiện sáng chế

Các hình vẽ từ Fig.1 đến Fig.2 thể hiện quy trình tích hợp để chuyển hóa cacbon dioxit, nước, và điện thành nhiên liệu và hóa chất tái tạo.

Đầu vào cho quy trình là: 1) 1919 tấn/ngày (T/N) cacbon dioxit; 1214 T/N nước sạch; và 3) 721,5 MW điện tái tạo.

Trên Fig.3, nước sạch (dòng 25) được pha trộn với 1497 T/N nước của quy trình (hoặc được tái chế) (dòng 26) từ quy trình. Nguồn cung cấp nước sạch và nước tái chế cho bình điện phân là 2711 T/N trên tổng lượng nước. Bình điện phân kiềm bước 27 hoạt động ở 60 psig (xấp xỉ 413,7 kPa) và 70°F (xấp xỉ 21°C). Sản phẩm điện phân là 303 T/N hydro (dòng 28) và 2408 T/N oxy (dòng 29). Bình điện phân sử dụng 648,1 MW điện cho mức sử dụng năng lượng của bình điện phân là 51,3 MWh/tấn hydro được sản xuất. Hydro (Fig.1 dòng 1, 303 T/N) được trộn với cacbon dioxit (dòng 2) để trở thành nguồn cấp dữ liệu RWGS (dòng 3). Cacbon dioxit (dòng 2) là hỗn hợp của cacbon dioxit mới (dòng 2, 1919 T/N) và cacbon dioxit tái chế (734 T/N). Tỷ lệ mol của H_2 trên CO_2 trong nguồn cấp RWGS là 2,5 và nằm trong phạm vi mong muốn. Nguồn cấp RWGS ban đầu (dòng 3) ở áp suất 60 psig (xấp xỉ 413,7 kPa) và nhiệt độ 66°F (xấp xỉ 19°C). Dòng 3 được gia nhiệt thông qua trao đổi nhiệt gián tiếp trong hai bộ trao đổi nhiệt riêng biệt bước 4 để nâng nhiệt độ lên 984°F (xấp xỉ 529°C) (dòng 5). Lò bức xạ điện được sử dụng để đốt nóng các chất khí đến 1600°F (xấp xỉ 871°C). Lò bức xạ điện sử dụng 30,7 MW điện và có mức sử dụng điện là 0,278 MWh/tấn CO_2 trong dòng sản phẩm hoặc dòng cấp RWGS cuối cùng (dòng 5). Lò phản ứng RWGS (bước 6) là bình có lót vật liệu chịu lửa hoặc một nhóm các lò phản ứng song song. Lò phản ứng RWGS chứa đầy chất xúc tác. Chất xúc tác RWGS được

sử dụng trong ví dụ này là chất xúc tác dung dịch rắn mà chỉ sử dụng các kim loại chuyển tiếp. Áp suất đầu ra của lò phản ứng RWGS thấp hơn 10 psi (xấp xỉ 69 kPa) so với áp suất đầu vào là 55 psig (xấp xỉ 379,2 kPa). Nhiệt độ đầu ra RWGS thấp hơn 152°F (xấp xỉ 66,7°C) so với nhiệt độ đầu vào 1600°F (xấp xỉ 871,1°C). Độ chuyển hóa CO₂ là 70% mol. 92% mol CO₂ đã chuyển hóa được chuyển thành CO (độ chọn lọc 92% thành CO) trong khi 8% CO₂ được chuyển hóa thành metan thông qua phản ứng phụ.

Khí sản phẩm của lò phản ứng RWGS (dòng 7) trong ví dụ này được gia nhiệt lại 1600°F (xấp xỉ 871,1°C) trong bộ gia nhiệt thứ 2 tùy chọn và bộ RWGS (tương ứng bước 9 và bước 10). Bộ gia nhiệt bước 9 này là lò bức xạ được làm nóng bằng điện. Bước 9 tiêu thụ 7,3 MW điện cho mức sử dụng điện là 0,22 MWh/tấn CO₂ trong nguồn cấp. Đối với ví dụ này, khí được gia nhiệt lại sau đó được đưa đến lò phản ứng RWGS thứ hai (bước 10). Lò phản ứng RWGS thứ hai có độ giảm áp suất 10 psi (xấp xỉ 69 kPa) và độ giảm nhiệt độ 108°F (xấp xỉ 42,2°C). Độ chuyển hóa CO₂ là 7% mol.

Đầu ra của lò phản ứng RWGS thứ hai là hỗn hợp khí tổng hợp có thành phần khối lượng xấp xỉ 49% mol H₂, 20% mol CO, 1% mol metan, 8% mol CO₂, 22% mol nước ở nhiệt độ 1492°F (xấp xỉ 811,1°C). Hơi nước này được làm mát đến 1256°F (680°C) thông qua trao đổi nhiệt gián tiếp (bước 11) và được trộn với khí tổng hợp được tạo ra bởi lò reforming tự nhiệt (ATR) để trở thành nguồn cấp kết hợp để làm mát khí tổng hợp và phần nén khí tổng hợp của quy trình.

Fig.2 thể hiện phần ATR của quy trình. ATR có nguồn cấp hydrocacbon ATR (dòng 18) bao gồm các khí thải từ phần LFP của nhà máy với lưu lượng 855 T/N và thành phần mol là 21% hydro, 12% CO, 42% metan, 1% etan, 2% propan, 1% butan, 1% pentan, 1% hexan, và 18% cacbon dioxit. Nguồn cấp oxy hóa ATR (dòng 29) là 335 T/N oxy được tạo ra bởi bình điện phân. Nguồn cấp hydrocacbon ATR được trộn với 255 T/N hơi quá nhiệt ở nhiệt độ 343°F (xấp xỉ 172,8°C). Hơi trong khi chất oxy hóa được trộn với nguồn cấp hydrocacbon ATR trước lò đốt ATR. Dòng này được gia nhiệt thông qua trao đổi nhiệt chéo sản phẩm ATR và dòng này và oxy được đốt cháy tại lò đốt ATR và các sản phẩm cháy đi qua lớp xúc tác ATR và để ATR ở hoặc gần thành phần cân bằng được dự đoán ở nhiệt độ thoát ra là 1832°F (1000°C) (dòng 21). ATR hoạt động với tỷ lệ hơi nước trên cacbon cấp là 0,53 trong đó tỷ lệ là số mol hơi

nước trên số mol cacbon từ bất kỳ nguồn nào trong nguồn cấp (chứa CO₂ và CO). Sự hình thành muối và cacbon được giảm thiểu bằng cách sử dụng chất xúc tác spinel Ni trên Mg với chất hoạt hoá vàng và áp suất vận hành thấp là 58 psig (xấp xỉ 400 kPa). Thành phần mol của dòng sản phẩm ATR (dòng 21) là 46% hydro, 27% CO, 7% cacbon dioxit và 20% nước. Tỷ lệ hydro tổng hợp trên cacbon monoxit là 1,7. Dòng sản phẩm ATR được làm mát thông qua trao đổi chéo đến 1251°F (xấp xỉ 677,2°C).

Dòng sản phẩm từ ATR được pha trộn khí tổng hợp từ hệ thống lò phản ứng RWGS và được đưa đến bộ phận làm mát và nén khí tổng hợp của nhà máy. Khí tổng hợp hỗn hợp được làm mát thông qua nồi hơi. Một phần hơi nước từ hệ thống hơi nước được sử dụng để trộn vào nguồn cấp hydrocacbon ATR. Dòng cũng được làm mát bằng quạt làm mát không khí. Nước được loại bỏ khỏi dòng dưới dạng ngưng tụ khí tổng hợp. Nén ba giai đoạn được sử dụng để nâng áp suất của khí tổng hợp lên 340 psig (xấp xỉ 2344.2 kPa) và nhiệt độ 338°F (170°C). Khí tổng hợp tới LFP với tốc độ 3093 T/N với thành phần mol là xấp xỉ 61% hydro, 28% cacbon monoxit, 10% cacbon dioxit, và 1% nước. Quá trình nén khí tổng hợp cần điện. Mức sử dụng điện của máy nén khí tổng hợp là 34,0 MW.

Fig.2 thể hiện phân LFP của dòng khí tổng hợp cấp cho quy trình 23 (3093 T/N) được pha trộn với dòng tái chế LFP (dòng 13) 19,185 T/N. Thành phần mol của khí tái chế là khoảng 13% hydro, 7% cacbon monoxit, 26% metan, 48% cacbon dioxit, 1% nước, 1% etan, 2% propan, 1% butan, và 1% pentan. Thành phần của khí tái chế được kiểm soát sao cho khí cấp kết hợp có thành phần phù hợp để lý tưởng cho quy trình sản xuất nhiên liệu lỏng sử dụng chất xúc tác LFP được ưu tiên. Nguồn cấp cho lò phản ứng LFP (dòng 14) có thành phần mol gần đúng là 26% hydro, 13% CO, 19% metan, 1% propan, 1% butan, 1% pentan, và 38% cacbon dioxit và 1% nước và lưu lượng khoảng 22.277 T/N. Tỷ lệ H₂/CO của nguồn cấp LFP là 2,0. Thông qua trao đổi nhiệt gián tiếp, nhiệt độ của nguồn cấp LFP được nâng lên 380°F (xấp xỉ 193,3°C) ở áp suất 330 psig (xấp xỉ 2275.3 kPa). Trong một số trường hợp nhất định: các lò phản ứng LFP là 10 lò phản ứng hoạt động song song; các lò phản ứng cao 30 mét tính từ tiếp tuyến đến tiếp tuyến; mỗi lò phản ứng bao gồm vỏ với 5000 ống bên trong; các ống có đường kính ngoài khoảng 19mm.

Phản ứng sản xuất hydrocarbon từ khí tổng hợp là phản ứng tỏa nhiệt. Hơi nước được sử dụng bên ngoài các ống lò phản ứng LFP để kiểm soát nhiệt độ. Do đó, các lò phản ứng LFP tăng hơi nước có thể được sử dụng để tạo ra điện. Hơi nước LFP được sử dụng để tạo ra 8,7 MW điện.

Nhiệt độ hoạt động được ưu tiên của lò phản ứng LFP là 410°F (210°C).

Trong một số trường hợp nhất định: chất xúc tác LFP là chất xúc tác tứ giác có bán kính hạt trung bình là 50 micromet và đường kính lỗ là 9nm và diện tích bề mặt là 140 m²/g; kim loại hoạt động là coban với chất hoạt hóa platin hoặc palladium.

Đường kính hạt chất xúc tác và trọng tải chất xúc tác và vận tốc của nguồn cấp LFP đến các ống của lò phản ứng LFP đều được quản lý sao cho giảm thiểu sự sụt áp qua các ống của lò phản ứng LFP và các lò phản ứng. Trong ví dụ này, độ sụt áp được duy trì ở 20 psig (xấp xỉ 137.9 kPa).

Độ chuyển hóa CO trong các lò phản ứng LFP là 55%. Độ chọn lọc cacbon thành C₅-C₂₄ là 73,5% trong đó độ chọn lọc cacbon được định nghĩa là:

$$\text{Độ chọn lọc cacbon } C_5 - C_{24} = \frac{1}{n_{CO \text{ chuyển hóa}}} \sum_{i=5}^{24} i n_i$$

Trong đó n_{CO} được chuyển hóa là lưu lượng mol của CO đã được chuyển hóa trong lò phản ứng LFP; n_i là lưu lượng mol của hydrocarbon được đánh số cacbon thứ i được tạo ra trong lò phản ứng LFP. Độ chọn lọc cacbon thành cacbon dioxit thấp ở mức 0,38% cho thấy rằng rất ít CO được chuyển hóa trong lò phản ứng LFP được chuyển thành cacbon dioxit.

$$\text{Độ chọn lọc cacbon } CO_2 = \frac{1}{n_{CO \text{ chuyển hóa}}} n_{CO_2}$$

Trong đó n_{CO_2} là lưu lượng mol CO₂ được tạo ra trong lò phản ứng LFP. Điều này rất đáng mong đợi đối với nhiên liệu không cacbon và quy trình sản xuất hóa chất bắt đầu với cacbon dioxit làm nguyên liệu.

Các sản phẩm tiến hành từ đáy của lò phản ứng. Có khả năng các hydrocarbon nặng (C₂₄₊) được tạo ra nên việc thoát ra khỏi lò phản ứng có thể thu hồi các sản phẩm đó. Nếu lò phản ứng LFP được vận hành ở điều kiện thích hợp với chất xúc tác, sẽ có rất ít hoặc không có sản phẩm nặng. Các sản phẩm LFP chính là dòng 16. Sản phẩm

LFP được làm mát tiếp đến 333°F (xấp xỉ 167,2°C) trong bước 17 và trở thành dòng số 24 ra khỏi Fig.2.

Dòng sản phẩm LFP được làm mát, các sản phẩm được ngưng tụ và sau đó các sản phẩm LFP được tách thành ba dòng thông qua các thiết bị phân tách ở bước 17. Nước sản phẩm (dòng 26) được sản xuất từ quy trình LFP được tái chế đến bình điện phân và có thể cần làm sạch hoặc xử lý trước. Các sản phẩm dạng khí nhẹ của lò phản ứng LFP kết thúc ở các dòng 13 và 18 được tái chế thành nguồn cấp của lò phản ứng LFP và ATR. Tùy chọn trước khi dòng này được tái chế, nó có thể được tách bổ sung thành hai dòng thông qua hệ thống tách CO₂. Dòng giàu CO₂ có thể được tái chế trở lại nguồn cấp cho lò phản ứng RWGS. CO, H₂, và các hydrocacbon nhẹ còn lại trong dòng này được tái chế trở lại ATR.

Sản phẩm LFP bao gồm các dòng hydrocacbon C₄-C₂₄ được tách thành hai dòng thành nguyên liệu pha trộn xăng và nhiên liệu diesel. Các sản phẩm cũng có thể được xử lý thêm.

Quy trình ví dụ đã sản xuất 1669 thùng/ngày naphtha/nguyên liệu pha trộn xăng và 3387 thùng/ngày nhiên liệu diesel. Các sản phẩm LFP có thể được tiếp tục phân đoạn và xử lý để tạo ra các hóa chất đặc biệt chứa dung môi, n-parafin, olefin, và các chất khác.

Bảng 1 tóm tắt các đầu vào cho ví dụ. Tấn C/Ngày là số tấn cacbon mỗi ngày trong đầu vào đó. Tấn H/Ngày là số tấn hydro trong đầu vào. Đây là những yếu tố quan trọng đối với việc tính toán sản lượng cacbon và hydro.

Bảng 1: Ví dụ

<u>Đầu vào</u>				
Cửa vào	<u>tấn/ngày</u>	<u>MW</u>	<u>tấn C/ngày</u>	<u>tấn H/ngày</u>
CO ₂	1915		522,3	0
Nước (sạch)	1212		0	134,7
Điện		721,5		

Bảng 2 tóm tắt các đầu ra cho ví dụ.

Bảng 2: Ví dụ

Đầu ra

Cửa ra	<u>thùng/ngày</u>	<u>tấn/ngày</u>	<u>tấn C/ngày</u>	<u>tấn H/ngày</u>
nguyên liệu pha trộn xăng	1669	181	154,4	26,8
nhiên liệu diesel	3387	412	350,9	60,8
Tổng sản phẩm	5056	593	505,3	87,6

Bảng 3 tính toán một số số liệu hữu ích cho quy trình ví dụ.

Bảng 3: Số liệu sản lượng ví dụ

Sản lượng nhiên liệu điện	3,42	MWh/thùng.
Sản lượng cacbon	96,8%	cacbon trong sản phẩm từ nguồn cấp CO ₂

Quy trình ví dụ và tất cả các quy trình theo sáng chế sẽ có sản lượng cacbon lớn hơn 70% và tốt hơn là lớn hơn 85%. Cần phải tích hợp quy trình tổng thể cũng như việc sử dụng chất xúc tác RWGS được bọc lộ và chất xúc tác LFP được bọc lộ để có được sản lượng cacbon cao như vậy.

YÊU CẦU BẢO HỘ

1. Quy trình tích hợp để chuyển hóa dòng cấp chứa cacbon dioxit thành dòng sản phẩm chứa các hydrocacbon, quy trình này bao gồm:

bước điện phân trong đó dòng cấp của bình điện phân bao gồm nước được chuyển hóa thành dòng sản phẩm điện phân chứa hydro và oxy, trong đó ít nhất một phần điện năng được sử dụng trong bước điện phân là từ các nguồn tái tạo hoặc cacbon thấp;

bước chuyển hóa nước-khí nghịch trong đó ít nhất một phần hydro từ dòng sản phẩm điện phân được phản ứng với dòng chứa cacbon dioxit để tạo ra dòng sản phẩm chuyển hóa nước-khí nghịch chứa cacbon monoxit;

bước tổng hợp hydrocacbon trong đó ít nhất một phần hydro từ dòng sản phẩm điện phân được phản ứng với dòng bao gồm ít nhất một phần của dòng sản phẩm chuyển hóa nước-khí nghịch để tạo ra dòng sản phẩm tổng hợp hydrocacbon chứa các hydrocacbon;

bước reforming tự nhiệt trong đó ít nhất một phần oxy được tạo ra từ quá trình điện phân được phản ứng với dòng hoặc các dòng chứa a) các chất phản ứng chưa phản ứng từ bước tổng hợp hydrocacbon và b) các sản phẩm từ bước tổng hợp hydrocacbon không phải là các hydrocacbon có độ dài từ 5 đến 24 nguyên tử cacbon,

trong đó nguyên liệu của lò phản ứng chuyển hóa nước-khí nghịch được gia nhiệt bằng lò bức xạ điện đến ít nhất 1500°F (xấp xỉ 815,6°C) và bình phản ứng là lò phản ứng đoạn nhiệt trong đó nhiệt độ đầu ra nhỏ hơn nhiệt độ đầu vào của lò phản ứng ít nhất 100°F (xấp xỉ 37,8°C).

2. Quy trình theo điểm 1, trong đó áp suất của bước chuyển hóa nước-khí nghịch và bước tổng hợp hydrocacbon được vận hành ở áp suất trong phạm vi 50 psi (xấp xỉ 344,7 kPa) ở mỗi bước.

3. Quy trình theo điểm 1, trong đó nguồn cấp cho lò phản ứng chuyển hóa nước-khí nghịch có thành phần sao cho tỷ lệ mol của hydro trên cacbon dioxit là từ 2,5 đến 3,5.

4. Quy trình theo điểm 1, trong đó nguyên liệu tổng hợp hydrocacbon có tỷ lệ mol hydro trên cacbon monoxit từ 1,90 đến 2,20 và chất xúc tác tổng hợp hydrocacbon bao

gồm coban và độ chọn lọc C_4 - C_{24} lớn hơn 70% và trong đó lượng cacbon monoxit được chuyển hóa thành các sản phẩm nặng hơn C_{24} nhỏ hơn 10%.

5. Quy trình theo điểm 1, trong đó bước reforming tự nhiệt bao gồm hơi nước làm nguồn cấp trong đó tỷ lệ hơi nước trên cacbon là từ 0,40 đến 1,00.

6. Quy trình theo điểm 5, trong đó chất xúc tác ATR là chất xúc tác dung dịch rắn.

7. Quy trình theo điểm 1, trong đó một trong các nguồn cấp cho bước reforming tự nhiệt bao gồm khí tự nhiên.

8. Quy trình theo điểm 1 trong đó điện năng sử dụng trong lò bức xạ nhỏ hơn 0,5 MWh (megawatt-giờ) điện/tấn CO_2 trong khí cấp.

9. Quy trình theo điểm 1, trong đó các phần tử bức xạ có thể được chia thành các vùng để tạo ra mô hình gia nhiệt có kiểm soát của lò phản ứng RWGS.

1/3

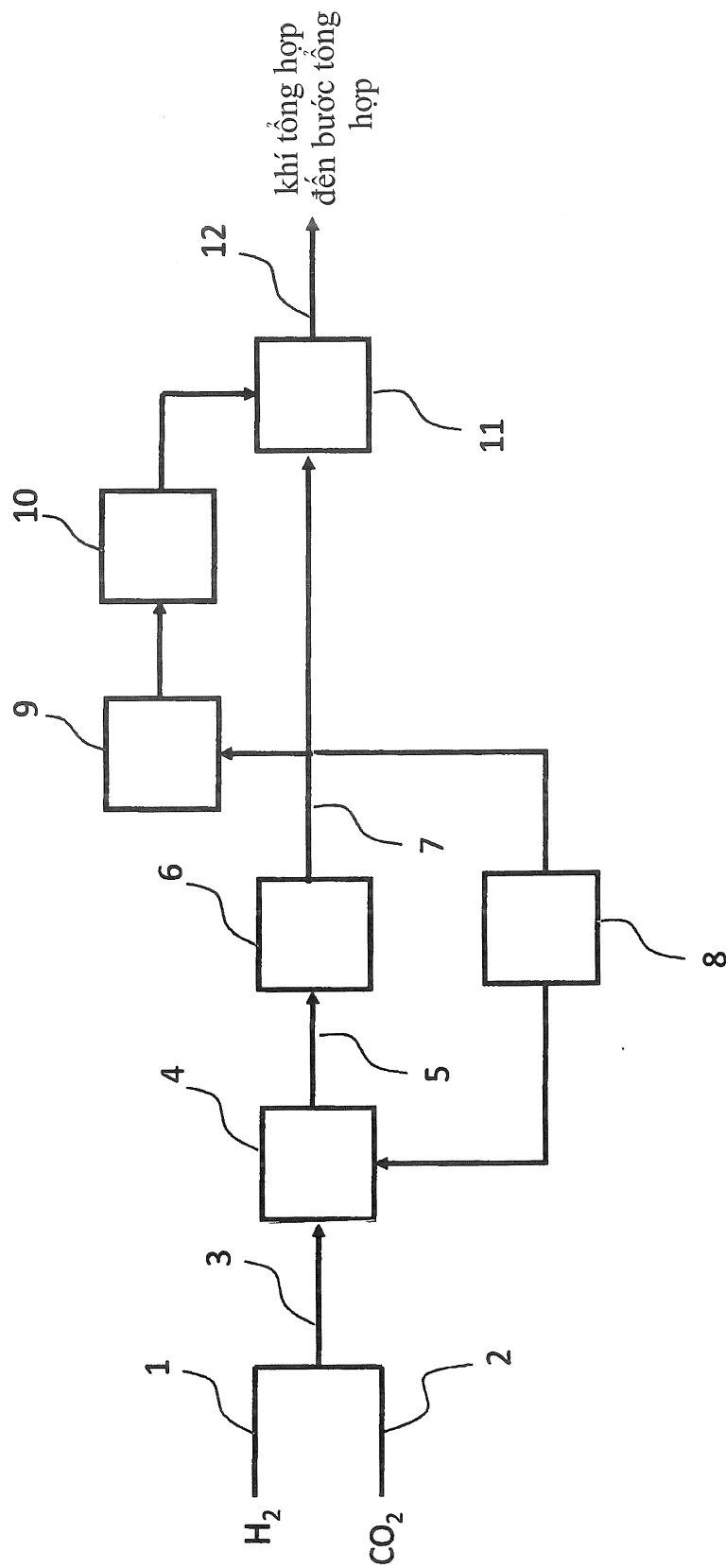


FIG 1

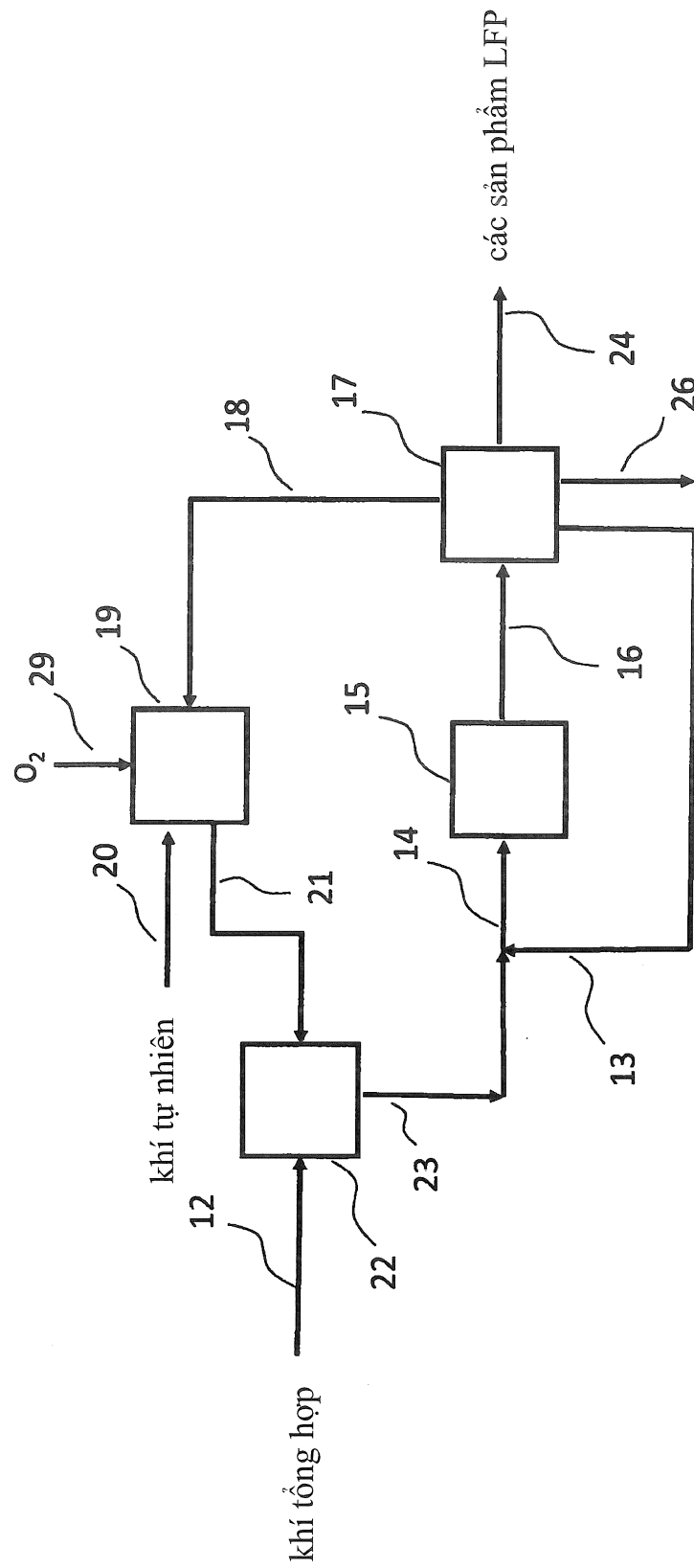


FIG 2

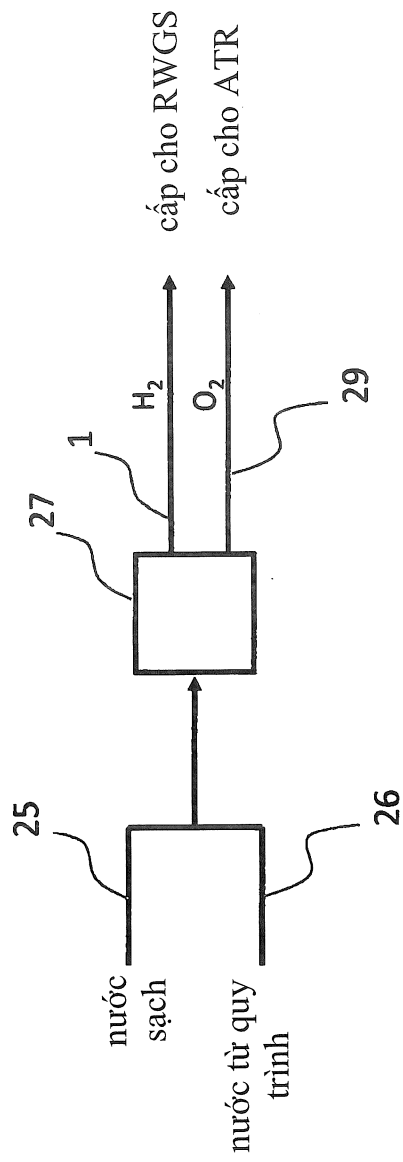


FIG 3