

## CÔNG NGHỆ ỨNG DỤNG HYDROGEN VÀ HỆ THỐNG NĂNG LƯỢNG THÔNG MINH THÂN THIỆN VỚI MÔI TRƯỜNG

Nguyễn Văn Như<sup>1</sup>, Trương Như Tùng<sup>2</sup>, Đinh Văn Thịnh<sup>3</sup>, Nguyễn Việt Anh<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Viện Nghiên cứu Năng lượng và Khí hậu, Trung tâm Nghiên cứu Khoa học và Kỹ thuật Juelich, Đức

<sup>2</sup>Viện Dầu khí Việt Nam

<sup>3</sup>Senior Experten Service (SES), Bonn, Đức

<sup>4</sup>Siemens Energy AG, Đức

Email: [nguyen3vannhu@yahoo.com](mailto:nguyen3vannhu@yahoo.com)

<https://doi.org/10.47800/PVJ.2021.12-05>

### Tóm tắt

Biến đổi khí hậu và sự cạn kiệt nhiên liệu hóa thạch là nguyên nhân chính khiến các quốc gia trên thế giới xây dựng và triển khai chiến lược chuyển dịch năng lượng. Là nhiên liệu đốt sạch (chỉ tạo ra hơi nước), hydrogen sẽ đóng vai trò quan trọng trong quá trình chuyển đổi năng lượng hóa thạch sang sử dụng năng lượng không phát thải CO<sub>2</sub>. Bài báo giới thiệu tiến bộ về công nghệ ứng dụng hydrogen trong giao thông vận tải, công nghiệp và sản xuất điện; các thách thức về công nghệ và an toàn hydrogen, rào cản trong nhận thức của xã hội và đề xuất kiến nghị nhằm phát triển công nghệ hydrogen và hệ thống năng lượng thông minh thân thiện với môi trường.

**Từ khóa:** Ứng dụng hydrogen, pin nhiên liệu, giao thông vận tải, sản xuất điện, hệ thống năng lượng thông minh.

### 1. Giới thiệu

Hydrogen được xem là nguyên tố then chốt trong việc chuyển đổi năng lượng trên thế giới. Hydrogen có thể sử dụng trực tiếp ở dạng tinh khiết hoặc là cơ sở để tổng hợp nhiên liệu hydrogen dạng lỏng, khí như methane tổng hợp hoặc diesel tổng hợp cũng như cho các chất mang năng lượng khác như ammonia (NH<sub>3</sub>). Hiện nay, hydrogen được sử dụng công nghiệp chủ yếu trong các nhà máy lọc dầu và sản xuất ammonia; sản xuất methanol, sản xuất thép cũng như các hóa chất khác [1].

Trong lĩnh vực dân dụng, hydrogen được sử dụng trong các ứng dụng dựa trên pin nhiên liệu gọi là hệ thống kết hợp sưởi và điện (CHP - combined heat and power). Công nghệ màng điện phân proton (PEMFC - proton exchange membrane fuel cells) và pin nhiên liệu oxide rắn (SOFC - solid oxide fuel cells) thường được sử dụng nhất. Cả 2 pin nhiên liệu trong CHP đều có thể được điều khiển bằng nhiệt hoặc điện và có thể được triển khai dưới dạng CHP nhỏ hoặc vi mô do kích thước nhỏ gọn của chúng. Nhiên liệu cho PEMFC là hydrogen nguyên chất trực tiếp. Nhiên liệu

cho SOFC có thể là hydrogen, khí tự nhiên, khí sinh học hoặc hỗn hợp của chúng. Quá trình chuyển hóa thành hydrogen diễn ra bên trong thiết bị SOFC. Nếu nhiệt tạo ra có nhiệt độ đủ lớn, hệ thống này cũng có thể cung cấp khả năng làm mát thông qua quá trình hấp phụ.

Trong lĩnh vực giao thông vận tải, hydrogen đặc biệt quan trọng trong việc giảm thiểu phát thải khí CO<sub>2</sub> và cung cấp lượng năng lượng lớn. Các phương tiện sử dụng pin nhiên liệu (FCEV- fuel cell electric vehicle) như: xe bus, xe chở khách đường dài và xe lửa, các phương tiện tàu thủy là những ứng dụng lớn của hydrogen trong tương lai.

Hydrogen được sử dụng để sản xuất điện vì có thể được chuyển đổi thành điện năng bằng quá trình đốt cháy hoặc nhờ pin nhiên liệu. Quá trình đốt cháy hydrogen trực tiếp có thể diễn ra trong động cơ đốt trong (ví dụ trong các loại ô tô và turbine). Sản xuất điện dựa trên pin nhiên liệu chủ yếu được triển khai dưới dạng hệ thống cung cấp điện liên tục vào lưới điện cũng như cung cấp nguồn điện dự phòng độc lập.

Bài báo giới thiệu các tiến bộ mới nhất trong công nghệ ứng dụng hydrogen thân thiện với môi trường cho các ngành giao thông vận tải, công nghiệp và sản xuất điện; các rào cản về công nghệ, an toàn và chấp



Ngày nhận bài: 29/10/2021. Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 29/10 - 17/11/2021.

Ngày bài báo được duyệt đăng: 29/11/2021.

nhận xã hội, từ đó để xuất phát triển công nghệ hydrogen tại Việt Nam.

## 2. Ứng dụng hydrogen và nhiên liệu dựa trên hydrogen cho giao thông vận tải

Quá trình giảm thiểu khí thải CO<sub>2</sub> trong giao thông vận tải là thách thức lớn nhất trong ứng phó với biến đổi khí hậu. Vận tải tạo ra khoảng 23% lượng khí thải toàn cầu từ quá trình đốt cháy hydrocarbon của năng lượng hóa thạch với các phương tiện giao thông đường bộ, hàng hải, hàng không. Các chất ô nhiễm như khí NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> thải ra từ các phương tiện giao thông rất lớn, ảnh hưởng lớn đến sức khỏe cộng đồng, đòi hỏi phải có các nguồn năng lượng sạch hơn [2].

Để giải quyết vấn đề này, các nỗ lực tập trung vào pin điện (battery), pin nhiên liệu (fuel cell) chạy bằng hydrogen cùng các cải tiến về hiệu suất (phát triển và tối ưu xe hybrid) và chuyển đổi nhiên liệu như sử dụng nhiên liệu sinh học hoặc khí tự nhiên thay vì xăng.

Hình 1 so sánh phát thải khí nhà kính từ các phương tiện vận tải sử dụng pin nhiên liệu và phương tiện vận tải truyền thống sử dụng động cơ đốt trong. Có thể thấy rằng đối với các phương tiện vận tải sử dụng pin nhiên liệu, lượng phát thải khí nhà kính thấp hơn, khoảng 225 g CO<sub>2</sub>/km nếu là hydrogen được sản xuất bằng reforming khí tự nhiên và có thể giảm xuống 125 g CO<sub>2</sub>/km nếu là hydrogen được sản xuất bằng điện phân sử dụng điện gió. Trong khi đó, với các phương tiện sử dụng động cơ đốt trong truyền thống, mỗi km hành trình sẽ phát thải lượng CO<sub>2</sub> cao hơn, ở mức gần 250 g CO<sub>2</sub>/km.

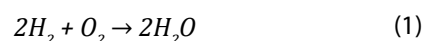
### 2.1. Pin nhiên liệu cho giao thông vận tải

Ưu điểm của pin nhiên liệu là mật độ năng lượng cao phù hợp cho việc vận chuyển quy mô lớn, phạm vi di chuyển xa và thời gian nạp nhiên liệu ngắn. Lợi thế lớn hơn của việc chuyển sang hệ thống giao thông sử dụng nhiên liệu hydrogen là “nguồn lưu trữ điện” từ nguồn năng lượng tái tạo cung cấp điện không ổn định (dao động theo thời gian) dưới dạng hóa chất ổn định. Theo các chuyên gia, hydrogen là chất mang năng lượng duy nhất có tiềm năng thay thế nhiên liệu hóa thạch trong giao thông đường bộ trong dài hạn.

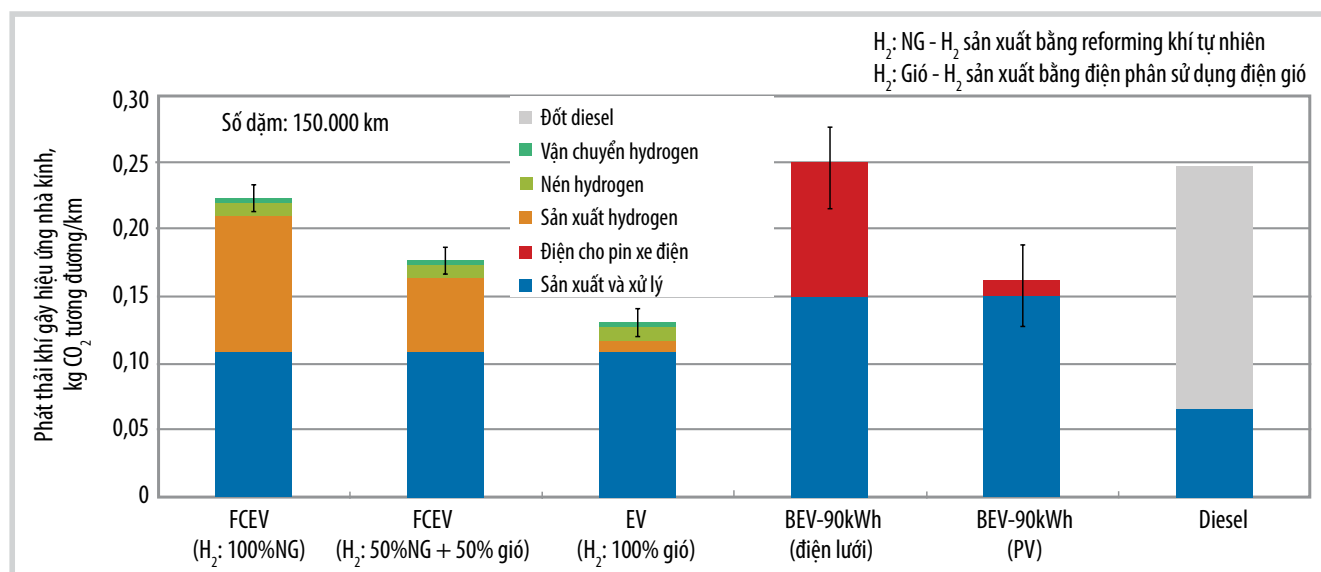
Pin nhiên liệu có cấu tạo đơn giản gồm 3 lớp nằm cạnh nhau: (i) điện cực nhiên liệu (cực dương), (ii) chất điện phân dẫn ion và (iii) điện cực oxygen (cực âm) được thể hiện trong Hình 2.

Về phương diện hóa học, tế bào pin nhiên liệu là phản ứng ngược lại của quá trình điện phân. Pin nhiên liệu hoạt động trên nguyên tắc: nhiên liệu và không khí (oxygen) được ngăn cách vật lý bởi chất điện phân cách điện. Các nửa phản ứng diễn ra tại điện cực ở 2 bên của chất điện phân, việc vận chuyển ion xảy ra qua chất điện phân. Các điện tử được giải phóng đi từ cực dương qua mạch điện bên ngoài về cực âm và tạo ra năng lượng điện có thể sử dụng.

Phương trình (1) biểu diễn phản ứng hóa học tổng thể xảy ra trong pin nhiên liệu sử dụng hydrogen:



Vì 1 tế bào pin riêng lẻ chỉ tạo được điện thế rất thấp nên tùy theo điện thế cần dùng mà nhiều pin được ghép



Hình 1. Phát thải khí nhà kính từ hoạt động giao thông giai đoạn 2020 - 2030 [3].

lại với nhau, tức là chồng lên nhau theo số lượng cần thiết. Hai loại pin nhiên liệu được ứng dụng phổ biến nhất cho giao thông vận tải là pin nhiên liệu màng trao đổi proton (PEMFC) và pin nhiên liệu oxide rắn (SOFC).

Pin nhiên liệu PEMFC với chất điện phân là màng polymer phải được bão hòa với nước để proton đã solvat hóa di chuyển được trong chất điện phân nhưng không cho các điện tử đi qua. Sự kết hợp của nước và acid sulfonic là rất cần thiết cho phép các proton đi vào màng dễ dàng. PEMFC là loại được thương mại hóa nhiều nhất hiện nay do nhiệt độ hoạt động thấp (50 - 100 °C), thời gian khởi động ngắn và dễ sử dụng chất oxy hóa (không khí trong khí quyển). Những đặc điểm này làm cho PEMFC trở nên lý tưởng cho các giải pháp vận chuyển di động. Nhược điểm của PEMFC là yêu cầu cần xúc tác Pt trong vật liệu điện cực và dễ bị hỏng khi tiếp xúc với CO.

Pin nhiên liệu SOFC với chất điện phân oxide rắn thường là zirconia được ổn định bởi yttria (YSZ). Các vật liệu này có độ dẫn ion thích hợp trong khoảng 650 - 1.000 °C. SOFC có đặc tính cực kỳ hấp dẫn đối với việc sử dụng trong giao thông vận tải đó là không yêu cầu kim loại nhóm bạch kim đắt và hiếm trong vật liệu điện cực. Đặc biệt, SOFC có thể sử dụng nhiên liệu không chỉ hydrogen mà cả

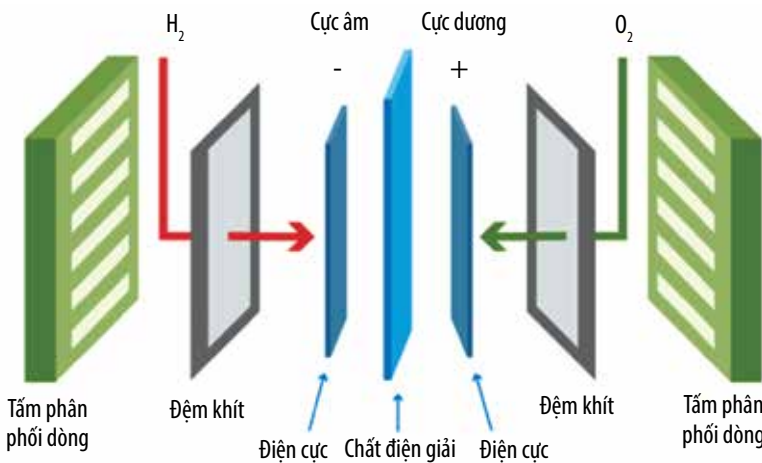
hydrocarbon với hiệu suất cao, chịu được tạp chất trong nhiên liệu. Ngay cả khi sử dụng nhiên liệu hydrocarbon, các SOFC hiện đại nhất có hiệu suất hệ thống là 50% và có thể đạt đến mục tiêu trên 65%, cao hơn đáng kể hiệu suất PEMFC (thường là khoảng 36 - 45%) khi dùng hydrogen [2].

Một ví dụ điển hình về việc sử dụng nhiên liệu khác ngoài hydrogen trong SOFC là Nissan công bố xe chạy pin nhiên liệu oxide rắn đầu tiên trên thế giới bằng bio-ethanol với quãng đường dài 600 km [5].

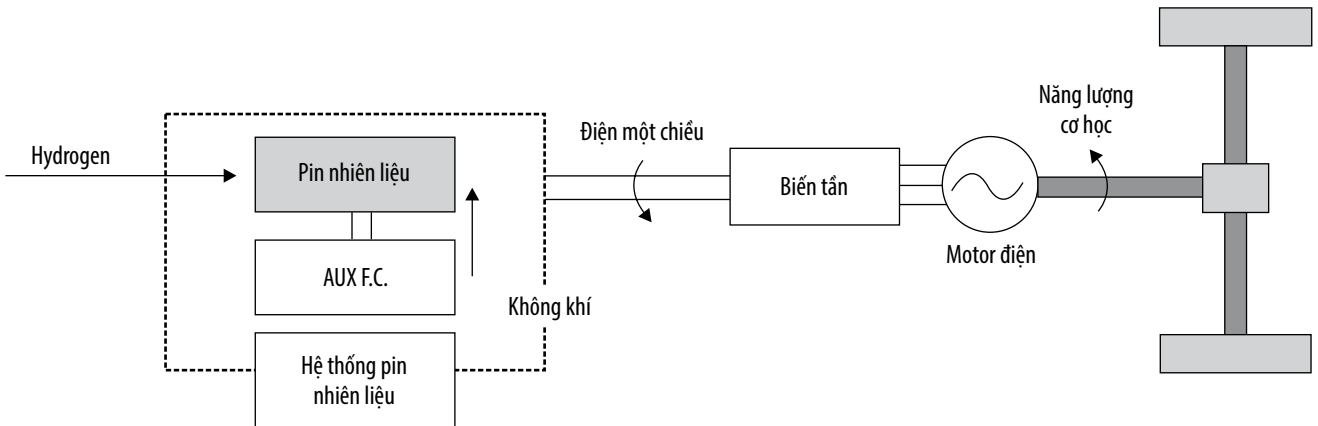
Với hệ thống ethanol sinh học, lượng khí thải CO<sub>2</sub> được trung hòa từ quá trình quang hợp, tạo thành nhiên liệu sinh học với chu trình trung hòa carbon có lượng CO<sub>2</sub> tổng thể gần như không tăng.

Trong lĩnh vực giao thông vận tải, các phương tiện chạy bằng pin nhiên liệu (FCEV) có lợi thế quyết định so với các lựa chọn xe chạy bằng pin điện (BEV - battery electric vehicle), phù hợp cho việc vận chuyển quy mô lớn, khoảng cách lớn, mật độ công suất cao, thời gian tiếp nhiên liệu ngắn và có khối lượng nhỏ hơn.

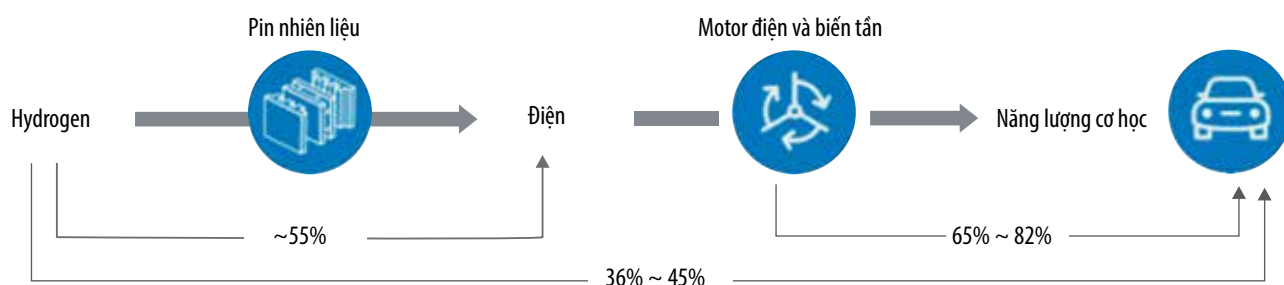
Mục đích của pin nhiên liệu cho giao thông vận tải là cung cấp lực đẩy cho phương tiện một cách trực tiếp hoặc gián tiếp. Các lĩnh vực ứng dụng sau đây đang được phát triển: (1) xe nâng hàng, xe máy hạng nhẹ (light duty vehicle - LDV); (2) xe bus và xe tải; (3) xe lửa và xe điện; (4) phà, tàu chở hàng và thuyền loại nhỏ; (5) máy bay hạng nhẹ có người lái;



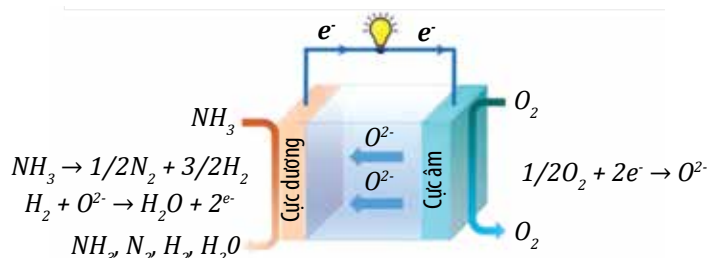
Hình 2. Cấu tạo của pin nhiên liệu [4].



Hình 3. Sơ đồ hệ thống truyền lực đối với ô tô chạy bằng pin nhiên liệu.



Hình 4. Hiệu suất năng lượng của FCEV.



Hình 5. Sơ đồ minh họa về pin nhiên liệu SOFC sử dụng ammonia trực tiếp [6].

(6) máy bay không người lái (unmanned aerial vehicle - UAV); (7) tàu ngầm không người lái dưới đáy biển (unmanned underwater vehicle - UUV).

Sơ đồ hệ thống truyền lực trong FCEV được mô phỏng trong Hình 3. Hiệu suất năng lượng của FCEV được biểu diễn trong Hình 4.

SOFC có thể là công nghệ khả thi với tiến bộ dự kiến về hiệu suất trong vài năm tới. Đối với cực dương cần cải tiến xúc tác cũng như khả năng chịu carbon và lưu huỳnh. Đối với cực âm, việc tính toán thiết kế là hết sức quan trọng khi vật liệu trở nên phức tạp hơn với sự gia tăng số lượng các phần tử và các cấu trúc khác nhau nên cần thay đổi kích thước nano của bề mặt điện cực. Trong chất điện phân, dùng vật liệu mới trong chất điện phân thích hợp ở nhiệt độ thấp hơn sẽ cho phép tăng cường khả năng sử dụng SOFC trong giao thông vận tải [2].

Những tiến bộ mới nhất trong pin nhiên liệu ammonia trực tiếp dựa trên nguyên tắc của pin nhiên liệu SOFC được Jeerh và cộng sự công bố [6]. Các tác giả đã so sánh ưu và nhược điểm của các pin nhiên liệu ammonia trực tiếp khác nhau (Hình 5) dựa trên các nguyên tắc vận hành và đã chứng minh mức độ gần gũi của loại công nghệ này trong việc tích hợp với các ứng dụng tương lai trong lĩnh vực giao thông vận tải. Hiện nay, các thách thức như lựa chọn vật liệu, chuyển đổi NO<sub>x</sub>, mật độ công suất nhỏ và độ bền vẫn đang được khắc phục.

Ứng dụng quan trọng của pin nhiên liệu, đặc biệt là SOFC, là thiết bị nguồn phụ điện APU (auxiliary power unit). Thử nghiệm quy mô đầy đủ sớm nhất được hoàn thành vào năm 2010 là sử dụng APU trên xe tải để cung cấp điện cho các dịch vụ trên xe khi dừng qua đêm. Hệ thống tương tự đã được AVL (Austria) phát triển và lắp đặt trên một chiếc xe tải Volvo với kết quả tương đương [7].

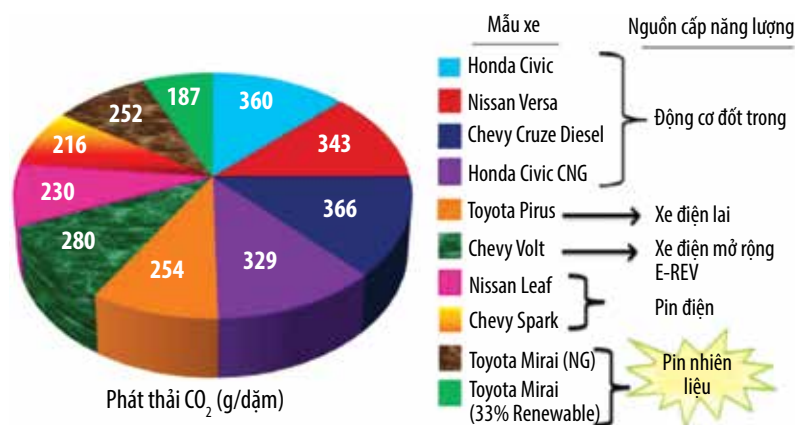
Các hệ thống lớn hơn cũng đã được xây dựng. Các hãng Thyssen Krupp và Sunfire đang phát triển SOFC 50 kW chạy bằng dầu. Việc chế tạo thử nghiệm thiết bị 50 kW bắt đầu vào cuối năm 2015 tại Nhà máy đóng tàu ThyssenKrupp Marine Systems ở Kiel. Vào năm 2016, giai đoạn thử nghiệm đã chứng minh hiệu suất điện tổng thể của hệ thống là 55% và sử dụng nhiên liệu là 73% [8].

Ngoài ứng dụng hydrogen trong FCEV, hướng nghiên cứu ứng dụng hydrogen trong động cơ đốt trong đang được triển khai. KEYOU (Đức) đang nghiên cứu phát triển động cơ đốt trong dùng hydrogen với phương pháp công nghệ phù hợp gồm van phun nhiên liệu dạng khí hiệu quả, tuần hoàn khí thải mà không có thay đổi lớn đối với động cơ đốt trong cơ bản. So với các nhiên liệu thông thường, hydrogen có hàm lượng năng lượng cao nhất. Trong quá trình đốt cháy do KEYOU phát triển, hydrogen cháy với oxygen trong không khí để tạo thành nước mà không có khí thải CO<sub>2</sub> [9].

**2.2. Giao thông đường bộ**

Tổng lượng phát thải CO<sub>2</sub> của các kiểu xe ô tô khác nhau được thể hiện trong Hình 6. Trong đó các kiểu xe ô tô sử dụng động cơ đốt có lượng khí thải CO<sub>2</sub> nhiều hơn so với xe ô tô chạy bằng pin nhiên liệu FC (Toyota) [10].

Pin nhiên liệu PEMFC đã đạt đến trạng thái sẵn sàng về công nghệ khi các doanh nghiệp sản xuất ô tô lớn (gồm Toyota, Honda và Hyundai) đang cho thuê thương mại và bán xe điện dùng pin nhiên liệu (FCEV) có thể chạy được quãng đường tối đa từ 500 - 600 km cho 1 lần nạp nhiên liệu. Các FCEV này khẳng định tốc độ xe, phạm vi lái và độ bền vượt trội so với động cơ đốt trong thông thường (ICE) và trong các trường hợp đều tốt hơn xe điện chạy pin (BEV).



Hình 6. So sánh phát thải khí CO<sub>2</sub> từ các loại xe ô tô khác nhau [10].

Những thách thức đối với PEMFC cần được giải quyết là hiệu suất, độ bền và chi phí ở mật độ dòng điện cao. Những vấn đề này dự kiến sẽ được giải quyết trong thập kỷ tới, trong thời gian đó cơ sở hạ tầng hydrogen cần được triển khai rộng rãi [11].

Chi phí của pin nhiên liệu ô tô đã giảm 70% kể từ năm 2008 nhờ tiến bộ công nghệ và doanh số bán xe điện chạy bằng pin nhiên liệu ngày càng tăng. Nhờ những nỗ lực của Hàn Quốc, Mỹ, Trung Quốc và Nhật Bản, số lượng FCEV trên đường đã tăng hơn 6 lần, từ 7.000 vào năm 2017 lên hơn 43.000 vào giữa năm 2021. Trong năm 2017, các FCEV đều là xe du lịch. Đến nay, 1/5 là xe bus và xe tải cho thấy sự chuyển dịch sang phân khúc đường dài, nơi hydrogen có thể cạnh tranh tốt hơn với xe điện. Tuy nhiên, tổng số FCEV vẫn thấp hơn nhiều so với con số ước tính khoảng 11 triệu xe điện BEV hiện nay.

So với xe BEV thì phương tiện giao thông FCEV hạng nặng (150 - 400 kW) có lợi thế hơn hẳn bởi khả năng mở rộng của pin nhiên liệu về cả công suất và năng lượng bằng cách tăng kích thước và tăng số ngăn xếp pin nhiên liệu (stack) hoặc bình chứa hydrogen với trọng lượng bổ sung nhỏ hơn nhiều so với pin lithium-ion. Việc triển khai thương mại các phương tiện giao thông hạng nặng như xe tải đòi hỏi ít đầu tư cơ sở hạ tầng hơn vì cần ít trạm tiếp nhiên liệu hơn do các tuyến đường dành riêng đã quy định sẵn. Tuy nhiên, các chu kỳ truyền động và điều kiện hoạt động khác nhau của các phương tiện hạng nặng cũng như tuổi thọ dài đòi hỏi cần cải thiện đáng kể về độ bền và tập trung nhiều hơn vào hiệu suất nhiên liệu so với xe hạng nhẹ [12].

Theo nghiên cứu của Samsun và cộng sự [13], tính đến cuối năm 2020 có 34.804 xe chạy pin nhiên liệu thuộc tất cả các loại đã hoạt động trên toàn thế giới, bao gồm ô tô chở khách (đến 9 chỗ ngồi), xe bus, xe thương mại hạng nhẹ đến 3,5 tấn, xe tải hạng trung và xe tải hạng nặng.

Hơn 40.000 FCEV đã có mặt trên toàn cầu vào cuối tháng 6/2021. Nguồn cung tăng trung bình 70% hàng năm trong giai đoạn 2017 - 2020; riêng năm 2020, tăng trưởng chỉ còn 40% do đại dịch Covid-19 [1]. Việc triển khai FCEV toàn cầu tập trung phần lớn vào các loại xe chở khách hạng nhẹ (passenger light duty vehicle - PLDV), chiếm 74% trong số các FCEV đã đăng ký vào năm 2020. Ba mẫu PLDV pin nhiên liệu thương mại

đang bán trên thị trường (Hyundai NEXO, Honda Clarity và Toyota Mirai thế hệ thứ 2). Xe bus mặc dù đã được triển khai sớm hơn và thử nghiệm với số lượng các mẫu pin nhiên liệu lớn hơn nhưng hiện chỉ chiếm 16% trong tổng số FCEV [1]. Gần 95% xe FCEV ở Trung Quốc là xe tải chạy pin nhiên liệu với hơn 3.100 chiếc đã đi vào hoạt động vào năm 2020.

Số lượng các phương tiện nhiều nhất là ở Hàn Quốc, tiếp theo là Mỹ, Trung Quốc và Nhật Bản. Sự phân bố cho thấy 65% xe ở châu Á, tiếp theo là 27% ở Bắc Mỹ và 8% ở châu Âu. Cơ cấu phương tiện chủ yếu là xe du lịch (74,5%), tiếp theo là xe bus (16,2%) và xe tải hạng trung (9,1%). Xe nâng FC đang trong giai đoạn thương mại, đặc biệt là ở Mỹ với 25.000 chiếc [13].

Daimler Truck AG và Volvo hợp tác phát triển sản xuất và thương mại hóa hệ thống pin nhiên liệu cho vận tải đường dài. Cùng với IVECO OMV và Shell, cả 2 doanh nghiệp cũng đã ký thỏa thuận H2Accelerate để hợp tác triển khai xe tải hydrogen quy mô lớn ở châu Âu [1].

Ceres Power và Weichai Power hợp tác phát triển hệ thống xe bus cho Trung Quốc dùng kỹ thuật pin nhiên liệu SOFC và khí nén thiên nhiên (compressed natural gas) [14, 15].

Cơ sở hạ tầng trạm tiếp nhiên liệu hydrogen (hydrogen refueling station - HRS) trên toàn thế giới đang phát triển chậm hơn so với tốc độ phát triển FCEV. Số lượng HRS tăng trung bình hàng năm là gần 20% trong giai đoạn 2017 - 2020. Tỷ lệ số FCEV trên số HRS đang tăng lên, đặc biệt ở các quốc gia có doanh số FCEV cao nhất. Năm 2020, tỷ lệ này đạt 200 FCEV trên 1 HRS ở Hàn Quốc và 150:1 ở Mỹ so với 30:1 ở Nhật Bản. Vào cuối năm 2020, 540 HRS đã đi vào hoạt động gồm cả các cơ sở lắp đặt công cộng và tư nhân. Một phân tích cho thấy HRS chủ yếu tập trung ở châu Á với tổng số 278 trạm, tiếp theo là châu Âu với 190 và 68 ở Bắc Mỹ. Quốc gia có số lượng HRS cao nhất là Nhật Bản (137), Đức có vị trí thứ 2 (90) và Trung Quốc

đúng thứ 3 (85) trong bảng xếp hạng này [13]. Áp suất tiếp nhiên liệu của trạm thay đổi tùy theo thị trường xe được phục vụ. Ở các quốc gia công nghiệp, các trạm phân phối hydrogen có áp suất ở 700 bar để phục vụ cho ô tô chạy bằng pin nhiên liệu. Tại Trung Quốc, các trạm phân phối hydrogen phục vụ xe bus và xe tải có áp suất 350 bar [1].

### 2.3. Giao thông đường sắt

Trong trường hợp việc điện khí hóa trực tiếp các đường dây điện cho hệ thống đường sắt gặp khó khăn hoặc quá tốn kém, việc triển khai các ứng dụng đường sắt dùng công nghệ hydrogen và pin nhiên liệu có thể giúp giảm khí thải CO<sub>2</sub>.

Vào năm 2018, dịch vụ thương mại đầu tiên của tàu chở khách chạy bằng pin nhiên liệu hydrogen (do Alstom phát triển) đã bắt đầu tuyến đường dài 100 km ở Đức. Hai tàu Alstom (Đức) đã chạy tổng cộng được 180.000 km.

Vào năm 2020, tàu chạy bằng pin nhiên liệu hydrogen đã được đưa vào phục vụ hành khách thường xuyên ở Austria và các thử nghiệm đã bắt đầu ở Vương quốc Anh và Hà Lan. Một số quốc gia châu Âu như Đức, Pháp, Italy và Vương quốc Anh đã đặt hàng loại tàu chạy pin nhiên liệu hydrogen. Trong đó, Đức dự kiến đưa 27 tàu chạy bằng hydrogen vào vận hành từ năm 2022 [1].

Các quốc gia khác như Trung Quốc, Hàn Quốc, Nhật Bản, Canada và Mỹ đang quan tâm đến tàu chạy bằng pin nhiên liệu hydrogen. Ngoài loại tàu chở khách, tuyến xe điện chạy bằng hydrogen và đầu máy chuyển mạch cũng đang trong các giai đoạn phát triển.

### 2.4. Giao thông đường thủy

Ngành hàng hải phát thải khoảng 2,5% lượng khí thải carbon toàn cầu tương đương với 940 triệu tấn/năm [16].

Van Biert và cộng sự [17] trình bày tổng quan về các dự án nghiên cứu về ứng dụng pin nhiên liệu cho ngành hàng hải liên quan đến hiệu quả, tác động đến an toàn môi trường và kinh tế.

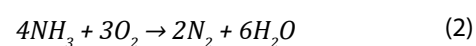
Hoạt động thương mại của phà sử dụng pin nhiên liệu dự kiến sẽ bắt đầu vào năm 2021 tại Mỹ và Na Uy. Các tàu thủy chạy bằng nhiên liệu hydrogen có kế hoạch triển khai trong vài năm tới là tàu chở khách và tàu kéo có công suất pin nhiên liệu từ 600 kW đến 3 MW. Ngoài ra, EU đang có kế hoạch xây dựng phà chạy pin nhiên liệu hydrogen với công suất 23 MW [1].

Bên cạnh ứng dụng pin nhiên liệu hydrogen cho các phương tiện nhỏ, pin nhiên liệu sử dụng ammonia trực

tiếp (Hình 5) có một số ứng dụng cho ngành hàng hải [5, 18]. Tuy FC ammonia có lợi thế về hiệu suất, việc phát triển và triển khai trên quy mô lớn sẽ mất nhiều thời gian hơn so với việc sử dụng ammonia trong động cơ đốt trong ICE [18].

Xu hướng nghiên cứu ứng dụng NH<sub>3</sub> làm nhiên liệu cho động cơ đốt trong cỡ lớn chạy trên biển đang thu hút sự chú ý đặc biệt. Ammonia xanh (được sản xuất từ năng lượng tái tạo) có thể được sử dụng trong động cơ đốt trong để loại bỏ khí thải CO<sub>2</sub> của tàu thủy [19].

Phản ứng tổng thể của quá trình đốt cháy ammonia là [20]:



Hiệu suất của quá trình đốt ammonia nguyên chất còn thấp nhưng việc trộn ammonia với các nhiên liệu khác (như hydrogen) có thể giúp khắc phục đặc tính bất lợi khó cháy và cải thiện hiệu suất [18, 21, 22]. Động cơ đốt nhiên liệu kép (ammonia-hydrogen) sẽ là hướng đi khả thi nhất để ammonia thâm nhập vào lĩnh vực hàng hải.

Ammonia là chất mang năng lượng không chứa carbon nhưng khí thải đốt cháy có thể gây hại cho môi trường nếu chưa được xử lý. Khí thải NO<sub>x</sub> có thể được loại bỏ thông qua các quá trình xử lý khí thải thông thường. Phát thải N<sub>2</sub>O từ quá trình đốt ammonia là mối quan tâm lớn. Các quy định nghiêm ngặt về phát thải N<sub>2</sub>O cần được thiết lập để đảm bảo rằng các động cơ ammonia tương thích với mục tiêu dài hạn là khử carbon trong vận tải biển. Do đó, N<sub>2</sub>O có thể được tích hợp trong các chính sách định giá carbon hoặc hạn chế thông qua các tiêu chuẩn phát thải. Do đặc điểm rủi ro của N<sub>2</sub>O, việc sử dụng có thể không áp dụng được trong tất cả các phân đoạn của lĩnh vực hàng hải, ví dụ như tàu chở khách.

Dự kiến 100 động cơ hàng hải chạy bằng nhiên liệu ammonia sẽ được sản xuất sớm nhất là vào năm 2023 và cung cấp các gói trang bị thêm ammonia cho các tàu hiện có từ năm 2025. Methanol được chứng minh là nhiên liệu cho lĩnh vực hàng hải và tương đối lâu dài hơn so với hydrogen và ammonia. Với khả năng tương thích với các động cơ hàng hải hiện có, methanol có thể là giải pháp ngắn hạn để giảm lượng khí thải vận chuyển nhưng ammonia lại cung cấp tiềm năng khử carbon lớn hơn [1].

### 2.5. Giao thông vận tải hàng không

Theo thống kê của Hội đồng Quốc tế về Giao thông Vận tải sạch (The International Council on Clean Transportation - ICCT), vận chuyển hành khách đã tạo ra

khoảng 85% lượng khí thải CO<sub>2</sub> trong thương mại hàng không. Năm 2019, con số này lên tới 785 triệu tấn (Mt) CO<sub>2</sub>. Từ năm 2013 đến năm 2019, lượng khí thải CO<sub>2</sub> liên quan đến vận tải hành khách tăng 33% [16].

Trong tương lai, nhiều cấu hình điện sẽ xuất hiện nhiều hơn cho máy bay. Các bộ phận phụ trợ của máy bay thông thường được biết đến là nguyên nhân tạo ra ô nhiễm không khí và gây tiếng ồn. Bằng cách sử dụng pin nhiên liệu làm nguồn APU hoạt động trên phương tiện hàng không, ô nhiễm không khí và tiếng ồn được giảm bớt [23].

Không giống như khối nguồn phụ (APU) hiện có, bộ năng lượng pin nhiên liệu oxide rắn có thể hoạt động trong suốt chuyến bay để tiết kiệm tối đa nhiên liệu.

Lợi ích mong đợi của việc ứng dụng hệ thống pin nhiên liệu là: lượng khí thải thấp - giảm đáng kể NO<sub>x</sub> trên mặt đất và trong chuyến bay; hiệu suất cao; tiết kiệm nhiên liệu - giảm tới 75% nhiên liệu trên mặt đất và giảm 30% nhiên liệu trong chuyến bay; giảm tiếng ồn - tiềm năng tuyệt vời để giảm tiếng ồn trên mặt đất.

ATAG cho biết tiềm năng sử dụng pin nhiên liệu hydrogen cho các đường bay lên đến 1.600 km, công nghệ đốt cháy hydrogen cho các chuyến bay ngắn và có khả năng cho các đường bay trung bình. Giải sử công nghệ được phát triển thành công, pin nhiên liệu hydrogen có thể được sử dụng trong 75% chuyến bay thương mại nhưng chỉ chiếm 30% trong nhiên liệu cho ngành hàng không. Về mặt kỹ thuật, quá trình đốt cháy hydrogen có thể được sử dụng cho các chuyến bay dài hơn, có khả năng đạt gần 95% chuyến bay và 55% lượt tiêu thụ nhiên liệu nhưng sẽ cần thiết bị để giảm thiểu phát thải NO<sub>x</sub>. Nhiên liệu hàng không bền vững gồm nhiên liệu dựa trên hydrogen và nhiên liệu sinh học cần thiết để giảm khí CO<sub>2</sub> trong thời gian gần nhất [1].

Airbus đang nghiên cứu phát triển các mẫu máy bay sử dụng hydrogen có sức chứa lên đến 200 hành khách và tầm bay 3.700 km với mục tiêu có 1 máy bay thương mại vào năm 2035. ZeroAvia có kế hoạch đưa ra thị trường 1 máy bay hydrogen thương mại đầu tiên với tầm bay 900 km vào năm 2024. Universal Hydrogen phát triển các giải pháp lưu trữ hydrogen và bộ chuyển đổi cho máy bay thương mại.

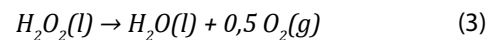
Boeing gần đây đã hợp tác với CSIRO để công bố lộ trình sử dụng hydrogen trong lĩnh vực hàng không, xem xét các cơ hội sử dụng hydrogen cho máy bay và các phương tiện vận tải khác hoạt động tại sân bay (xe bus,

taxi và xe chở hàng). Các thách thức kỹ thuật cần giải quyết gồm: các bể chứa đông lạnh trọng lượng nhẹ và phát triển cơ sở hạ tầng cung cấp hydrogen (có thể là các đường ống dẫn khí hóa lỏng tại chỗ hoặc lân cận) và trạm tiếp nhiên liệu lỏng có công suất lớn [1].

## 2.6. Ứng dụng cho tàu ngầm

Pin nhiên liệu hoạt động được cần phải có oxygen, song lượng oxygen cần thiết nặng gấp 8 lần hydrogen. Nếu chứa oxygen trong tàu ngầm thì tàu có trọng tải quá lớn không điều chỉnh được độ nổi (lúc chìm lúc nổi). Mới đây, Viện Kỹ thuật Quân sự Na Uy (FFI) đã thử nghiệm thành công dùng H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> là nguồn cung cấp oxygen cho tàu ngầm tự lái khi dùng pin nhiên liệu [24].

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> là chất lỏng, có thể đựng trong các túi nhựa dẻo nằm phía ngoài vỏ tàu và chịu được áp suất cao khi độ sâu lớn. Bên trong tàu ngầm có thiết bị phản ứng để tạo oxygen từ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> theo phương trình (3):



Đây là tiến bộ quan trọng về giải pháp lưu trữ oxygen nhẹ mà không phụ thuộc vào độ sâu. Việc cung cấp oxygen nguyên chất làm tăng hiệu quả của pin nhiên liệu. Pin nhiên liệu cần thiết kế nhỏ gọn hơn cho phù hợp tốc độ dòng oxygen nhỏ hơn so với không khí (trong không khí, lượng oxygen chỉ chiếm 20%). Cả 2 yếu tố (pin nhiên liệu nhỏ hơn và tốc độ dòng oxygen nhỏ hơn) đều góp phần làm tăng mật độ tổng năng lượng.

Pin nhiên liệu và hydrogen có tiềm năng lớn thúc đẩy tương lai ngành giao thông vận tải. Châu Âu, Mỹ, Nhật Bản, Trung Quốc... đã nắm bắt xu hướng này và có chính sách phát triển chuỗi cung ứng công nghệ pin nhiên liệu và cơ sở hạ tầng. Do các đặc điểm như tái nạp nhiên liệu nhanh tương tự như xe dùng động cơ đốt trong (ICEV - internal combustion engine vehicle), mật độ năng lượng cao (tức là trọng lượng thấp hơn BEV), FCEV là giải pháp hấp dẫn cho các loại xe tải hạng nặng và xe thương mại. Ước tính tổng chi phí sở hữu (TCO - total cost of ownership) của các FCEV sẽ giảm gần 50% trong 10 năm tới do giá hệ thống pin nhiên liệu giảm, giá sản xuất hydrogen từ năng lượng tái tạo giảm cũng như sự phát triển của cơ sở hạ tầng hydrogen. FCEV chứng minh mức phát thải nhà kính thấp nhất so với BEV và ICEV, đồng thời cho thấy tiềm năng cao nhất để cải thiện bầu khí quyển do tăng cường sử dụng năng lượng tái tạo trong sản xuất hydrogen.

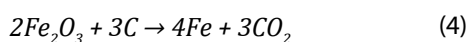
### 3. Những tiến bộ về ứng dụng hydrogen trong công nghiệp

#### 3.1. Công nghệ sản xuất thép “xanh” ở châu Âu

Tại châu Âu, có khoảng 170 triệu tấn thép thô được sản xuất mỗi năm [25]. Với tình trạng công nghệ hiện tại mỗi tấn thép sản xuất phát thải ra môi trường khoảng 1,85 tấn CO<sub>2</sub> [26], công nghiệp sản xuất thép chiếm 4% tổng lượng phát thải CO<sub>2</sub> và chiếm 22% lượng phát thải CO<sub>2</sub> trong công nghiệp ở châu Âu [27].

Thép chủ yếu được sản xuất bằng phương pháp sử dụng lò cao - lò thổi oxygen (BF-BOF - blast furnace - basic oxygen furnace) và lò hồ quang điện (EAF - electric arc furnace), trong đó phương pháp BF-BOF chiếm 60% trong công nghệ sản xuất thép ở châu Âu.

Trong công nghệ BF-BOF truyền thống carbon kết hợp với oxy trong quặng sắt tạo ra sắt kim loại và khí CO<sub>2</sub> theo phản ứng hóa học đơn giản (4) sau:



Như vậy nếu theo công nghệ này cứ một tấn sắt được sản xuất từ quặng sắt thì trung bình có 2,21 tấn CO<sub>2</sub> được phát ra.

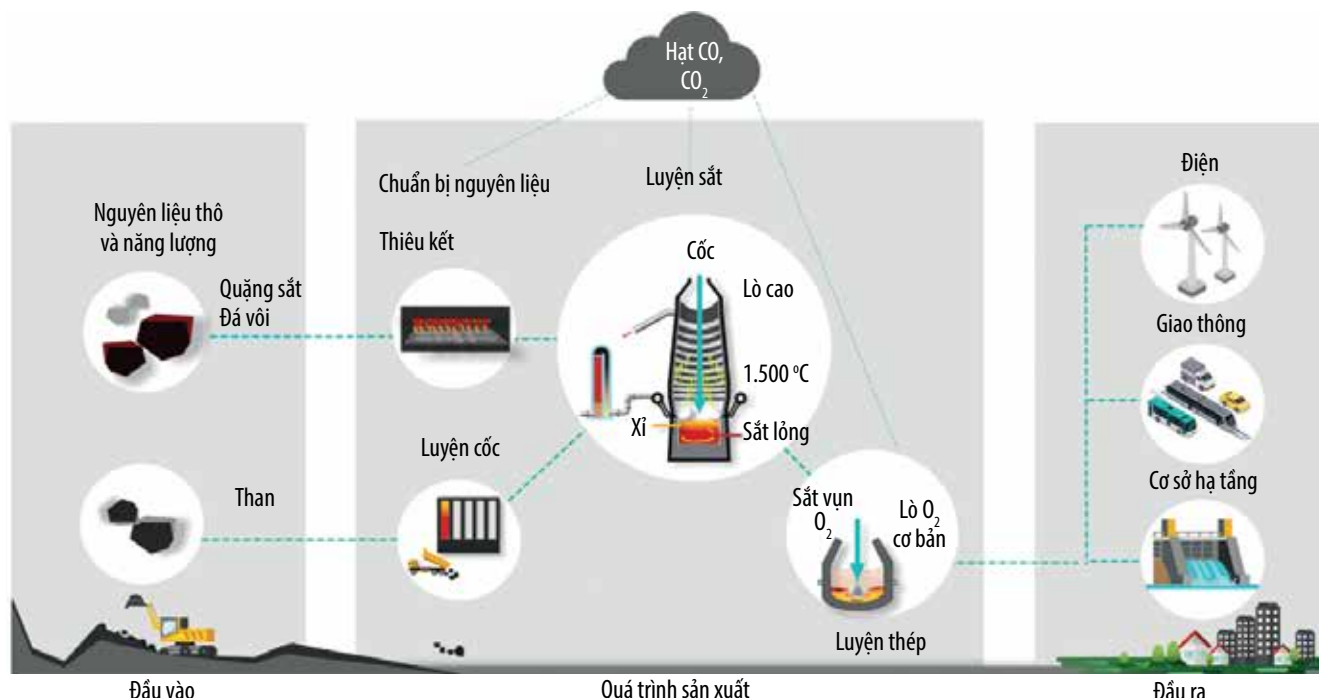
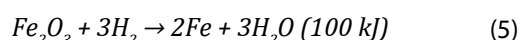
Trong số các giải pháp nhằm giảm phát thải CO<sub>2</sub> trong công nghiệp sản xuất thép, công nghệ thu hồi, lưu giữ carbon (CCS - carbon capture and storage) được áp dụng để thu giữ carbon tại một số điểm nguồn trong quá trình sản xuất (như lò cao, lò luyện cốc) với hiệu quả giảm phát

thải cao nhất chỉ đạt khoảng 80% [26]. So với việc sử dụng CCS, công nghệ khử trực tiếp sử dụng hydrogen xanh và kết hợp với lò hồ quang điện có hiệu quả giảm phát thải CO<sub>2</sub> cao hơn. Ứng dụng hydrogen trong công nghiệp sản xuất thép được tiếp cận theo hướng làm chất khử thay cho carbon. Khi hydrogen được sử dụng làm chất khử, sản phẩm khí của quá trình khử oxide sắt thành sắt là hơi nước thay vì khí CO<sub>2</sub> khi sử dụng than làm chất khử, góp phần giảm phát thải CO<sub>2</sub> trong quá trình sản xuất thép. Hydrogen có thể được ứng dụng trong công nghiệp sản xuất thép theo 2 cách sau:

- Sử dụng hydrogen làm chất khử phụ trong BF-BOF hay còn gọi là H<sub>2</sub>-BF;
- Sử dụng hydrogen làm chất khử duy nhất trong quá trình khử trực tiếp, gọi là H<sub>2</sub>-DRI.

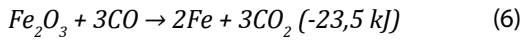
##### 3.1.1. H<sub>2</sub>-BF - giảm phát thải CO<sub>2</sub> trong công nghiệp sản xuất thép

Trong quá trình sản xuất thép theo phương pháp BF-BOF (Hình 7), CO<sub>2</sub> được phát thải từ lò cao BF và lò luyện cốc. Lò luyện cốc có vai trò sản xuất than cốc cung cấp nhiệt và đóng vai trò chất khử trong lò cao. Sử dụng hydrogen làm nhiên liệu và chất khử góp phần giảm phát thải CO<sub>2</sub>. Phản ứng khử oxide sắt thành sắt khi sử dụng tác nhân khử là hydrogen và than được thể hiện trong phản ứng (5) và (6):



Hình 7. Sản xuất thép theo phương pháp BF-BOF [27].





Phản ứng khử với tác nhân khử CO là phản ứng tỏa nhiệt trong khi đó phản ứng với tác nhân khử H<sub>2</sub> là phản ứng thu nhiệt. Bên cạnh ưu điểm phát thải ra H<sub>2</sub>O thay vì CO<sub>2</sub>, sử dụng hydrogen trong quá trình sản xuất thép tồn tại nhược điểm là nhu cầu tiêu thụ năng lượng cao hơn. Vì lý do kỹ thuật, hydrogen không thể thay thế hoàn toàn than do đó công nghệ H<sub>2</sub>-BF thường được xem là bước chuyển tiếp hướng đến công nghệ H<sub>2</sub>-DRI.

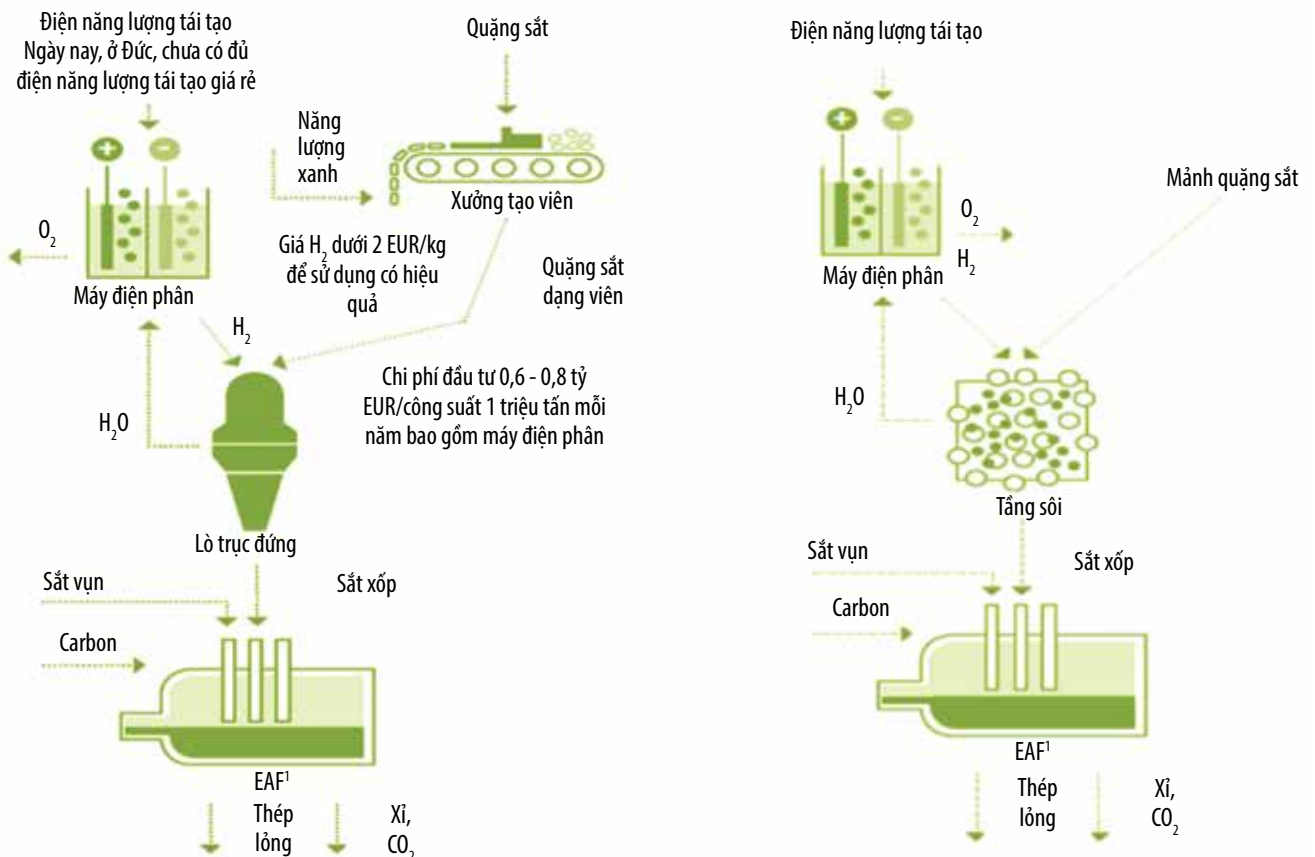
Một số nhà máy tại châu Âu dự kiến sử dụng công nghệ H<sub>2</sub>-BF trong quá trình sản xuất thép [27]. Có doanh nghiệp sử dụng hydrogen được sản xuất từ quá trình điện phân nước sử dụng điện năng lượng tái tạo, có nơi sẽ sử dụng hydrogen xám trong khi chờ hydrogen xanh sẵn có về số lượng và giá phù hợp. Tùy thuộc vào nguồn gốc hydrogen sử dụng mà hiệu quả giảm phát thải CO<sub>2</sub> sẽ khác nhau. Khi sử dụng hydrogen xanh, hiệu quả giảm phát thải CO<sub>2</sub> cao nhất, đạt 21% [27] (tức phát thải khoảng 1,063 tấn CO<sub>2</sub> trên 1 tấn kim loại nóng được sản xuất), trong khi sử dụng hydrogen xám thấp hơn 10 lần (chỉ đạt 2,1%) hiệu quả giảm phát thải CO<sub>2</sub>. Trong trường hợp sử dụng kết hợp công nghệ CCS, tức sản xuất hydrogen lam

thì hiệu quả giảm phát thải CO<sub>2</sub> có thể đạt tương tự như sử dụng hydrogen xanh.

Như vậy điều kiện tối ưu nhất để giảm phát thải CO<sub>2</sub> bằng công nghệ H<sub>2</sub>-BF là sử dụng hydrogen xanh sản xuất từ quá trình điện phân nước sử dụng điện năng lượng tái tạo. Tuy nhiên, hydrogen không thể thay thế toàn bộ than nên thép được sản xuất trong trường hợp này vẫn chưa thể gọi là thép “xanh”.

### 3.1.2. DR-EAF - giảm phát thải CO<sub>2</sub> trong công nghiệp sản xuất thép

Đối với công nghệ DR-EAF, hydrogen được sử dụng làm chất khử khử quặng sắt ở trạng thái rắn (được gọi là khử trực tiếp direct reduced iron - DIR), phương trình phản ứng (5), tạo ra sắt xốp. Sắt xốp sau đó được đưa vào lò hồ quang điện, sử dụng các điện cực tạo ra dòng điện nung chảy sắt xốp và sản xuất thép. Quá trình sản xuất thép này vẫn cần lượng carbon nhất định từ bột than, khí methane sinh học hoặc các nguồn carbon sinh học khác. Vì vậy, nếu quá trình sử dụng toàn bộ hydrogen xanh và điện năng lượng tái tạo thì vẫn phát thải khoảng 53 kg CO<sub>2</sub> trên mỗi tấn thép được sản xuất [28].



Hình 8. Quy trình sản xuất thép theo con đường DR-EAF [28].

Hình 8 thể hiện quá trình sản xuất thép theo phương pháp DR-EAF sử dụng lò trực đứng hoặc lò phản ứng tầng sôi với hydrogen xanh là chất khử duy nhất.

Công nghệ khử trực tiếp sắt không phải là công nghệ mới, đã được thương mại hóa từ cuối những năm 1960, tuy nhiên không phải sử dụng hydrogen tinh khiết. Một số dự án DIR tại châu Âu (đang ở các giai đoạn lập kế hoạch đến vận hành thử nghiệm) chủ yếu sử dụng công nghệ DIR kết hợp với EAF, còn lại sử dụng kết hợp DIR-BF-BOF. Do chưa sẵn sàng về số lượng và giá bán hydrogen xanh mà việc sử dụng hydrogen xanh vẫn còn rất hạn chế [28].

Tùy thuộc vào tác nhân khử được sử dụng và phương án kết hợp DIR mà hiệu quả giảm phát thải CO<sub>2</sub> sẽ khác nhau, trong đó [28]:

- DRI-EAF sử dụng khí tự nhiên sẽ phát thải 0,95 tấn CO<sub>2</sub> trên mỗi tấn thép;
- DIR-EAF sử dụng hydrogen từ điện phân nước bằng điện lưới thì phát thải 0,175 tấn CO<sub>2</sub> trên mỗi tấn thép;
- DIR-EAF sử dụng hydrogen xanh cho hiệu quả giảm phát thải rất cao, lên đến 95%. Với công suất DIR dự kiến ở châu Âu là 20,45 triệu tấn/năm thì cần thiết sử dụng 66 TWh năng lượng điện mỗi năm, chiếm khoảng 28% công suất năng lượng tái tạo ở Đức năm 2019.

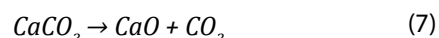
Như vậy, có thể thấy rằng công nghệ DIR-EAF sử dụng hydrogen xanh giảm phát thải CO<sub>2</sub> rất hiệu quả. Tuy nhiên, với tỷ lệ năng lượng tái tạo vẫn còn hạn chế như hiện nay,

sản xuất thép sử dụng DIR bằng hydrogen xanh khó chiếm lĩnh 100% sản lượng thép của châu Âu vào năm 2050.

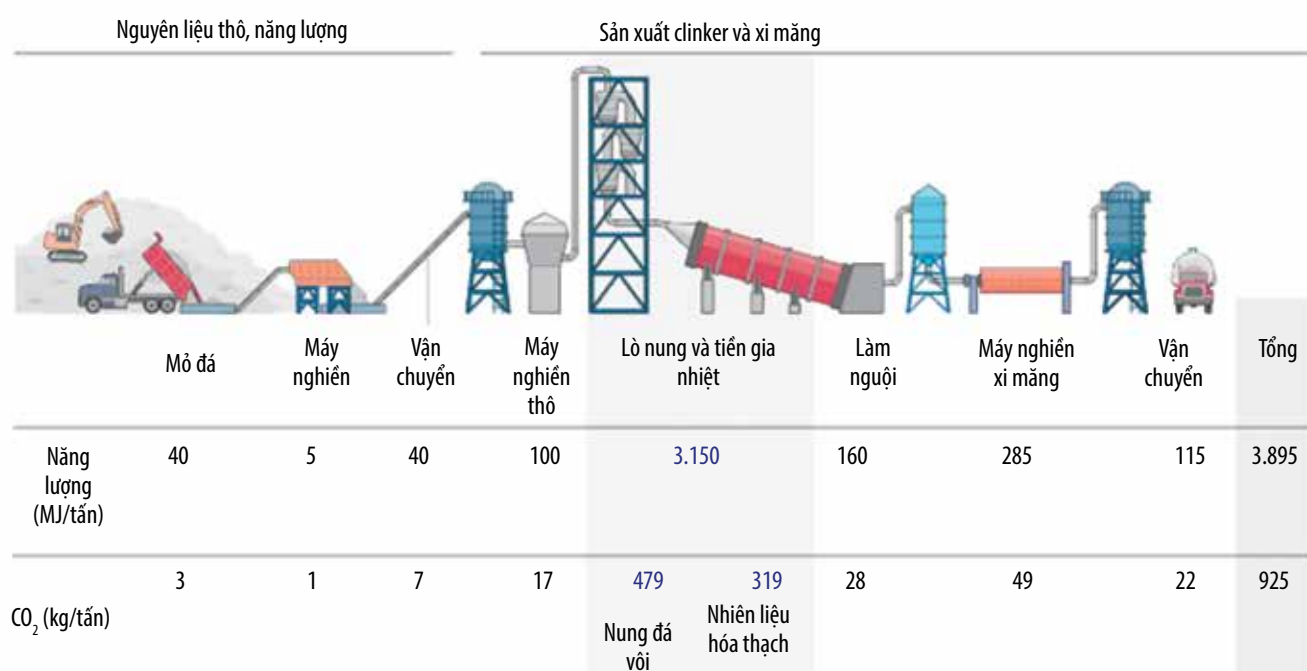
### 3.2. Ứng dụng hydrogen trong công nghiệp sản xuất xi măng

Sản lượng sản xuất xi măng trên thế giới tăng dần qua các năm, từ 3,27 tỷ tấn năm 2010 đến 4,1 tỷ tấn năm 2020 trong đó sản lượng xi măng ở các quốc gia châu Âu là 0,2 tỷ tấn [29]. Sản xuất xi măng phát thải lượng lớn CO<sub>2</sub> trong công nghiệp, chiếm 7%, sau công nghiệp sản xuất thép. Trung bình 1 tấn xi măng được sản xuất sẽ phát thải khoảng 0,9 tấn CO<sub>2</sub> [30]. Như vậy, trong năm 2020, công nghiệp sản xuất xi măng trên toàn thế giới đã phát thải khoảng 3,7 tỷ tấn CO<sub>2</sub>, trong đó 0,18 tỷ tấn CO<sub>2</sub> phát thải từ châu Âu. Công nghiệp sản xuất xi măng có lượng phát thải CO<sub>2</sub> cao nhất tính trên đơn vị doanh thu, lên đến 6,9 kg/USD doanh thu, cao gấp 5 lần so với công nghiệp sản xuất thép [30].

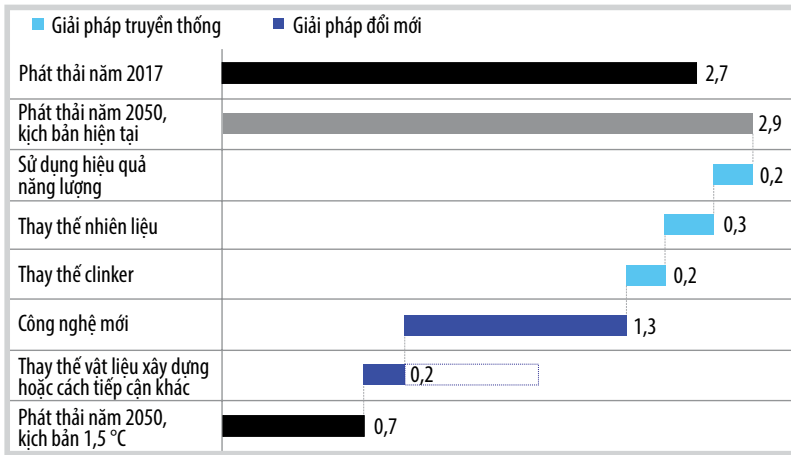
Phát thải CO<sub>2</sub> trong công nghiệp sản xuất xi măng chủ yếu đến từ các công đoạn, quy trình sản xuất xi măng (Hình 9), đặc biệt là quá trình đốt nhiên liệu để cung cấp năng lượng và quá trình nung đá vôi xảy ra theo phản ứng (7) [31]. Tỷ lệ phát thải CO<sub>2</sub> giữa 2 quá trình này là 40:60.



McKinsey dự báo đến năm 2050, ngành công nghiệp sản xuất xi măng có thể giảm 75% lượng khí thải so với năm 2017. Lượng khí thải giảm chủ yếu nhờ các tiến bộ về



Hình 9. Quy trình sản xuất xi măng [30].



Hình 10. Phương pháp giảm phát thải CO<sub>2</sub> trong công nghiệp sản xuất xi măng (GtCO<sub>2</sub>) [30].

công nghệ (như công nghệ thu giữ, sử dụng và lưu trữ carbon), ngoài ra do sử dụng tiết kiệm năng lượng, thay thế clinker (Hình 10) [30].

Một số phương pháp giảm phát thải CO<sub>2</sub> trong công nghiệp sản xuất xi măng như:

- Chuyển đổi sử dụng lò nung xi măng từ lò ướt sang lò khô. Sản xuất clinker trong lò khô hiện đại giảm tiêu thụ năng lượng 85% so với lò ướt, thay thế tất cả các lò ướt bằng các lò khô có công nghệ tiên tiến hiện đại [32], có thể cải thiện 10% phát thải vào năm 2050;
- Thay thế clinker: Clinker là thành phần cơ bản của xi măng, theo Lộ trình của IEA và CSI, hàm lượng clinker trung bình hiện tại là 0,65 cần được giảm xuống 0,6 để có thể đáp ứng Thỏa thuận Paris nhằm duy trì mức tăng nhiệt độ toàn cầu ở mức dưới 2 °C. Các nguyên liệu thay thế clinker như xỉ lò cao, tro bay hoặc đá vôi cho hiệu quả giảm phát thải CO<sub>2</sub> khoảng 10% là thay thế clinker;
- Áp dụng công nghệ CCS: áp dụng các công nghệ tiên tiến đóng vai trò chính trong giảm phát thải CO<sub>2</sub> đối với công nghiệp sản xuất xi măng [34].

Bên cạnh đó, người ta ước tính rằng 10% lượng khí thải CO<sub>2</sub> trong công nghiệp sản xuất xi măng đến từ vận chuyển và năng lượng điện cần thiết để vận hành máy móc thiết bị. Một nhà máy xi măng tiêu chuẩn công suất 3.000 tấn/ngày sẽ tiêu thụ từ 20 - 25 MW điện [33]. Thay thế nhiên liệu truyền thống sử dụng trong sản xuất xi măng bằng hydrogen xanh hoặc điện năng lượng tái tạo góp phần cải thiện 15% phát thải đến năm 2050.

**3.3. Ứng dụng hydrogen trong sản xuất điện**

Theo Cơ quan Năng lượng Quốc tế (International Energy Agency - IEA), điện là nguồn phát thải CO<sub>2</sub> lớn thứ 3 trên thế giới. Khoảng 64,5% điện năng sản xuất thông qua việc đốt nhiên liệu hóa thạch. Phát thải CO<sub>2</sub> trong sản xuất điện đến từ quá trình đốt than hoặc khí tự nhiên để vận hành các nồi hơi (cung cấp hơi cho các turbine hơi) hay các turbine khí. Bên cạnh phát thải CO<sub>2</sub>, quá trình sản xuất điện còn phát thải các khí acid như SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> gây tác động xấu đến chất lượng không khí và ảnh hưởng đến đời sống con người.

Hydrogen có thể góp phần giảm phát thải CO<sub>2</sub> trong lĩnh vực năng lượng bằng cách (1) hoạt động như một hệ thống lưu trữ năng lượng với máy điện phân và pin nhiên liệu; (2) thay thế trực tiếp nhiên liệu hóa thạch quá trình sản xuất điện. Hydrogen và nhiên liệu có nguồn gốc từ nó như NH<sub>3</sub> có thể thay thế trực tiếp khí tự nhiên trong các nhà máy nhiệt điện khí hay sử dụng NH<sub>3</sub> thay thế cho than trong các nhà máy nhiệt điện than. Việc sử dụng hydrogen thay cho nhiên liệu hóa thạch không chỉ góp phần giảm phát thải CO<sub>2</sub> mà còn loại bỏ hoàn toàn các tạp chất khác trong khói thải của nhà máy điện như SO<sub>x</sub>, hydrocarbon dễ bay hơi, thủy ngân... Tuy nhiên, cần lưu ý đến vấn đề về NO<sub>x</sub> trong khí thải khi sử dụng NH<sub>3</sub> để thay thế nhiên liệu hóa thạch. Trong trường hợp này, thiết bị cần phải sửa đổi để hạn chế tạo ra NO<sub>x</sub> trong quá trình đốt cũng như cần loại bỏ ra khỏi sản phẩm cháy thông qua quá trình xử lý bằng xúc tác.

Các hãng cung cấp turbine hàng đầu thế giới như Siemens hay GE cũng có các động thái trong việc sử dụng turbine hydrogen với lộ trình hướng tới chạy turbine 100% hydrogen như turbine 9F.05 của hãng GE đã được sử dụng thành công kết hợp vận hành hỗn hợp nguyên liệu khí tự nhiên và hydrogen tại EnergyAustralia. Hiện nay, có một số dự án ứng dụng hydrogen trong sản xuất điện đang được xây dựng, có thể kể đến như Ballard Power Systems và đối tác là Hydrogen de France đang xây dựng nhà máy điện hydrogen công suất đa Megawatt CEOG tại Guiana, Pháp [35]; Nhà cung cấp điện eRex xây dựng nhà máy điện thương mại chạy bằng hydrogen đầu tiên đặt tại Yamanashi, Nhật Bản, với công suất 360 kW dự kiến đi vào hoạt động vào tháng 3/2022 [36].

**4. Những thách thức đối với hydrogen xanh**

Biến đổi khí hậu đang là vấn đề toàn cầu, là thách thức đối với các chính phủ và các ngành công nghiệp. Nhằm đáp ứng

các cam kết chống biến đổi khí hậu, các khu vực/chính phủ đã thúc đẩy các ngành công nghiệp phải cắt giảm phát thải khí gây hiệu ứng nhà kính (CO<sub>2</sub>). Chính vì vậy, hydrogen xanh trở thành nguồn năng lượng quan trọng trên thế giới và là yếu tố trung tâm cùng với thu giữ CO<sub>2</sub> (carbon capture) trong các kịch bản để duy trì nhiệt độ trái đất tăng không quá 2 °C đến năm 2050.

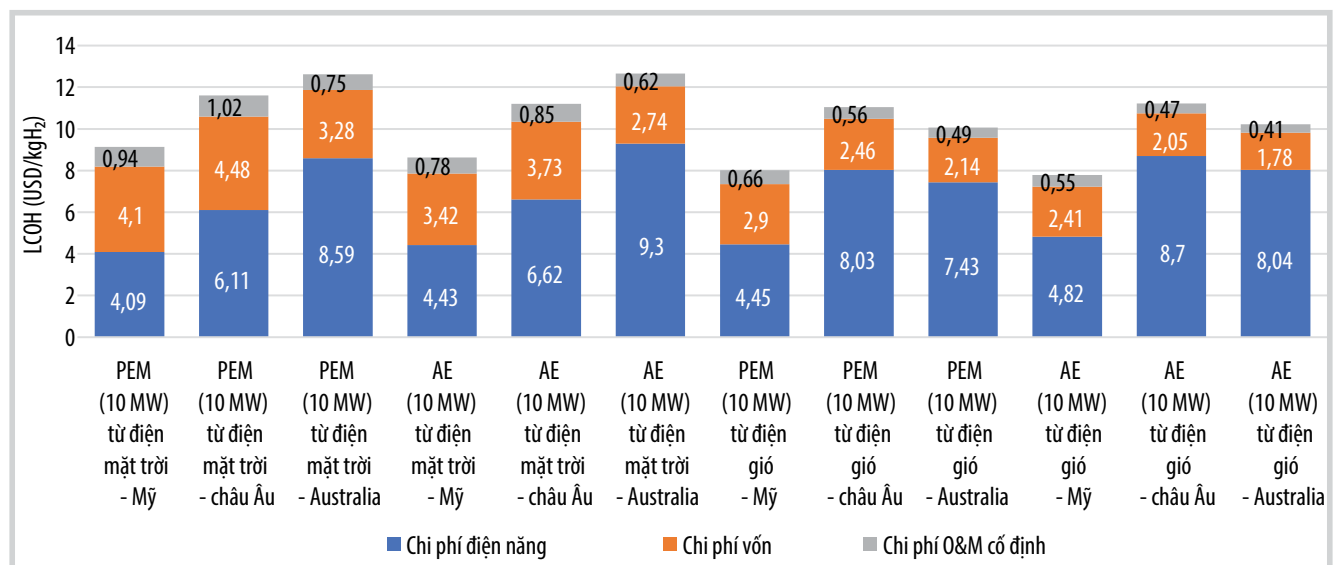
Mặc dù đóng vai trò quan trọng trong nền kinh tế khử carbon, việc sản xuất, sử dụng và thương mại hóa hydrogen xanh vẫn đang đối mặt với các thách thức kinh tế, kỹ thuật về chi phí, cơ sở hạ tầng, an toàn công nghệ và thách thức xã hội về chấp nhận công nghệ hydrogen xanh.

**4.1. Thách thức về chi phí và cơ sở hạ tầng**

Chi phí sản xuất hydrogen xanh có thể được định lượng bằng chi phí bình quân hóa (LCOH - leverlised cost of hydrogen), gồm các chi phí: điện, đầu tư và các chi phí vận hành cố định. Trong đó, chi phí điện chiếm tỷ trọng cao nhất, chiếm khoảng 50 - 55% [37]. Giá điện năng lượng tái tạo sẽ khác nhau tùy vào từng khu vực địa lý và phụ thuộc vào tiềm năng năng lượng tái tạo của khu vực đó. Như vậy, các quốc gia có tiềm năng về năng lượng tái tạo sẽ có lợi thế về mặt chi phí trong sản xuất hydrogen xanh, như Australia, Trung Quốc, Chile, Đức, Morocco và Vương quốc Anh. Hình 11 thể hiện giá LCOH hydrogen xanh được ước tính trong điều kiện công nghệ và hệ thống điện năng lượng tái tạo năm 2020 tại châu Âu, Mỹ và Australia đối với quy mô công suất 10 MW cho phương pháp điện phân màng proton, điện phân kiềm sử dụng điện gió và điện mặt trời.

Có thể thấy rằng LCOH thấp nhất tại Mỹ, dao động trong khoảng 7,78 - 9,13 USD/kg, trong khi đó tại châu Âu và Australia lần lượt là 11,05 - 11,61 USD/kg và 10,06 - 12,66 USD/kg. Các phương pháp sản xuất hydrogen truyền thống từ nguyên liệu hóa thạch (gọi là hydrogen xám) thì giá hydrogen LCOH khoảng 1 - 2 USD/kg [39] và dự báo mức giá này sẽ không thay đổi ít nhất đến năm 2030. Đối với các phương pháp sản xuất truyền thống, giá hydrogen phụ thuộc vào giá nguyên liệu theo từng khu vực và thời điểm. Đối với phương pháp SMR, giá hydrogen sẽ dao động phụ thuộc vào giá khí tự nhiên, ước tính tiêu tốn khoảng 5 tấn khí tự nhiên cho 1 tấn sản phẩm hydrogen. Như vậy, giá hydrogen xanh đang cao hơn ít nhất gấp 4 lần so với hydrogen xám. Sử dụng điện phân nước thì chi phí điện chiếm phần lớn chi phí sản xuất hydrogen xanh, do đó chi phí sản xuất hydrogen xanh có thể giảm đáng kể nếu nguồn năng lượng điện tái tạo sẵn sàng về giá cả và số lượng. Một nghiên cứu đã sử dụng phương pháp Monte Carlo dự đoán giá hydrogen xanh và cho rằng giá LCOH hydrogen xanh sẽ giảm trong 10 năm tới. Vào năm 2030, giá hydrogen được sản xuất bằng phương pháp SMR là thấp nhất, tiếp đến là SMR kết hợp với thu hồi, lưu trữ carbon, và phương pháp khí hóa than. Hydrogen sản xuất bằng các phương pháp này có giá dưới 3 USD/kg. Trong khi đó, giá hydrogen sản xuất bằng phương pháp điện phân dao động trong khoảng 4 - 8 USD/kg tùy vào khu vực.

Ở thời điểm hiện tại, quy mô điện phân sản xuất hydrogen xanh còn rất nhỏ, công suất lớn nhất chỉ đạt 10 MW (Nhà máy điện phân đặt tại Fukushima), tương đương với sản lượng 900 tấn hydrogen/năm. Trong khi



Hình 11. Giá hydrogen xanh LCOH tại châu Âu, Mỹ và Australia trong điều kiện công nghệ và hệ thống điện năng lượng tái tạo năm 2020 [38].

đó, hydrogen sản xuất bằng phương pháp truyền thống như reforming hơi nước khí tự nhiên đã hình thành trong thời gian dài, công nghệ trưởng thành và quy mô công suất lớn, như xưởng sản xuất hydro của Nhà máy Lọc dầu Nghi Sơn có công suất khoảng 145 nghìn tấn/năm. Để hydrogen có thể trở thành yếu tố trung tâm trong nền kinh tế khử carbon, quy mô sản xuất hydrogen xanh phải tăng mạnh trong vòng 30 năm tới. Bên cạnh tăng cường phát triển năng lượng tái tạo, tăng quy mô điện phân và cải tiến công nghệ điện phân cũng có tác động đáng kể đến chi phí hydrogen. Xét về mặt quy mô nhà máy điện phân, tăng quy mô nhà máy từ 1 MW lên 20 MW có thể giảm chi phí hơn 1/3 [40]. Về mặt công nghệ, tăng số lượng ngăn xếp cùng với quy trình tự động trong các cơ sở sản xuất quy mô GW có thể giảm chi phí sản xuất hydrogen [40]. Trước năm 2030, xuất hiện các dự án quy mô lớn như: Nhà máy điện phân tại Saudi Aramco công suất 4 GW (tương đương 238 nghìn tấn/năm) [41] hay Dự án AREH (Tây Australia) với công suất 23 GW (tương đương 1.752 nghìn tấn/năm) [42]. Động lực chính để tăng trưởng hydrogen xanh là giảm chi phí và tăng hiệu quả điện phân. Bên cạnh các chính sách hỗ trợ của các chính phủ, để giá LCOH hydrogen xanh có thể giảm xuống 2 USD/kg thì giá điện năng lượng tái tạo phải đạt mức 0,03 USD/kWh.

Bên cạnh vấn đề chi phí, mở rộng quy mô thị trường hydrogen cũng gặp phải rào cản về cơ sở hạ tầng, đặc biệt là cơ sở hạ tầng liên quan đến vận chuyển, lưu trữ và phân phối. Để có thể đáp ứng nhu cầu ngày càng tăng của hydrogen xanh, đòi hỏi đầu tư và xây dựng mạng lưới truyền tải, phân phối và lưu trữ điện năng cũng như hệ thống điện phân, hệ thống đường ống hydro và hệ thống tiếp nhiên liệu hydro. Theo Cơ quan Năng lượng Quốc tế, đến năm 2030, sản xuất hydro xanh đạt 88 triệu tấn mỗi năm, có thể tiêu tốn 2,4 nghìn tỷ USD và 1.238 GW điện năng lượng tái tạo.

Một yếu tố khác góp phần thúc đẩy sự phát triển hydrogen xanh là việc đánh thuế carbon. Bloomberg NEF nhận định, mức thuế carbon cần được áp dụng đối với ngành thép (50 USD/tấn CO<sub>2</sub>), xi măng (78 USD/tấn CO<sub>2</sub>), hóa chất (78 USD/tấn CO<sub>2</sub>) [43]. Việc đánh thuế carbon sẽ giúp hydrogen xanh cạnh tranh được với các nhiên liệu đầu vào của các ngành công nghiệp.

**4.2. Thách thức về an toàn công nghệ hydrogen**

Bảng 1 trình bày các thông số an toàn cơ bản của hydrogen so với các chất đốt khác như methanol, methane, propane và xăng.

Theo Bảng 1, so với các nhiên liệu khác, hydrogen dễ cháy trong phạm vi nồng độ rất rộng (giới hạn 4% - 77 vol.%). Khi bị đốt cháy trong không khí, hydrogen phát ra ngọn lửa khó nhìn thấy dưới ánh sáng ban ngày vì có bức xạ nhiệt thấp và thành phần tia cực tím cao. Khi hình thành một hỗn hợp hydrogen/oxygen 2:1 và khi nhiệt độ đến khoảng 600 °C, phản ứng cháy có thể dẫn đến sự lan truyền bùng nổ của hỗn hợp khí (gọi là khí nổ) do thể tích hơi nước tạo ra tăng cao hơn nhiều so với hỗn hợp hydrogen/oxygen ban đầu. Tương tự, hydrogen có thể dẫn đến phản ứng tỏa nhiệt bùng nổ trong hỗn hợp khí có chứa hydrogen và khí chlor hoặc fluor với sản phẩm hydroclorid hoặc hydroflorid.

Việc xử lý hydrogen nói chung đòi hỏi sự cẩn thận và đặc biệt tuân thủ các quy định an toàn, tối thiểu sau:

- Tiêu chuẩn an toàn cho sản xuất, lưu trữ, phân phối và sử dụng hydrogen vì hydrogen cũng như các chất khí đốt khác như: khí tự nhiên, khí hóa lỏng... nên các tiêu chuẩn, codes cho khí đốt, cũng được áp dụng (ISO, IEC, ATEX...), thêm vào đó là các tiêu chuẩn đặc biệt riêng tại các quốc gia và riêng cho hydrogen (Bảng 2) [45].

*Bảng 1. Các thông số an toàn cơ bản của hydrogen so với các chất đốt [44]*

Thông số an toàn	Đơn vị	Hydrogen (H <sub>2</sub> )	Methanol (CH <sub>3</sub> OH)	Methane (CH <sub>4</sub> )	Propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	Xăng (C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> )
Giới hạn nổ dưới *	Vol.%	4,0	6,0	4,4	1,7	<b>1,1</b>
Giới hạn nổ trên *	Vol.%	77,0	50 (ở 100°C)	17,0	10,8	<b>6,7</b>
Thành phần của chất cháy trong hỗn hợp cháy *	Mol.%	29,5	(12,2)	9,5	4,0	<b>(1,9)</b>
Năng lượng đánh lửa tối thiểu *	mJ	0,017	0,14	0,29	0,24	<b>0,24</b>
Nhiệt độ tự cháy * theo tiêu chuẩn DIN 51794	°C	560	440	595	470	<b>220</b>
Vận tốc cháy tối đa (dạng dòng tầng)	cm/s	360 (ở 40 Vol. %)	43	37	47	<b>30</b>
Nhiệt độ ngọn lửa	°C	2.050	1.870	1.950	1.925	<b>2.030</b>
<b>Nhiệt trị riêng</b>	<b>MJ/kg</b>	<b>120</b>	<b>19,95</b>	<b>50</b>	<b>46,2</b>	<b>42 - 44</b>

(\*) Nguồn: Chemsafe, Dechema e.V.

Khi xây dựng các quy định và tiêu chuẩn cho hydrogen, Việt Nam cần lưu ý điều kiện đặc thù như: khí hậu nóng ẩm, không khí biển ăn mòn...

- Để tránh phản ứng khí nổ, khi làm việc với hydrogen, nên lấy mẫu hỗn hợp khí oxygen/hydrogen thường xuyên;

- Do nhẹ hơn không khí khoảng 14 lần, hydrogen bốc hơi nhanh chóng trong không gian mở. Do là khí rất nhẹ và là phân tử rất nhỏ, hydrogen có khả năng khuếch tán cao, có thể khuếch tán vào môi trường khác, đi qua nhiều vật liệu xốp hoặc thậm chí kim loại. Do độ khuếch tán cao của hydrogen, cần phải sử dụng các vật liệu đặc biệt đối với các bình chứa (như thép hoặc lớp phủ austenit có các lớp phủ cản khuếch tán). Các vật liệu composite hiện đại có thể bảo vệ chống lại sự khuếch tán hydrogen với vật liệu phủ mặt thích hợp [46];

- Công nghệ hóa lỏng giúp dễ dàng lưu trữ, vận chuyển hydrogen. Bình chứa áp lực được sử dụng phổ biến nhất có độ an toàn cao và được lắp van giảm áp, tránh các nguồn bắt lửa. Do nhẹ hơn không khí nên hydro được lưu trữ ngoài trời. Nếu phải lưu trữ trong không gian kín, cần lắp đặt hệ thống thông gió tốt với các thiết bị cảnh báo rò rỉ khí [46];

- Hydrogen khi được trộn vào khí đốt tự nhiên như là khí đốt hỗ trợ, thì các đặc tính an toàn (giới hạn cháy nổ, nồng độ oxygen giới hạn, áp suất nổ tối đa, chỉ số tăng áp theo thời gian và trị số khe tối thiểu để cản lửa cháy ngược) của hỗn hợp khí không bị ảnh hưởng đáng kể khi lượng bổ sung hydrogen đến nồng độ 10% thể tích [47];

- Để đạt các yêu cầu về an toàn và được cấp phép xây lắp, vận hành nhà máy sản xuất, lưu trữ, phân phối hay vận chuyển hydrogen, cần thực hiện các bước phân tích và xác định các biện pháp an toàn (như sử dụng phương pháp HAZOP, LOPA, hay các phương trình phần mềm HyRAM) [45];

- Thường xuyên cập nhật thông tin mới nhất về an

toàn công nghệ hydrogen từ: International Conference on Hydrogen Safety (Hysafe), Center for Hydrogen Safety Conference, International Conference on Hydrogen Safety and Security. Các sự cố trong ngành công nghiệp hydrogen cần được nghiên cứu để rút kinh nghiệm như: U.S. Center for Hydrogen [48], European Process Safety Centre (EPSC) [49], International Association for Hydrogen Safety, HySafe...

### 4.3. Thách thức về chấp nhận xã hội đối với công nghệ hydrogen

Hydrogen xanh là năng lượng sạch của tương lai. Qua các cuộc thảo luận rộng rãi ở Đức về năng lượng tái tạo từ turbine gió cho thấy, sự chấp nhận hydrogen xanh rộng rãi và vững chắc của xã hội rất cần thiết để đưa 1 dạng năng lượng mới vào đời sống người dân [50]. Đối với hydro cũng tương tự như vậy.

Dữ liệu khảo sát về hydrogen được thực hiện tại Đức năm 2021 [51, 52] cho thấy, người tiêu dùng có nghe đến hydro xanh, nhưng chỉ có 25% biết ít nhiều chi tiết về sử dụng hydrogen trong xe hơi qua dạng fuel cell (FCBV), nhưng không rõ hydrogen có thể sử dụng trong các lĩnh vực khác (như hóa học, luyện thép, xi măng, chế tạo thủy tinh...). Tuy nhiên, người tiêu dùng Đức ủng hộ Chính phủ đầu tư vào công nghệ hydrogen, vì công nghệ này có thể tạo ra việc làm mới, thúc đẩy tăng trưởng kinh tế và sử dụng an toàn như các nhiên liệu hóa thạch khác. Khảo sát ở Nhật Bản về ý kiến sử dụng hydrogen thay thế xăng trong xe hơi cho thấy tỷ lệ đánh giá mối nguy hiểm của hydrogen và xăng trong xe ngang nhau (40%) [45].

Tại Việt Nam, nếu hydrogen được trộn vào khí đốt như loại năng lượng hỗ trợ, khả năng lớn là người tiêu dùng sẵn sàng chấp nhận sử dụng. Muốn đạt tới sự chấp nhận rộng rãi của xã hội trong tương lai, cần cung cấp đầy đủ thông tin về hydrogen xanh đến người tiêu dùng qua 1 kế hoạch mang tính lâu dài, có hệ thống và bắt đầu ngay

**Bảng 2.** Các tiêu chuẩn an toàn cho sản xuất, lưu trữ, phân phối và sử dụng hydrogen

ISO/TC 197 Hydrogen Technologies (20 nước công nhận)	Tổng quát về hệ thống và thiết bị cho sản xuất, lưu trữ, chuyên chở và đo đạc hệ thống hydrogen	IEC/TC 105	Tổng quát về sử dụng hydrogen cho pin nhiên liệu (lĩnh vực giao thông)
ISO 15916 (2015)	Các hướng dẫn quốc tế về việc xử lý và lưu trữ an toàn hydrogen ở thể khí và lỏng	IEC 62282-2- 100 đến IEC 62282-9- 102 ED1)	Các tiêu chuẩn cho Fuel Cell gồm nhiều lĩnh vực về an toàn và môi trường
ISO 11114-4	Bình chứa trụ vận chuyển hydrogen	ASME Article KD-10	Bình chứa áp hydrogen
ISO 19880 (2019)	Yêu cầu về an toàn và hiệu suất đối với các trạm hydrogen nén cho ô tô	SAE J2579	Hệ thống đốt khí hydrogen
ISO/WD TR 15916	Yêu cầu cơ bản cho an toàn hệ thống hydrogen	CSA CHMC1 CSA HPIT1	Phương pháp thử nghiệm khí hydrogen Hệ thống hydrogen dùng cho xe tải

càng sớm càng tốt. Kế hoạch này kết hợp nhiều tác động tổng hợp trên nhiều mặt [50]:

- Hệ thống chính trị: Phổ biến các chính sách về mục tiêu và giá hỗ trợ phát triển hydrogen xanh sản xuất từ năng lượng tái tạo (gió, mặt trời, sinh khối...) nhằm thay thế dần nhiên liệu hóa thạch (ví dụ bằng giá FIT);

- Cộng đồng: Tổ chức thông tin rộng rãi về lợi ích hydrogen trong việc giảm lượng khí thải CO<sub>2</sub>, bảo vệ môi trường, giảm nhiệt độ để bảo vệ bầu khí quyển... với mục tiêu là tạo sự tin cậy lâu dài của cộng đồng đối với hydrogen;

- Khoa học kỹ thuật: Cập nhật và phát triển công nghệ hydrogen tiên tiến tại các quốc gia đang đi đầu về công nghệ hydrogen xanh như châu Âu, Bắc Mỹ, Australia và châu Á (Trung Quốc, Hàn Quốc, Nhật Bản)...

- Kinh tế: Sản xuất và xây dựng hệ thống phân phối hydrogen, sử dụng công nghệ trong nước, phân tích ưu điểm và rủi ro trong việc đầu tư sản xuất hydrogen xanh, giá cả và tính cạnh tranh với các dạng nhiên liệu khác như khí đốt, xăng, điện từ than... trên thị trường.

## **5. Kết luận và kiến nghị**

Xu thế ứng dụng và phát triển công nghệ hydrogen trên toàn thế giới đang diễn ra mạnh mẽ. Các quốc gia đi đầu về hydrogen trên thế giới đang xây dựng chính sách mở để phát triển công nghệ, tiến tới làm chủ chuỗi giá trị hydrogen trên phạm vi toàn cầu.

- Đối với chiến lược phát triển năng lượng trong tương lai gần, Việt Nam cần nghiên cứu và đưa công nghệ tiên tiến vào sản xuất hydrogen và khí tổng hợp (H<sub>2</sub> + CO) như “khí hóa than + hơi nước”, “khí hóa” sinh khối, để sản xuất nhiệt, điện với mục đích thay thế cho việc “đốt đơn thuần” bởi các nhà máy nhiệt điện thông thường có hiệu suất thấp và sản sinh khí thải CO<sub>2</sub> ảnh hưởng xấu đến môi trường.

- Nghiên cứu phương pháp sản xuất hydrogen bằng nhiệt phân khí tự nhiên để tiến tới áp dụng vào Việt Nam.

- Về mặt ứng dụng: áp dụng công nghệ tiên tiến sử dụng hydrogen trong công nghiệp như dùng hydrogen khử quặng sắt trực tiếp trong công nghệ sản xuất thép thay thế dần công nghệ dùng than hiệu suất thấp và ô nhiễm môi trường hiện nay.

- Trong công nghệ sản xuất hydrogen xanh cần có lộ trình gồm các bước sau:

- + Tiến hành thành lập “Tổ hợp hydrogen xanh” gồm

các cơ sở trong nước sẽ sử dụng hydrogen xanh (dầu khí, năng lượng tái tạo, thép, xi măng, xe hơi...) để tạo nguồn lực tổng hợp quốc gia.

- + Hợp tác xây dựng 1 - 2 dự án thí điểm sản xuất hydrogen xanh dùng điện từ năng lượng tái tạo (tận dụng tài nguyên gió và ánh sáng mặt trời sẵn có ở Việt Nam), công suất nhỏ khoảng 4 - 10 MW sử dụng công nghệ điện phân nước PEM và kiềm.

- + Nghiên cứu các công nghệ sản xuất hydrogen tiên tiến trên thế giới, áp dụng trong điều kiện đặc thù của Việt Nam.

- + Cung cấp đầy đủ thông tin về hydrogen xanh đến người dân để tăng cường sử dụng dạng năng lượng mới này.

- Việt Nam cần đẩy mạnh hợp tác, khai thác, huy động các nguồn lực trong và ngoài nước để kết nối, đánh giá xu thế công nghệ và tiến tới hợp tác chuyển giao công nghệ, từ đó có cơ hội làm chủ công nghệ hydrogen xanh trong tương lai gần.

## **Tài liệu tham khảo**

[1] IEA, “Global hydrogen review, technology report”, 2021.

[2] Paul Boldrin and Nigel P. Brandon, “Progress and outlook for solid oxide fuel cells for transportation applications”, *Nature Catalysis*, Vol. 2, pp. 571 - 577, 2019.

[3] André Sternberg, Christoph Hank, and Christopher Matthias Hebling, “Greenhouse gas emissions for battery electric and fuel cell electric vehicles with ranges over 300 kilometers”.

[4] Nedstack, “PEM-FCS stack technology”.

[5] Nissan, “Nissan unveils world’s first solid-oxide fuel cell vehicle”, 2016.

[6] Georgina Jeerh, Mengfei Zhang, and Shanwen Tao, “Recent progress in ammonia fuel cells and their potential applications”, *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 9, pp. 727 - 752, 2021. DOI: 10.1039/D0TA08810B.

[7] Juergen Rechberger, Andreas Kaupert, Jonas Hagerskans, and Ludger Blum, “Demonstration of the first European SOFC APU on a heavy-duty truck”, *Transportation Research Procedia*, Vol. 14, pp. 3676 - 3685, 2016. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.442.

[8] Pedro Nehter, Barbara Wildrath, Ansgar Bauschulte, and Keno Leites, “Diesel based SOFC demonstrator for

maritime applications", *ECS Transactions*, Vol. 78, No. 1, pp. 171 - 180, 2017. DOI: 10.1149/07801.0171ecst.

[9] Keyou, "Es gibt genügend Gründe, Verbrennungsmotor und Wasserstoff zu kombinieren".

[10] Rosalin Rath, Piyush Kumar, Smita Mohanty, and Sanjay Kumar Nayak, "Recent advances, unsolved deficiencies, and future perspectives of hydrogen fuel cells in transportation and portable sectors", *International Journal of Energy Research*, Vol. 43, No. 15, pp. 1 - 25, 2019. DOI: 10.1002/er.4795.

[11] Bruno G. Pollet, Shyam S. Kocha, and Iain Staffell, "Current status of automotive fuel cells for sustainable transport", *Current Opinion in Electrochemistry*, Vol. 16, pp. 90 - 95, 2019. DOI: 10.1016/j.coelec.2019.04.021.

[12] David A. Cullen, K.C. Neyerlin, Rajesh K. Ahluwalia, Rangachary Mukundan, Karren L. More, Rodney L. Borup, Adam Z. Weber, Deborah J. Myers, and Ahmet Kusoglu, "New roads and challenges for fuel cells in heavy-duty transportation", *Nature Energy*, Vol. 6, pp. 462 - 474, 2021.

[13] Remzi Can Samsun, Laurent Antoni, Michael Rex, and Detlef Stolten, "Deployment status of fuel cells in road transport: 2021 update", *Energy & Environment Band*, Vol. 542, 2021.

[14] S. Barrett, "Ceres, Weichai plan SOFC range-extender for China bus market", *Fuel Cells Bulletin*, Vol. 2018, No. 6, pp. 10, 2018. DOI: 10.1016/S1464-2859(18)30212-8.

[15] FuelCellsWorks, "Ceres power and weichai power develop first prototype fuel cell range extended for Chinese bus market", 5/9/2019.

[16] Brandon Graver, Dan Rutherford, and Sola Zheng, "CO<sub>2</sub> emissions from commercial aviation", 2020.

[17] L. Van Biert, M. Godjevac, K. Visser, and P.V. Aravind, "A review of fuel cell systems for maritime applications", *Journal of Power Sources*, Vol. 327, pp. 345 - 364, 2016. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.07.007.

[18] Nick Ash and Tim Scarbrough, "Sailing on Solar - Could green ammonia decarbonise international shipping?", *Environmental Defense Fund*, 2019.

[19] Öko-Institut Berlin, "Ammonia as a marine fuel: Risks and perspectives", 2021.

[20] Hideaki Kobayashi, Akihiro Hayakawa, K.D. Kunkuma A. Somarathne, and Ekenechukwu C. Okafor, "Science and technology of ammonia combustion",

*Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 37, No. 1, pp. 109 - 133, 2019. DOI: 10.1016/j.proci.2018.09.029.

[21] Kyunghwa Kim, Gilltae Roh, Wook Kim, and Kangwoo Chun, "A preliminary study on an alternative ship propulsion system fueled by ammonia: Environmental and economic assessments", *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 8, No. 3, 2000. DOI: 10.3390/jmse8030183.

[22] Niels de Vries, "Safe and effective application of ammonia as a marine fuel", TU Delft Mechanical, Maritime and Materials Engineering, 2019.

[23] M.D. Fernandes, S.T. de P. Andrade, V.N. Bistrizki, R.M. Fonseca, L.G. Zacarias, H.N.C. Goncalves, A.F. de Castro, R.Z. Dominiques, and T. Matencio, "SOFC-APU systems for aircraft: A review", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 33, pp. 16311 - 16333, 2016. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.07.004.

[24] Helge Weydahl, Martin Gilljam, Torleif Lian, Tom Cato Johannessen, Sven Ivar Holm, and Jon Øistein Hasvold "Fuel cell systems for long-endurance autonomous underwater vehicles - Challenges and benefits", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 8, pp. 5543 - 5553, 2020. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.035.

[25] Eurofer, "European steel in figures 2020", 2020.

[26] Bellona, "Climate action in the steel industry", 2021.

[27] Bellona, "Hydrogen in steel production: What is happening in Euro - part one", 2021.

[28] Bellona, "Hydrogen in steel production: what is happening in Euro - part two", 2021.

[29] Statista, "Major countries in worldwide cement production from 2010 to 2020", 2021.

[30] Thomas Czigler, Sebastian Reiter, Patrick Schulze, and Ken Somers, "Laying the foundation for zero-carbon cement", 2020.

[31] CleanTechnica, "Reducing emissions from cement & steel production".

[32] Visvesh Sridharan, "Future of cement: Low-carbon technologies and sustainable alternatives", 15/5/2020.

[33] Stephen B. Harrison, "Deep decarbonisation of cement: Oxyfuel burners and hydrogen electrolyzers show the way", 15/2/2021.

[34] Bellona, "Climate action in the cement industry: Factsheet", 2020.



- [35] Ballard, "Ballard & HDF energy announce world's first multi-megawatt scale baseload hydrogen power plant", 7/10/2021.
- [36] Nekkei Asia, "Japan's first commercial hydrogen power plant to open near Mount Fuji", 21/4/2021.
- [37] T. Nguyen, Z. Abdin, T. Holm, and W. Merida, "Grid-connected hydrogen production via large-scale water electrolysis", *Energy conversion and management*, Vol. 200, pp. 112-108, 2019. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112108. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112108.
- [38] Zhiyuan Fan, Emeka Ochu, Sarah Braverman, Yushan Lou, Griffin Smith, Amar Bhardwaj, Jack Brouwer, Colin McCormick, and Julio Friedmann, "Green hydrogen in a circular carbon economy: Opportunities and limits", Columbia Center for Global Energy Policy, 2021.
- [39] Alex Zapantis, "Blue hydrogen", 2021.
- [40] IRENA, "Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5 °C climate goal", 2020.
- [41] Power Technology, "Saudi Arabia moves on \$5bn hydrogen project", 2021.
- [42] InterContinental Energy, "Asian renewable energy hub".
- [43] VNEEP, "Hydro xanh" có thể đáp ứng 24% tiêu thụ năng lượng toàn cầu vào năm 2050", 2020.
- [44] Störfall-Kommission (SFK), "Bericht: Anwendung der Wasserstoff - Technologie Eine Bestandsaufnahme", 2002.
- [45] A.V. Tchouvelev and S.P. de Oliveira, "Chapter 6: Regulatory Framework, Safety Aspects, and Social Acceptance of Hydrogen Energy Technologies", *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies: Hydrogen Production and Practical Applications in Energy Generation*. Academic Press, 2019.
- [46] Jörg Adolf, Christoph H. Balzer, Jurgen Louis, Uwe Schabla, Manfred Fishedick, Karin Arnold, Andreas Pastowski, and Dietmar Schüwer, "Shell hydrogen study - Energy of the future", Shell Deutschland Oil GmbH, 2017.
- [47] V. Schröder and E. Aska, "Sicherheitstechnische Eigenschaften von Erdgas-Wasserstoff-Gemischen", Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung (BAM), 2016.
- [48] AICHE, "The center for hydrogen safety".
- [49] EPSC, "EPSC - European Process Safety Centre".
- [50] Johann Jakob Häußermann, Juliane Renno, "Prospektives Akzeptanzmanagement bei H<sub>2</sub>-projekten".
- [51] Wilfried Konrad, Rainer Kuhn, Sarah-Kristina Wist, and Bianca Witzel, "Einstellungen in Deutschland zu Wasserstofftechnologien: Ergebnisse von Repräsentativbefragungen in der Übersicht", 2021.
- [52] René Zimmer, "Auf dem Weg in die Wasserstoffgesellschaft", 2013.

## HYDROGEN APPLICATION TECHNOLOGIES AND ENVIRONMENTALLY FRIENDLY SMART ENERGY SYSTEM

**Nguyen Van Nhu<sup>1</sup>, Truong Nhu Tung<sup>2</sup>, Dinh Van Thinh<sup>3</sup>, Nguyen Viet Anh<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Forschungszentrum Jülich GmbH, Institute of Energy and Climate Research, Germany

<sup>2</sup>Vietnam Petroleum Institute

<sup>3</sup>Senior Experten Service (SES), Bonn, Germany

<sup>4</sup>Siemens Energy AG, Germany

Email: nguyen3vannhu@yahoo.com

### Summary

Climate change and fossil fuel depletion are the main reasons for many countries around the world to develop and implement energy transition strategies. Being a very clean burning fuel (generating steam only), hydrogen will play an important role in the transition from fossil energy to CO<sub>2</sub>-free energy. The paper introduces recent advances of hydrogen technology applied in transportation, industry, and power generation in the world; challenges regarding hydrogen safety and technology; barriers in social perception; and some recommendations for the development of hydrogen technology and environmentally friendly smart energy systems in Vietnam.

**Key words:** Hydrogen applications, fuel cells, transportation, power generation, smart energy system.