

TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC ĐIỀU KIỆN THÍ NGHIỆM ĐẾN SẢN PHẨM KHÍ VÀ CHUYỂN ĐỔI TAR TRONG QUÁ TRÌNH KHÍ HÓA HỖN HỢP THAN VÀ SINH KHỐI

OVERVIEW OF THE STUDY AFFECTING EXPERIMENTAL CONDITIONS FOR GAS PRODUCTS AND TAR TRANSFORMATION IN COMBINATION OF COAL AND COMBUSTION

Trần Văn Bảy

TÓM TẮT

Sinh khối (biomass) là nhiên liệu tái tạo đã thu hút sự chú ý của nhiều học giả trong những năm gần đây vì đây là nhiên liệu không có carbon (hoặc trung tính carbon) và sẽ giúp tạo ra các cơ hội kinh tế mới, đặc biệt là ở khu vực nông thôn. Tuy vậy, do sinh khối có những đặc tính đặc biệt như chất bốc cao, nhiệt trị thấp, hàm lượng ẩm lớn, ... so với nhiên liệu hóa thạch (than). Vì vậy việc khí hóa sinh khối kết hợp với than hiện nay được rất nhiều nhà khoa học quan tâm nhằm tạo ra sản phẩm khí đạt được các yêu cầu về thành phần và đặc tính. Bài báo trình bày ngắn gọn tổng quan một số nghiên cứu hiện tại trên thế giới về khí hóa hỗn hợp than và sinh khối, ảnh hưởng của các điều kiện thí nghiệm tới thành phần sản phẩm khí và chuyển đổi tar. Từ đó xác định được phương hướng nghiên cứu tiếp theo về khí hóa: chọn loại sinh khối và loại than, chất xúc tác, tối ưu hóa nhiệt độ khí hóa, tỷ lệ trộn và các điều kiện khí hóa khác.

Từ khóa: Sinh khối, khí hóa, chất xúc tác.

ABSTRACT

Biomass (biomass) is a renewable fuel that has attracted the attention of many scholars in recent years because it is a carbon-free (or carbon-neutral) fuel and will help create new economic opportunities, especially in rural areas. However, because biomass has special properties such as high volatile matter, low calorific value, high moisture content, ... compared to fossil fuels (coal). Therefore, the biomass gasification combined with coal is currently interested by many scientists to create gas products that meet the requirements of composition and properties. The following article briefly describes a number of current studies in the world on gasification of coal and biomass mixes, the influence of experimental conditions on gas product composition and tar conversion. From that, determine the next research direction on gasification: choose biomass type and coal type, catalyst, optimize the gasification temperature, mixing rate and other gasification conditions.

Keywords: Biomass, gasification, catalyst.

Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: tvbaydhgt@gmail.com

Ngày nhận bài: 15/12/2019

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/01/2020

Ngày chấp nhận đăng: 20/02/2020

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong khí hóa hỗn hợp than và sinh khối, việc xác định được tỷ lệ trộn nhiên liệu, nhiệt độ, điều kiện khí hóa, chất xúc tác, lượng hơi nước, không khí cấp vào... cho từng loại sinh khối, loại than cụ thể để thu được sản phẩm khí có thành phần, đặc tính và nhiệt trị theo yêu cầu là một vấn đề hết sức khó khăn. Các nhà nghiên cứu trên thế giới đã nghiên cứu và đưa ra được các kết luận. Tuy nhiên, do mỗi một loại sinh khối có những đặc tính khác nhau, mỗi loại than ở từng vùng miền có những đặc tính khác nhau. Hơn nữa các nghiên cứu về lĩnh vực trộn than với các sinh khối hiện có ở Việt Nam hiện nay cũng đang rất hạn chế. Nước ta lại là nước nông lâm nghiệp phát triển, lượng sinh khối hiện nay đang bị bỏ phí nhiều. Vì vậy, đây cũng là những vấn đề rất cần được quan tâm và nghiên cứu sâu rộng.

2. ĐẶC ĐIỂM CỦA SINH KHỐI

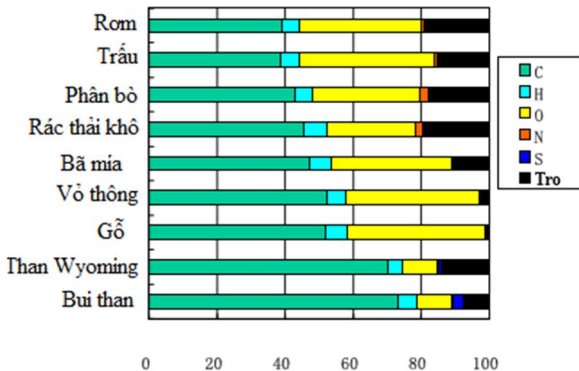
2.1. Hàm lượng ẩm trong sinh khối

Hàm lượng ẩm trong sinh khối khác nhau rất lớn phụ thuộc vào loại sinh khối (Giấy: 20%, chất thải động vật, chất cặn bã lên men rượu và bùn cống: 98~99%). Đối với gỗ tươi, hàm lượng ẩm trong gỗ khoảng 50%, khi phơi khô còn khoảng 30% và đạt đến mức khô tối đa là khoảng 20%. Vì vậy để có thể sử dụng được những nguồn sinh khối ướt có chứa hàm lượng ẩm cao như: Chất thải động vật, chất cặn bã lên men rượu và bùn cống thì cần phải có các quá trình xử lý, làm khô đến mức cần thiết đối với mỗi loại công nghệ chuyển hóa. Nhìn chung, khi sinh khối có hàm lượng ẩm trên 70% thì không nên sử dụng để đốt hoặc khí hóa vì hiệu quả sinh nhiệt quá thấp thậm chí nó còn thu nhiệt.

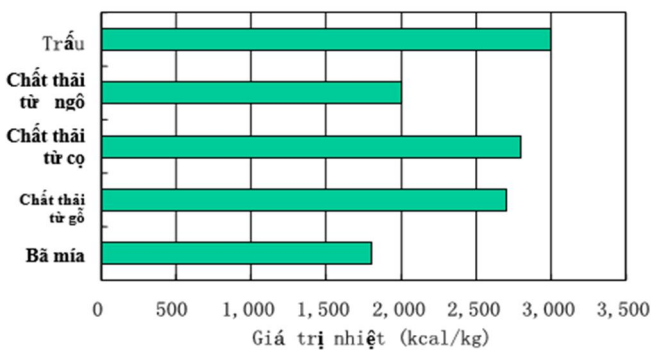
2.2. Nhiệt trị của sinh khối

Nhiệt trị của sinh khối khá thấp, thông thường chỉ bằng khoảng một nửa nhiệt trị của nhiên liệu hóa thạch. Tuy nhiên hàm lượng tro và lưu huỳnh trong sinh khối thấp hơn rất nhiều so với nhiên liệu hóa thạch vì vậy đây sẽ là ưu điểm nổi trội của việc sử dụng sinh khối để chuyển hóa năng lượng. Hình 1 so sánh thành phần hóa học của một số loại nhiên liệu sinh khối. Nhiệt trị của nhiên liệu phụ thuộc

rất nhiều vào thành phần hóa học của sinh khối. Ở đây ta thấy, hàm lượng cacbon (C) trong các nhiên liệu sinh khối khá thấp so với than và đây là thành phần chính ảnh hưởng đến nhiệt trị của nhiên liệu. Hình 2 cho biết nhiệt trị của một số loại sinh khối phổ biến.



Hình 1. Thành phần hóa học của một số loại sinh khối [11]



Hình 2. Nhiệt trị của nhiên liệu sinh khối [11]

Theo hình 2, trấu và chất thải từ gỗ có nhiệt trị tương đối lớn. Đây cũng là nguồn sinh khối có trữ lượng lớn ở nước ta hiện nay mà chưa được sử dụng hiệu quả.

3. ĐẶC ĐIỂM CỦA KHÍ HÓA HỖN HỢP THAN VÀ SINH KHỐI

Khí hóa hỗn hợp than với sinh khối, do hàm lượng cacbon trong than cao nên sẽ ảnh hưởng nhiều đến sự chuyển đổi cacbon dẫn đến hiệu suất của quá trình tăng. Tuy nhiên với sinh khối có hàm lượng độ ẩm cao và không ổn định nên có thể thu được khí tổng hợp đạt hiệu quả về năng lượng và thành phần.

Tỷ lệ không khí/hơi nước ở nhiệt độ cao thấy rằng sự gia tăng hỗn hợp của nitơ và nhiệt độ oxy từ 600°C đến 1000°C làm cho quá trình chuyển đổi nhanh hơn, chủ yếu là do sớm bắt đầu làm khô nhanh.

4. SỰ HÌNH THÀNH TAR (HẮC ÍN) TRONG QUÁ TRÌNH KHÍ HÓA

Trong thiết bị khí hóa, tar được hình thành chủ yếu tại vùng nhiệt phân, tại đó ngoài sản phẩm khí thì còn có char và tar. Tar là hỗn hợp phức tạp của các hydrocacbon ngưng tụ bao gồm hợp chất chứa oxy, hydrocacbon thơm 1 đến 5 vòng và hỗn hợp của các polyhydrocacbon thơm có phân tử lượng lớn hơn benzen. Hydrocacbon thơm chiếm lượng lớn trong tar như toluen (24%), naphthalene (15%), phenol, benzen. Trong quá trình khí hóa, hàm

lượng tar có thể đạt tới 7 ÷ 8% nếu ta khí hóa củi gỗ, bạch đàn, than non, than bùn... Với các nhiên liệu rắn khác, tar có hàm lượng thấp hơn. Tar được xem như là thông số rào cản nhất trong hệ thống khí hóa vì tar có thể gây ra một số vấn đề làm tắc đường ống, giảm hiệu quả trao đổi nhiệt của thiết bị... Khối lượng và thành phần của tar từ quá trình khí hóa sinh khối phụ thuộc vào nhiều yếu tố như là loại sinh khối, loại thiết bị khí hóa, tác nhân khí hóa, nhiệt độ và áp suất hoạt động.

5. MỘT SỐ NGHIÊN CỨU HIỆN TẠI TRÊN THẾ GIỚI VỀ KHÍ HÓA HỖN HỢP THAN VÀ SINH KHỐI, ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC ĐIỀU KIỆN THÍ NGHIỆM TỚI THÀNH PHẦN SẢN PHẨM KHÍ VÀ CHUYỂN ĐỔI TAR

Fermoso và cộng sự [1] nghiên cứu quá trình khí hóa của các loại than khác nhau với than sinh khối trong một lò phản ứng áp suất cao để sản xuất khí giàu H₂. Kết quả cho thấy:

Bốn loại than khác nhau được khí hóa, sử dụng hỗn hợp hơi nước/oxy làm tác nhân khí hóa, ở áp suất khí quyển và áp suất cao (15atm) trong lò phản ứng cố định được đặt trong một hệ thống cấp than ở chế độ liên tục. Sự gia tăng áp lực khí hóa dẫn đến giảm sản xuất H₂ + CO và chuyển đổi cacbon. Sự kết hợp của các loại than có thứ hạng khác nhau cho thấy hàm lượng cacbon và tốc độ phản ứng càng cao thì sản xuất hydro càng lớn. Các thí nghiệm khí hóa sinh khối than và hỗn hợp ternary (coal-petcoke-biomass) đã được tiến hành ở áp suất cao để nghiên cứu các tác động tổng hợp có thể có. Tương tác giữa các thành phần pha trộn đã ảnh hưởng đến sản phẩm khí. Đó là một hướng trong sản xuất hydro khi than được khí hóa cùng sinh khối.

Nhóm nghiên cứu của Dalia A. Ali [2] tiến hành nghiên cứu quá trình khí hóa than và chất thải sinh khối trong một thiết bị khí hóa liên tục. Nhóm nghiên cứu đã khí hóa một số nguyên liệu than có nguồn gốc khác nhau và hỗn hợp nguyên liệu/chất thải sinh học khác nhau đã được thực hiện, bao gồm cả hỗn hợp than của Mỹ/ Ai Cập và rơm rạ. Hiệu quả của việc thay đổi nhiệt độ khí hóa đối với thành phần khí tổng hợp đã được phân tích. Kết quả đã chỉ ra rằng, các thành phần của CO và H₂ tăng lên khi tăng nhiệt độ khí hóa, trong khi CH₄ và CO₂ được tạo ra không bị ảnh hưởng. Các tác động của việc thay đổi tỷ lệ hơi nước/O₂ ở nhiệt độ khí hóa không đổi trên tỷ lệ H₂/CO, tỷ lệ CH₄ /H₂ trong lưu lượng khí tổng hợp và khí tổng hợp cũng đã được phân tích. Người ta nhận thấy rằng, khi tỷ lệ hơi nước/O₂ tăng lên, tỷ lệ H₂/CO cũng tăng lên. Khi hỗn hợp gồm 90% than và 10% rơm thì hiệu suất của khí hóa và thành phần khí tổng hợp như sau: Đối với hỗn hợp khô (90% than Mỹ và 10% rơm Ai Cập), hiệu suất khí lạnh đã tăng lên 82,38%. Trong khi đối với trường hợp khí hóa than 100% là 79,61% và thành phần khí tổng hợp (H₂ và CO) giảm từ 24% xuống 8,5%. Đối với hỗn hợp gồm 90% than Ai Cập và 10% rơm lúa Ai Cập, hiệu suất khí lạnh được ước tính là 85,7%.

Khí hóa hỗn hợp than và sinh khối với sự có mặt của chất xúc tác trong một thiết bị khí hóa tầng sôi tuần hoàn để sản xuất khí tổng hợp sạch, sử dụng cả các hạt kiềm và

CO₂ làm chất xúc tác đã được tác giả Wan-Xi Peng và cộng sự trình bày trong nghiên cứu [3]. Để đánh giá tiềm năng của các chất xúc tác kiềm, nhóm tác giả đã nghiên cứu ảnh hưởng của ba chất xúc tác kiềm phổ biến (NaHCO₃, KHCO₃ và K₂CO₃) về các đặc điểm chính của quá trình khí hóa có xúc tác. Kết quả cho thấy sự gia tăng tỷ lệ khối lượng chất xúc tác dẫn tăng sản lượng CO₂ và H₂ tương ứng. Với sự gia tăng tỷ lệ than/sinh khối từ 0,1 đến 0,5, chuyển đổi tổng thể tăng từ 81% lên 94%. Khả năng của K₂CO₃ để chuyển đổi nhiên liệu lớn hơn nhiều so với các chất xúc tác khác (NaHCO₃ và KHCO₃). Khi tỷ lệ khối lượng chất xúc tác tăng lên, lượng tar giảm từ 13,38 xuống 9,27 đối với Al₂O₃ / K₂CO₃, từ 14,18 đến 9,62 đối với Al₂O₃/ NaHCO₃ và từ 14,87 đến 10,47 đối với Al₂O₃/K₂CO₃ do tốc độ phá hủy ban đầu.

Theo hướng nghiên cứu quá trình khí hóa hỗn hợp than và sinh khối sử dụng dolomite và olivine làm chất xúc tác, tác giả Xinyue Ma và cộng sự đã công bố trong [4] năm 2018. Nghiên cứu này nhằm mục đích đánh giá khả năng của dolomite và olivine để loại bỏ tar và sản xuất hydro trong quá trình khí hóa tầng sôi của than và sinh khối. Các thông số vận hành cụ thể là nhiệt độ khí hóa (Tg), kích thước hạt nhiên liệu (dp), tỷ lệ sinh khối (BR), tỷ lệ hơi / nhiên liệu (S/F), tải chất xúc tác và tỷ lệ tương đương (ER) đã được thử nghiệm để nghiên cứu ảnh hưởng của chúng đối với sản lượng hydro và tar. Với sự tăng chất xúc tác từ 3,0 lên 12,0 (wt%), năng suất hydro đã tăng từ 52,9 lên 55,5 (g/kg-nhiên liệu) đối với dolomite và từ 47,5 đến 52,1 (g/kg nhiên liệu) đối với olivine, trong khi lượng tar giảm mạnh từ 5,4 xuống 0,4 (g/Nm³) và từ 7,0 đến 0,8 (g/Nm³) tương ứng. Kích thước hạt nhiên liệu cho thấy ảnh hưởng không đáng kể đến việc nâng cấp sản xuất hydro và năng suất tar.

Natalia Howaniec và cộng sự [5] đã nghiên cứu quá trình khí hóa than và sinh khối với sự tham gia của hơi nước trong sản xuất khí giàu hydro. Nghiên cứu trình bày thí nghiệm về quá trình khí hóa thực hiện trong một lò phản ứng cố định dưới áp suất khí quyển và ở nhiệt độ 700, 800 và 900°C. Tỷ lệ hỗn hợp than/sinh khối là 20, 40, 60 và 80% khối lượng được thực hiện ở các chế độ nhiệt độ khác nhau để đánh giá lượng khí thành phần của sản phẩm khí, chuyển đổi carbon và phản ứng char. Việc tăng hàm lượng sinh khối lên 60 và 80% khối lượng dẫn đến khối lượng khí sản phẩm giảm nhẹ. Tuy nhiên, nó vẫn mang lại lợi thế giảm phát thải CO₂ khi so sánh với các quy trình sản xuất năng lượng dựa trên nhiên liệu hóa thạch.

Kết quả nghiên cứu của nhóm nghiên cứu Xianbin Xiao [6] về sản xuất khí tổng hợp từ khí hóa sinh khối chất thải sử dụng than nâu chứa niken làm chất xúc tác đã chỉ ra rằng:

Các hạt niken phân tán tốt và lượng tải đạt yêu cầu đạt được trong Ni/BCC (Ni-loaded brown coal char) bằng phương pháp trao đổi ion. Nó có đặc điểm kết cấu tốt và thể hiện một hoạt động tốt làm chất xúc tác cho quá trình phân hủy nhựa sinh khối. Nhiệt độ phản ứng và tỷ lệ hơi nước đóng một vai trò quan trọng trong quá trình tạo khí xúc tác. Sự tăng trưởng của hạt niken bị ảnh hưởng mạnh

bởi nhiệt độ và nên chuẩn bị và sử dụng nó cho khí hóa khối lượng sinh học không cao hơn 650°C. Trong phạm vi nhiệt độ đó, hiệu suất xúc tác trở nên cao hơn với nhiệt độ ngày càng tăng. Tỷ lệ hơi nước thấp hơn sẽ tốt hơn cho quá trình xử lý khí chấp nhận được và để giữ cấu trúc xúc tác tốt và hoạt động ổn định hơn. Ni/BCC cho thấy cả hoạt động xúc tác của ít nhất là cùng mức với Ni/Al₂O₃ và khả năng chống lắng đọng carbon, bảo vệ chất xúc tác khỏi bị khử hoạt tính.

Khí hóa sinh khối (phân chuồng gia súc), có hơi nước làm chất xúc tác ở lò tầng sôi ở nhiệt độ thấp để tạo ra khí tổng hợp giàu hydro của nhóm nghiên cứu Xianbin Xiao [7] đã chỉ ra những triển vọng khí khí hóa sinh khối ở nhiệt độ thấp.

Mẫu phân ủ giải phóng các loại khí dễ bay hơi nhất và hầu hết các sản phẩm của nó đều ở dưới 700°C.

Sự có mặt của chất xúc tác hơi nước trong quá trình khí hóa làm tăng đáng kể tổng lượng khí, cải thiện chất lượng khí và loại bỏ hàm lượng tar. Nhiệt độ là yếu tố quan trọng nhất trong quá trình này. Nhiệt độ cao hơn làm tăng sản xuất hydro và năng suất khí. Việc đưa hơi nước vào khí hóa sinh khối là thuận lợi để cải thiện chất lượng khí.

Khí hóa tầng sôi hai giai đoạn có ưu điểm là sử dụng chất xúc tác tốt hơn và tăng cường phản ứng cải cách hơi nước và phản ứng dịch chuyển nước khí ở một mức độ nào đó.

Trong công trình [8], tác giả Xianbin Xiao và cộng sự đã nghiên cứu khí hóa hai giai đoạn sinh khối chất thải thiết bị cố định với sự có mặt của hơi nước ở nhiệt độ thấp để đánh giá các tham số và tối ưu hóa hiệu suất khí hóa. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã thực hiện khí hóa ở nhiệt độ khí hóa là 600°C, sử dụng dăm gỗ và phân chuồng lợn làm nguyên liệu. Các biến vận hành chính được nghiên cứu là nhiệt độ nhiệt phân, nhiệt độ xúc tác, tỷ lệ hơi nước/sinh khối C, vận tốc không gian và chất xúc tác khác nhau. Nhiệt độ phản ứng và tỷ lệ hơi nước/C có vai trò quan trọng đối với quá trình tạo khí. Khoảng 60% H₂ (khô và N₂ tự do) và khoảng 2,0 Nm³ kg sinh khối (khô và không tro) có thể thu được trong điều kiện tốt. So với Ni/Al₂O₃, Ni/BCC (than nâu nạp Ni) có khả năng tốt hơn và triển vọng đầy hy vọng cho sự ổn định với khả năng chống hình thành cốc.

Nhóm nghiên cứu Kazuhiro Kumabe [9] rút ra được các kết luận khi nghiên cứu quá trình khí hóa khí hóa sinh khối gỗ (gỗ tuyết tùng Nhật Bản) và than (than Mulia) ứng với các tỷ lệ sinh khối và than khác nhau với không khí và hơi nước làm chất xúc tác:

- Việc chuyển đổi thành khí tăng theo tỷ lệ sinh khối trong khi chuyển đổi thành char và tar giảm.

- Các khí sản phẩm chính là H₂, CO và CO₂. Với tỷ lệ sinh khối ngày càng tăng, thành phần H₂ giảm và thành phần CO₂ tăng. Thành phần CO và hydrocarbon độc lập với tỷ lệ sinh khối.

- Tỷ lệ sinh khối thấp dẫn đến việc sản xuất khí thuận lợi cho việc tổng hợp metanol và nhiên liệu carbon và tỷ

lệ sinh khối cao dẫn đến việc sản xuất khí thuận lợi cho quá trình tổng hợp DME trong các điều kiện thí nghiệm hiện nay.

Y.G.Pan và cộng sự [10] đã nghiên cứu qua trình khí hóa tầng sôi của sinh khối dư/hỗn hợp than nghèo để sản xuất khí đốt. Các thí nghiệm được thực hiện ở lò tầng sôi liên tục làm việc ở áp suất khí quyển. Biomass là dăm thông (Tây Ban Nha) với than đen, than cấp thấp từ Escatro (Tây Ban Nha) và than Sabero (Tây Ban Nha), trong phạm vi tỷ lệ từ 0/100 đến 100/0 (%). Tác nhân khí hóa không khí và hơi nước. Nhiệt độ khí hóa là 840 - 910°C và vận tốc khí hóa bề mặt là 0,7 - 1,4m/s. Nghiên cứu cho thấy sự pha trộn có tác dụng cải thiện hiệu suất của quá trình khí hóa tầng sôi của than cấp thấp và khả năng chuyển đổi than thành khí đốt có hàm lượng nhiệt trị thấp. Nghiên cứu này chỉ ra rằng tỷ lệ pha trộn với không khí dưới 20% dăm thông cho than cấp thấp và 40% dăm thông cho than thải là phù hợp nhất. Sản phẩm khí tăng giá trị nhiệt trị thấp tương ứng với tỷ lệ pha trộn tăng từ 3700 đến 4560kJ/Nm³ đối với dăm thông/than cấp thấp và từ 4000 đến 4750kJ/Nm³ đối với dăm thông/than thải. Năng suất khí sản phẩm khô tăng lên với sự gia tăng tỷ lệ pha trộn từ 1,8 đến 3,2Nm³/kg (dăm thông/than cấp thấp) và từ 0,75 đến 1,75Nm³/kg (dăm thông/than thải) tương ứng.

6. KẾT LUẬN

Như vậy, trên thế giới đã có nhiều các nghiên cứu về khí hóa hỗn hợp than/sinh khối với nhiều loại khác nhau, các tỷ lệ trộn khác nhau, điều kiện nhiệt độ khác nhau, các chất xúc tác khác nhau để tạo ra sản phẩm khí có thành phần khác nhau, đặc tính khác nhau, nhiệt trị khác nhau... Qua các nghiên cứu trên có thể thấy rõ được một số kết luận như sau:

- Tỷ lệ than trong hỗn hợp than/sinh khối càng lớn thì nhiệt trị của sản phẩm khí càng lớn.
- Tăng tỷ lệ hơi nước tham gia khí hóa thì sẽ tăng lượng khí H₂ tạo thành.
- Tỷ lệ sinh khối càng tăng thì lượng CO₂ trong sản phẩm khí càng lớn, lượng H₂ giảm, còn lượng CO và hydrocacbon thì không phụ thuộc.
- Các thành phần sản phẩm khí CO và H₂ tăng lên khi tăng nhiệt độ khí hóa, trong khi CH₄ và CO₂ được tạo ra không bị ảnh hưởng.
- Khi dùng chất xúc tác là K₂CO₃ so với NaHCO₃ và KHCO₃ thì khả năng của K₂CO₃ để chuyển đổi nhiên liệu lớn hơn nhiều so với các chất xúc tác khác là NaHCO₃ và KHCO₃.

Tuy nhiên hiện nay đối với một số loại sinh khối và than ở Việt Nam thì có rất ít các nghiên cứu về khí hóa hỗn hợp. Các chất xúc tác, tỷ lệ trộn, nhiệt độ khí hóa... khác nhau ảnh hưởng lớn đến thành phần và chất lượng sản phẩm khí. Vì vậy, tác giả nhận thấy việc nghiên cứu khí hóa hỗn hợp than và sinh khối cụ thể ở Việt Nam, tối ưu hóa điều kiện khí hóa, chất xúc tác sao cho thu được sản phẩm khí theo yêu cầu là vấn đề rất cần được quan tâm và nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. J. Feroso, B. Arias, M.V. Gil, M.G. Plaza, C. Pevida, J.J. Pis, F. Rubiera, 2009. *Co-gasification of different rank coals with biomass and petroleum coke in a high-pressure reactor for H₂-rich gas production*. *Bioresource Technology*, Vol.101, No.9, 3230-3235.
- [2]. Dalia A. Ali, Mamdouh A. Gadalla, Omar Y. Abdelaziz, Christian P. Hultheberg, Fatma Ashour, 2016. *Co-gasification of coal and biomass wastes in an entrained flow gasifier: Modelling, simulation and integration opportunities*. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 37.
- [3]. Wan-Xi Peng, Sheng-Bo Ge, Abdol Ghaffar Ebadi, Hikmat Hisoriev, Mohammad Javad Esfahani, 2017. *Syngas production by catalytic co-gasification of coal-biomass blends in a circulating fluidized bed gasifier*. *Journal of Cleaner Production*, Vol.168, 1513-1517.
- [4]. Xinyue Ma, Xue Zhao, Jiyou Gu, Junyou Shi, 2018. *Co-gasification of coal and biomass blends using dolomite and olivine as catalysts*. *Renewable Energy*, 32.
- [5]. Natalia Howanec, Adam Smolin'ski, Krzysztof Stan'czyk, Magdalena Pichlak, 2011. *Steam co-gasification of coal and biomass derived chars with synergy effect as an innovative way of hydrogen-rich gas production*, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 36, Issue 22, 14455-14463.
- [6]. Xianbin Xiao, Jingpei Cao, Xianliang Meng, Duc Dung Le, Liyun Li, Yukiko Ogawa, Kazuyoshi Sato, Takayuki Takarada, 2013. *Synthesis gas production from catalytic gasification of waste biomass using nickel-loaded brown coal char*. *Fuel*, Vol 103, 135-140
- [7]. Xianbin Xiao, Duc Dung Le, Liyun Li, Xianliang Meng, Jingpei Cao, Kayoko Morishita, Takayuki Takarada, 2010. *Catalytic steam gasification of biomass in fluidized bed at low temperature: Conversion from livestock manure compost to hydrogen-rich syngas*. *Biomass and BioEnergy*, v. 34 (10), 1505-1512.
- [8]. Xianbin Xiao, Xianliang Meng, Duc Dung Le, Takayuki Takarada, 2010. *Two-stage steam gasification of waste biomass in fluidized bed at low temperature: Parametric investigations and performance optimization*. *Bioresource Technology*, 102 (2), 1975-1981.
- [9]. Kazuhiro Kumabe, Toshiaki Hanaoka, Shinji Fujimoto, Tomoaki Minowa, Kinya Sakanishi, 2007. *Co-gasification of woody biomass and coal with air and steam*. *Fuel*, 86(5-6), 684-689.
- [10]. Y.G. Pan, E. Velo, X. Roca, J.J. Manya, L. Puigjaner, 2000. *Fluidized-bed co-gasification of residual biomass/poor coal blends for fuel gas production*. *Fuel*, 79(11), 1317-1326.
- [11]. Lê Đức Dũng, 2018. *Công nghệ sinh khối và công nghệ chuyển đổi nhiệt năng thành điện năng*. Nhà xuất bản Bách khoa Hà Nội.

AUTHOR INFORMATION

Tran Van Bay

University of Transport and Communications