

KHÍ HÓA HỖN HỢP THAN VÀ SINH KHỐI: NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT ĐỘ VÀ TỶ LỆ TRỘN ĐẾN SỰ CHUYỂN HOÁ SINH KHỐI TRÊN THIẾT BỊ TGA

CO-GASIFICATION COAL AND BIOMAS: RESEARCH THE EFFECT OF TEMPERATURE AND MIX RATIO ON BIOMASS CONVERSION ON TGA

Trần Văn Bấy^{1,*}, Lê Đức Dũng²

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.086>

TÓM TẮT

Vỏ hạt điều (CNS) là chất thải trong quá trình chế biến hạt điều nhưng có thể coi là sản phẩm phụ khi sử dụng làm nhiên liệu cho quá trình nhiệt phân, khí hoá hoặc đốt trực tiếp để sản xuất năng lượng ở quy mô vừa và nhỏ. Khí hoá là công nghệ tiên tiến, tiềm năng để sản xuất ra khí nhân tạo có các đặc tính đạt yêu cầu nhiệt trị, độ sạch nhất định để ứng dụng cho các chu trình tuabin khí, thay thế khí hoá lỏng cho các lò nung gốm sứ chất lượng cao hiện nay còn là dấu hỏi. Do vậy, việc nghiên cứu tối ưu quá trình khí hóa than và CNS để sản xuất khí có nhiệt trị cao là vấn đề nhiều nhà nghiên cứu quan tâm hiện nay. Trong bài báo này, trình bày phương pháp và kết quả nghiên cứu quá trình khí hóa than - sinh khối trong điều kiện nhiệt độ khác nhau và các tỷ lệ trộn khác trên thiết bị TGA. Kết quả thí nghiệm ở điều kiện nhiệt độ khác nhau (550 ÷ 700°C) và ở tỷ lệ trộn than - CNS (20 ÷ 80% sinh khối) thì chỉ ra tương ứng thời gian và tỷ lệ chuyển hóa nhiên liệu khác nhau. Đặc biệt ở tỷ lệ trộn than - sinh khối khác nhau ta thấy rõ được sự ảnh hưởng qua lại của mẫu trộn đến tốc độ và tỷ lệ chuyển hoá mẫu.

Từ khóa: Khí hóa, vỏ hạt điều, than nâu, đồng khí hóa.

ABSTRACT

Cashew nut shell (CNS) is a waste in cashew nut processing but can be considered as a by-product when used as fuel for pyrolysis, gasification or direct combustion for energy production at medium and small scale. Gasification is an advanced and potential technology to produce artificial gas with required properties of heat value and certain cleanliness for application to gas turbine cycles, replacing liquefied petroleum gas for high-quality ceramic kilns is still a question mark. Therefore, the study of optimizing coal gasification and CNS to produce gas with high heat value is a matter of concern to many researchers at present. In this article, method and results of research on coal-biomass gasification process are presented under different temperature conditions and other mixing ratios on TGA equipment. Experimental results at different temperatures (550 - 700°C) and at the mixing ratio of coal - CNS (20 - 80% of biomass) indicate that the time and rate of fuel conversion are different, respectively. Especially in the different coal-biomass mixing ratio, we can clearly see the mutual influence of the mixed sample on the sample conversion rate and speed.

Keywords: Gasification, cashew nut shell, browncoal, co-gasification.

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông Vận tải

²Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: tvbaydhtg@utc.edu.vn

Ngày nhận bài: 27/02/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 29/3/2023

Ngày chấp nhận đăng: 26/4/2023

1. GIỚI THIỆU

Việt Nam có lợi thế lớn về chế biến và sản xuất các sản phẩm nông nghiệp, đặc biệt là hạt điều. Điều là cây công nghiệp quan trọng được trồng ở hầu hết các nước trên thế giới. Tổng sản lượng điều thô toàn thế giới năm 2020-2021 ước đạt 3,7 triệu [1]. Các nước sản xuất hạt điều nhiều nhất là Ấn Độ, chiếm 25 đến 30 % tổng sản lượng. Tiếp theo là Brazil, Việt Nam, các nước châu Phi như Bờ Biển Ngà, Tanzania, Guinea Bissau, Benin, Nigeria, Mozambique, Senegal và Kenya. Ngoài sản phẩm chính là nhân hạt điều, vỏ hạt điều chiếm 70 - 75% trọng lượng hạt điều [2]. Điều này dẫn đến hàng năm có khoảng 2,7 triệu tấn vỏ được thải ra trong quá trình lấy hạt.

Các phụ phẩm nông nghiệp tạo ra từ quá trình chế biến hạt điều thường gây ô nhiễm lớn tới môi trường và sức khỏe con người. Một số giải pháp để tận dụng nguồn sinh khối dồi dào này đã được đề xuất, chẳng hạn như làm phân bón [3], sử dụng làm chất hấp phụ [4], hoặc nguyên liệu để sản xuất nhiên liệu sinh học [5]. Nhưng những cách này chỉ có thể tận dụng một phần nhỏ so với tổng sản lượng phụ phẩm được tạo ra. Vì vậy, việc coi các phụ phẩm này là nguyên liệu thô cho các ứng dụng có hiệu quả cao khác như khí hóa để sản xuất năng lượng là điều cần thiết.

Khí hóa sinh khối là một công nghệ tiềm năng cho sự phát triển các công nghệ năng lượng tái tạo nhờ tận dụng được nguồn nguyên liệu sinh khối sẵn có tại nhiều quốc gia. Khí hóa sinh khối là một quá trình chuyển đổi nhiệt hóa học, biến sinh khối thành một loại khí giàu CO và H₂ được gọi là khí tổng hợp (syngas). Syngas cung cấp nhiều ứng dụng khác nhau như sản xuất nhiệt, điện hoặc nhiên liệu sinh học [6]. Chính vì vậy mà hiện nay, công nghệ khí hóa thu hút được sự chú ý của nhiều nhà đầu tư, nhiều quốc gia trên thế giới. Quá trình khí hóa gồm có các giai đoạn: sấy khô, nhiệt phân, oxy hóa/cracking các chất bay hơi và khí hóa than. Sinh khối được gia nhiệt trước, sau đó chịu sự phân rã do nhiệt phân. Sản phẩm thu được (như khí, chất rắn và chất lỏng) phản ứng với nhau và với cả chất khí hóa để hình thành sản phẩm cuối cùng của quá trình khí hóa [7]. Vấn đề đặt ra khi khí hóa là chất lượng, tỷ lệ các khí thành phần và

nhệt trị của sản phẩm khí thu được khi khí hóa. Một số nghiên cứu gần đây đã chỉ ra các tính chất thích hợp của vỏ hạt điều việc sản xuất năng lượng [8-10]. Ngoài ra cũng có một số nghiên cứu về trộn than với sinh khối để đánh giá khả năng sự tương tác lẫn nhau giữa hai nhiên liệu đến sự chuyển đổi sinh khối khi khí hóa [11-13]. Các nghiên cứu về vỏ hạt điều chủ yếu là không trộn và đều độ cao (800 - 1000°C) [14-16]. Các nghiên cứu này cũng cho rằng các vỏ hạt này có tính không đồng nhất khá cao. Các đặc tính của sinh khối được hình thành từ đặc điểm nội tại của sinh khối, điều kiện thời tiết và đặc biệt là vị trí địa lý, giống cây trồng. Vì vậy, không thể ngoại suy các kết quả từ các nghiên cứu trước từ các nước khác đối với các sinh khối ở Việt Nam. Ngoài ra số lượng các nghiên cứu về quá trình khí hóa các vỏ hạt điều trộn với than nâu ở điều kiện nhiệt độ thấp còn rất hạn chế và không có tính hệ thống. Vì vậy, nghiên cứu này nhằm mục đích đánh giá khả năng chuyển đổi của sinh khối ở vùng nhiệt độ thấp (< 650°C) và khả năng tương hỗ lẫn nhau khi khí hóa hỗn hợp than với sinh khối

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Nhiên liệu sinh khối

Vỏ hạt điều được lấy tại nhà máy chế biến hạt điều Kimmy - Bình Phước (Việt Nam) được chọn để lấy mẫu. Sau khi được thu gom, vỏ hạt điều được ép lấy hết dầu, phần còn lại được phơi nắng trong 48 giờ, rồi được bảo quản trong túi kín chuyển về phòng thí nghiệm và bảo quản ở nhiệt độ phòng. Vỏ hạt điều sau khi đã phơi khô được xay với kích cỡ hạt đến 2mm, sau đó được sấy khô trong lò sấy ở nhiệt độ 107°C trong vòng 24h. Sau đó được cho vào hộp để là mẫu cho các thí nghiệm

2.2. Nhiên liệu than nâu

Than nâu được nhập khẩu từ Indonesia, kích thước hạt than đến 2mm. Than sau khi nhập về Việt Nam được sàng để lấy kích thước hạt từ 1 - 2mm, sau đó được sấy khô ở nhiệt độ 107°C trong vòng 24h. Sau đó được cho vào hộp để là mẫu cho các thí nghiệm.

2.3. Phân tích đặc tính của mẫu.

Để xác định các đặc tính của sinh khối, tác giả sử dụng các phân tích kỹ thuật và phân tích nguyên tố (Proximate and Ultimate analysis) để xác định hàm lượng chất bốc V (tiêu chuẩn ASTM D-3175), hàm lượng tro A (tiêu chuẩn ASTM D-3174) và hàm lượng carbon cố định FC ($FC_{db} = 100 - V - A$). Ngoài ra, máy phân tích nguyên tố PerkinElmer 2400 Series II được sử dụng để xác định hàm lượng các nguyên tố Carbon (C), Hydrogen (H), Nitrogen (N), và Oxy (O) của mẫu.

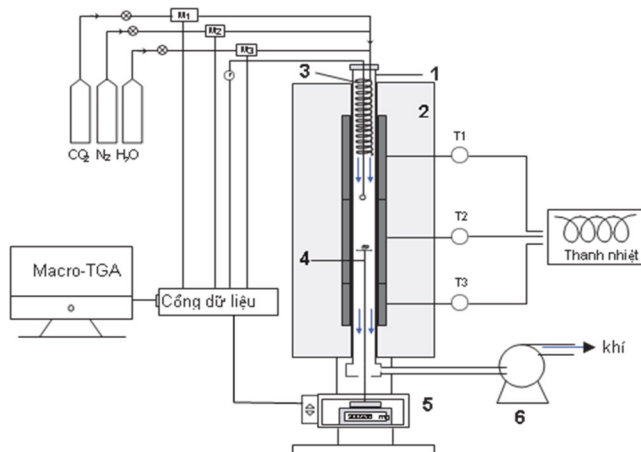
2.4. Quá trình khí hóa

Nghiên cứu này được thực hiện bằng thiết bị TGA (hình 1) và đặt tại phòng Lab, Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội (USTH) - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Hình 1 mô tả thiết bị thí nghiệm khí hóa sinh khối TGA dạng cố định. Thiết bị bao gồm một ống làm bằng ceramic chịu được nhiệt độ cao (1) đặt vào trong một lò điện (2) có

các thanh nhiệt trở gia nhiệt sơ bộ (3), một cân khối lượng (5), một khay để mẫu (4), cặp nhiệt (T_1, T_2, T_3), thiết bị lấy khí sản phẩm (6), các đồng hồ đo khí bổ xung trong quá trình khí hóa.

Trong thiết bị trên, lò phản ứng là một ống bằng Ceramic dài 11 cm và có đường kính 7,5cm chịu được nhiệt độ cao, xung quanh được quấn các thanh điện trở để gia nhiệt cho môi trường trong lò có nhiệt độ đồng đều nhau. Môi trường phản ứng là N_2 hòa trộn với hơi nước hoặc CO_2 . Lưu lượng các khí này được điều chỉnh bằng các van điều chỉnh lưu lượng M_1, M_2 và M_3 . Trước tiên, lò phản ứng được nâng nhiệt độ lên đến nhiệt độ cần khí hóa (500 - 650°C) tùy vào nhiệt độ thí nghiệm, sau đó mẫu được đặt trên khay sẽ được nâng từ phía dưới lên đến một vị trí đã được xác định trước trong điều kiện N_2 luôn được bơm vào với lưu lượng 3 l/phút. Thời gian nâng khay mẫu từ phía dưới lên đến vị trí cố định là 5s. Khi khối lượng mẫu bắt đầu biến đổi thì bơm khí tham gia phản ứng vào (H_2O, CO_2). Quá trình khí hóa bắt đầu diễn ra, khối lượng của mẫu giảm dần đến khi nào thu được một khối lượng không đổi, tương ứng với khối tro, cốc. Quá trình thay đổi khối lượng theo thời gian đã được đo bằng cân điện tử và ghi lại.



Hình 1. Mô hình thiết bị thí nghiệm TGA

Mẫu thí nghiệm là vỏ hạt điều được trộn với than nâu theo các tỷ lệ khác nhau với tổng khối lượng là 3 gram và được cho vào khay thép chịu nhiệt để đưa vào lò khí hóa. Khí hóa được thực hiện ở các nhiệt độ 550, 600, 650°C.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Tính chất hóa lý của sinh khối và than nâu

Kết quả phân tích Proximate and Ultimate analysis được cho trong bảng 1.

Bảng 1. Đặc tính của các sinh khối và than sinh khối

TT	V_{db} (%)	A_{db} (%)	FC_{db} (%)	C_{daf} (%)	H_{daf} (%)	O_{daf} (%)	N_{daf} (%)	HHV ($MJkg^{-1}$)
CNS	76,8	5,0	18,2	55,7	5,7	38,4	0,2	20,2
Than nâu	55,96	8,0	31,24	70,96	5,13	22,51	1,01	25,19

V: Chất bốc, A: Tro, FC: Carbon cố định, HHV: nhiệt trị cao, db: Mẫu khô, daf: Mẫu khô loại bỏ tro.

Từ kết quả cho thấy, nhiệt trị cao của vỏ hạt điều là 20,2MJ.kg⁻¹. Giá trị này khá cao nếu so sánh với sinh khối khác (phần lớn các sinh khối có nhiệt trị ở khoảng 17MJ.kg⁻¹) và có thể so sánh với một số loại than đá nói chung [17]. Kết quả này có thể được lý giải bởi lượng dầu điều có trong vỏ giúp làm tăng giá trị nhiệt trị. Trong CNS còn có hàm lượng chất bốc khá cao (76,8%) nên có thể làm tăng khả năng chuyển đổi sang sản phẩm khí. Ngoài ra với lượng tro thấp (5%) có thể thấy rằng trong thành phần của vỏ hạt điều chủ yếu là các chất khoáng nên rất thích hợp làm nhiên liệu cho khí hóa.

3.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến độ chuyển hóa của mẫu khô

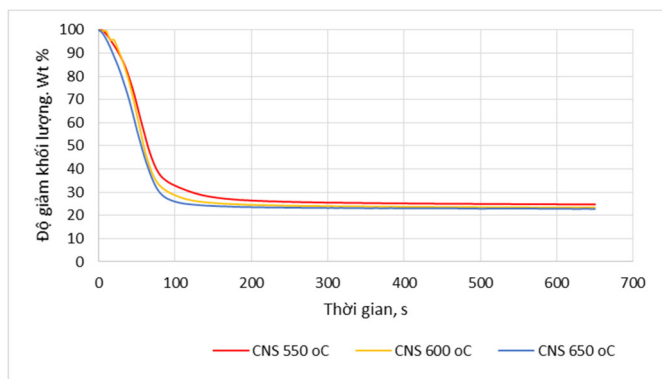
Mẫu thí nghiệm là 2 gram than nâu, 2 gram CNS và 2 gram hỗn hợp than nâu với sinh khối theo các tỷ lệ trộn khác nhau. Khi thí nghiệm, các mẫu này được đặt lên khay mẫu theo mô tả ở trên

Chất xúc tác cho quá trình khí hóa là hơi nước với lưu lượng 2l/h.

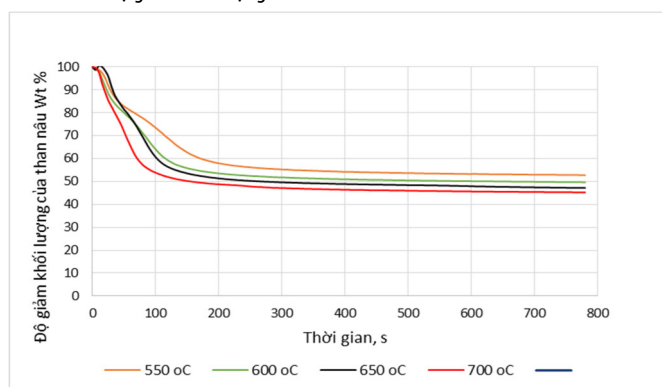
Độ chuyển hóa X [0:1] của than mẫu trong quá trình khí hóa được xác định như sau [18]:

$$X = \frac{m_i - m_t}{m_i - m_{ash}}$$

Trong đó: m_i, m_t, m_{ash} là khối lượng của mẫu tại thời điểm đầu, thời điểm hiện tại và của tro.



Hình 2. Độ giảm khối lượng của CNS



Hình 3. Độ giảm khối lượng của than nâu

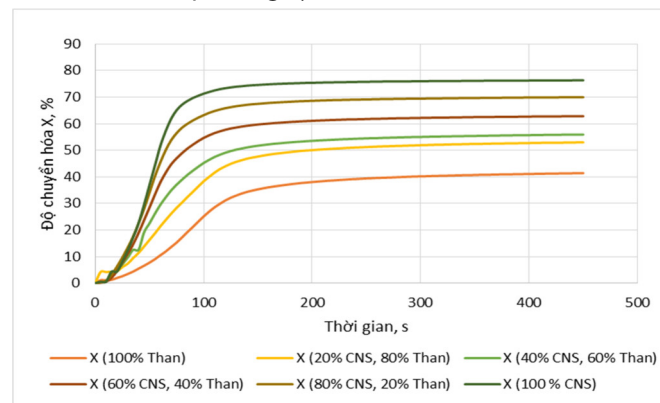
Trên hình 2 và 3 biểu diễn độ giảm khối lượng của CNS ở các nhiệt độ khí hóa khác nhau. Có thể thấy rằng, khi khí hóa ở mỗi một nhiệt độ khác nhau thì khả năng chuyển đổi

của mẫu là khác nhau. Ở 650°C thì độ chuyển hóa là 77,12%, còn ở 550°C thì độ chuyển hóa thấp hơn (75,2%) sau khoảng thời gian 300s. Ngoài ra, tốc độ chuyển hoá cũng thay đổi theo nhiệt độ khí hoá. So với tỷ lệ chất bốc có trong mẫu CNS thì ở 600°C (X = 76,55%), toàn bộ chất bốc có trong CNS đã được chuyển hóa hết thành sản phẩm khí. Điều này cũng tương đồng với than nâu (hình 3). Sau 700 s khí hóa than nâu, khối lượng mẫu chỉ còn 52,97; 49,85; 47,43 và 45,41% tương đương với độ chuyển hóa là 47,03; 50,15; 52,57 và 54,59% ứng với nhiệt độ khí hóa là 550, 600, 650 và 700°C.

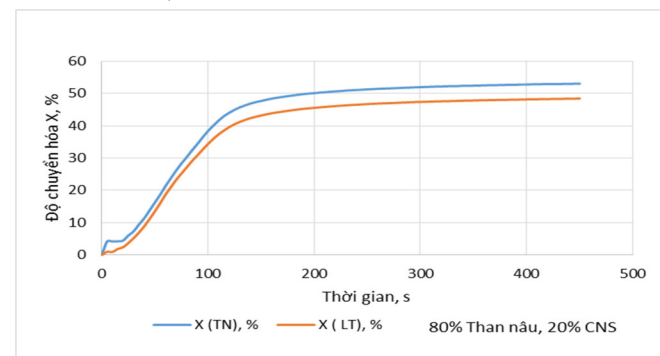
3.3. Ảnh hưởng của tỷ lệ trộn than-sinh khối đến độ chuyển hóa của mẫu khô

Độ chuyển hóa khi khí hóa hỗn hợp CNS với than nâu ở các tỷ lệ trộn khác nhau ở nhiệt độ 600°C được biểu diễn trên hình 4. Theo đó, ở các tỷ lệ trộn khác nhau, chỉ trong khoảng thời gian rất ngắn (150 - 200s), giá trị X tăng nhanh rồi dần đạt đến giá trị cố định tùy vào tỷ lệ trộn khác nhau. Căn cứ vào giá trị chuyển hóa trên có thể thấy rằng, lượng chuyển hóa của mẫu thành sản phẩm khí chủ yếu là do chất bốc có trong nhiên liệu. Do CNS có hàm lượng chất bốc lớn (76,8%) so với than (55,96%) có thể thấy rằng mẫu nào có tỷ lệ trộn nhiều CNS hơn thì độ chuyển hóa cũng lớn hơn. Cụ thể ở thời điểm 300 s, mẫu có 80% CNS có độ chuyển hóa 69,47% so với 51,9% khi tỷ lệ trộn chỉ có 20% CNS.

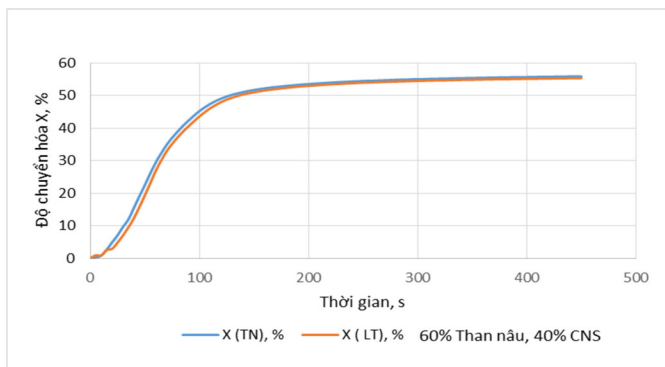
Cũng từ hình 4 cho thấy, tốc độ chuyển hóa của CNS nhanh hơn của than nâu. Cụ thể đối với CNS, ở giây thứ 100 thì lượng chất bốc đã chuyển hóa gần hết, trong khi đó đối với than nâu thì phải ở giây thứ 200.



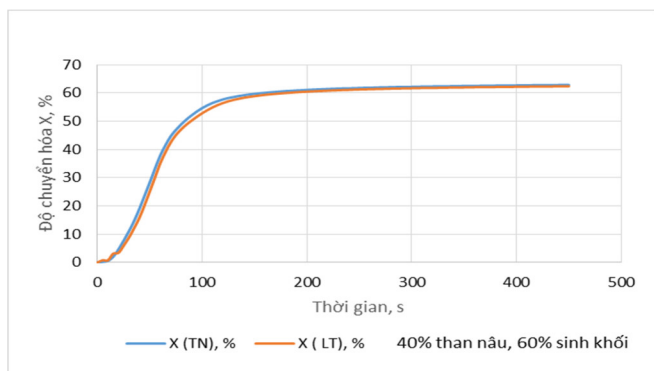
Hình 4. Độ chuyển hóa (X) của mẫu



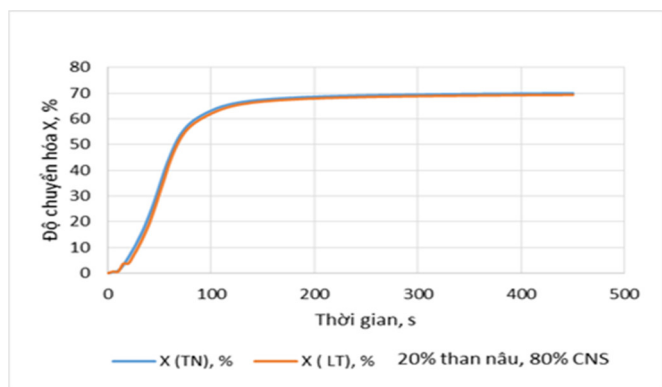
(a)



(b)



(c)



(d)

Hình 5. So sánh tốc độ chuyển hóa giữa lý thuyết và thực nghiệm

Trên hình 5 so sánh độ chuyển hóa lý thuyết X (LT) và thí nghiệm X (TN) của mẫu trộn than với sinh khối theo các tỷ lệ trộn khác nhau. Độ chuyển đổi lý thuyết được tính theo biểu thức sau:

$$X(LT) = \% CNS * (X(100\% CNS)) + \% Than\ n\grave{a}u * (X(100\% Than\ n\grave{a}u))$$

Theo kế quả thí nghiệm cho thấy, khi trộn than nâu và sinh khối để khí hóa ở bất kỳ tỷ lệ nào thì độ chuyển hóa X luôn lớn hơn so với tính toán lý thuyết. Ở tỷ lệ trộn 20% than nâu và 80% sinh khối, 40% than nâu và 60% sinh khối, 40% than nâu và 60% sinh khối, độ chuyển hóa X lớn hơn là 0,6%. Tuy nhiên, tỷ lệ trộn có 80% than nâu và 20% sinh khối thì độ chuyển hóa X tăng cao hơn 4,6% so với tính toán lý thuyết. Kết quả tích cực này có thể (biochar) đóng vai trò như một chất xúc tác trong khi khí hoá than nâu để

chuyển hóa hydrocarbon nặng khí như H₂, CO, CO₂ [19]. Trong đó CO₂ cũng là tác nhân khí hoá do vậy quá trình khí hóa mẫu hỗn hợp có cải thiện đôi chút [20].

4. KẾT LUẬN VÀ ĐỀ XUẤT

Bài báo này nghiên cứu quá trình khí hóa than nâu, vỏ hạt điều và trộn với nhau theo tỷ các tỷ lệ nhất định. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng:

- Khi nhiệt độ khí hóa càng lớn thì độ chuyển hóa càng tăng
- Độ chuyển hoá sinh khối tăng từ 75,2% đến 77,12% tương ứng với nhiệt độ khí hoá từ 550°C ÷ 650°C.
- Độ chuyển hoá than nâu tăng từ 47,03% đến 54,59% tương ứng với nhiệt độ khí hoá từ 550°C ÷ 700°C.
- Tốc độ và thời gian chuyển hóa sinh khối nhanh sự chuyển hoá của than nâu.
- Khi trộn than với sinh khối rõ ràng thấy có sự tương tác giữa sinh khối và than làm tăng tỷ lệ chuyển hoá mẫu thành sản phẩm khí

Các kết luận trên làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo để lựa chọn nhiệt độ khí hóa, tỷ lệ trộn than với sinh khối để thu được sản phẩm khí có các thành phần khí, nhiệt trị theo yêu cầu.

LỜI CẢM ƠN

Đây là nghiên cứu được hỗ trợ bởi đề tài nhiệm vụ nghị định thư với Trung Quốc “Phát triển công nghệ và quá trình để sản xuất khí nhiên liệu giàu hydro và hydrocarbon nhẹ, nhiệt trị cao bằng quá trình reforming xúc tác chất bốc từ nhiệt phân sinh khối” - Mã số NĐT.94.CHN/20.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. INC - International Nut and Dried Fruit Council. <https://www.nutfruit.org/consumers> (accessed Aug. 11, 2021).

[2]. A. G. Mohod, Y. P. Khandetod, S. Sengar, 2010. *Eco-friendly utilization of parabolic concentrating solar cooker for extraction of cashew nut shell oil and household cooking*. Int. J. Sustain. Energy, vol. 29, no. 3, doi: 10.1080/14786460903497383.

[3]. Nguyen Anh Dzung, Dzung TT, Tran Trung Dzung, Vo Thi Phuong Khanh, 2013. *Evaluation of Coffee Husk Compost for Improving Soil Fertility and Sustainable Coffee Production in Rural Central Highland of Vietnam*. Resour. Environ., vol. 3, pp. 77–82.

[4]. W. E. Oliveira, A. S. Franca, L. S. Oliveira, S. D. Rocha, 2008. *Untreated coffee husks as biosorbents for the removal of heavy metals from aqueous solutions*. J. Hazard. Mater., vol. 152, no. 3, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.07.085.

[5]. L. Wilson, G. R. John, C. F. Mhilu, W. Yang, W. Blasiak, 2010. *Coffee husks gasification using high temperature air/steam agent*. Fuel Process. Technol., vol. 91, no. 10, doi: 10.1016/j.fuproc.2010.05.003.

[6]. V. S. Sikarwar, M. Zhao, P. S. Fennell, N. Shah, E. J. Anthony, 2017. *Progress in biofuel production from gasification*. Prog. Energy Combust. Sci., vol. 61, doi: 10.1016/j.pecs.2017.04.001.

- [7]. N. Couto, A. Rouboa, V. Silva, E. Monteiro, K. Bouziane, 2013. *Influence of the Biomass Gasification Processes on the Final Composition of Syngas*. Energy Procedia, vol. 36, doi: 10.1016/j.egypro.2013.07.068.
- [8]. H. N. Nguyen, T. Tsubota, 2020. *Complete Parametric Study of Bagasse Pellets During High-Temperature Steam Gasification*. J. Therm. Sci. Eng. Appl., vol. 12, no. 4, doi: 10.1115/1.4045698.
- [9]. C. Setter, F. A. Borges, C. R. Cardoso, R. F. Mendes, T. J. P. Oliveira, 2020. *Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via slow pyrolysis*. Ind. Crops Prod., vol. 154, doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112731.
- [10]. C. Rodriguez, G. Gordillo, 2011. *Adiabatic Gasification and Pyrolysis of Coffee Husk Using Air-Steam for Partial Oxidation*. J. Combust., vol. 2011, doi: 10.1155/2011/303168.
- [11]. H. A. Tran, L. Van de Steene, D. D. Le, 2018. *Pyrolysis and Char Oxidation of Biomass and Coal Blends: Kinetic Study Using Thermogravimetric Analysis*. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., vol. 159, p. 012035, doi: 10.1088/1755-1315/159/1/012035.
- [12]. K. Kumabe, T. Hanaoka, S. Fujimoto, T. Minowa, K. Sakanishi, 2007. *Co-gasification of woody biomass and coal with air and steam*. Fuel, vol. 86, no. 5–6, pp. 684–689, doi: 10.1016/j.fuel.2006.08.026.
- [13]. F. Pinto, et al., 2003. *Effect of experimental conditions on co-gasification of coal, biomass and plastics wastes with air/steam mixtures in a fluidized bed system*. Fuel, vol. 82, no. 15–17, pp. 1967–1976, doi: 10.1016/S0016-2361(03)00160-1.
- [14]. J. Ábrego, D. Plaza, F. Luño, M. Atienza-Martínez, G. Gea, 2018. *Pyrolysis of cashew nutshells: Characterization of products and energy balance*. Energy, vol. 158, pp. 72–80, doi: 10.1016/j.energy.2018.06.011.
- [15]. A. Diedhiou, L.G. Ndiaye, A. Bensakhria, O. Sock, 2019. *Thermochemical conversion of cashew nut shells, palm nut shells and peanut shells char with CO₂ and/or steam to aliment a clay brick firing unit*. Renew. Energy, vol. 142, doi: 10.1016/j.renene.2019.04.129.
- [16]. Ndiaye, Diedhiou A., S. O. Bensakhria A., 2016. *Comparison of the Gasification of Cashew Wood and Cashew Nut Shells Chars with CO₂ and Steam*. Res. J. Chem. Sci., vol. 6, no. 9, pp. 11–18.
- [17]. P. Tan, C. Zhang, J. Xia, Q.Y. Fang, G. Chen, 2015. *Estimation of higher heating value of coal based on proximate analysis using support vector regression*. Fuel Process. Technol., vol. 138, pp. 298–304, doi: 10.1016/j.fuproc.2015.06.013.
- [18]. Le Duc Dzung, 2018. *Công nghệ sinh khối và công nghệ chuyển đổi nhiệt năng thành điện năng*. Bach Khoa Publishing House, Hanoi.
- [19]. R. Diao, S. Li, J. Deng, X. Zhu, 2021. *Interaction and kinetic analysis of co-gasification of bituminous coal with walnut shell under CO₂ atmosphere: Effect of inorganics and carbon structures*. Renew. Energy, vol. 173, pp. 177–187, doi: 10.1016/j.renene.2021.03.097.
- [20]. Y. Zhang, Y. Zheng, 2016. *Co-gasification of coal and biomass in a fixed bed reactor with separate and mixed bed configurations*. Fuel, vol. 183, pp. 132–138, doi: 10.1016/j.fuel.2016.06.066.

AUTHORS INFORMATION

Tran Van Bay¹, Le Duc Dzung²

¹Faculty of Mechanical Engineering, University of Transport and Communications, Hanoi

²School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology